



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Química

Tesina

**Análisis de los tratamientos del bagazo de la industria del Tequila
para la obtención de productos de interés en beneficio de la
economía circular de México**

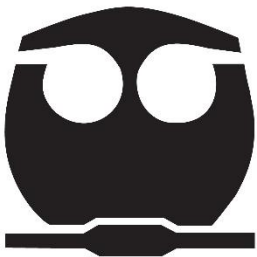
Que para obtener el título de:

Ingeniera Química

Presenta

Gallardo Hernández Ana Elizabeth

Ciudad Universitaria, CD. MX., 2024





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor:** Dr. ALFONSO DURÁN MORENO

VOCAL: **Profesor:** Dr. OSCAR HERNÁNDEZ MELÉNDEZ

SECRETARIO: **Profesora:** M. en A. IBET NAVARRO REYES

1er. SUPLENTE: **Profesor:** OSCAR DE ANDA AGUILAR

2°. SUPLENTE: **Profesor:** Dr. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD
UNIVERSITARIA, CD.MX.

ASESOR DEL TEMA:

M. en A. IBET NAVARRO REYES

SUSTENTANTE:

GALLARDO HERNÁNDEZ ANA ELIZABETH

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS.....	V
LISTA DE FIGURAS	VI
ABREVIATURAS.....	VII
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Proceso de elaboración del Tequila.....	1
1.2. Estadística económica en la producción del Tequila y problemática ambiental.	12
1.3. Economía circular.	14
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo general.....	19
2.2. Objetivos particulares.....	19
3. METODOLOGÍA.....	20
4. RESULTADOS	25
4.1. Composición del bagazo del Tequila y pretratamientos de lignocelulosa. ...	25
4.1.1. Celulosa.....	26
4.1.2. Hemicelulosa.	27
4.1.3. Lignina.	28
4.2. Consideraciones para el procesamiento de lignocelulosa.	29
4.3. Pretratamientos, efectos sobre el material lignocelulósico y condiciones de proceso.	32
4.3.1. Pretratamientos químicos.	32
4.3.2. Pretratamientos físicos.	39
4.3.3. Pretratamientos fisicoquímicos.	40
4.3.4. Pretratamientos biológicos.....	42
4.4. ALTERNATIVAS PARA LA UTILIZACIÓN DEL TEQUILA EN LA OBTENCIÓN DE PRODUCTOS ECONÓMICAMENTE ATRACTIVOS.....	48

4.4.1 Usos actuales del bagazo del Tequila y prospectos.	48
4.4.2. Obtención de glucosa y azúcares reductores a partir de bagazo de Tequila.	50
4.4.3. Producción de xilitol.	59
4.4.4. Producción de ácido succínico.	63
4.4.5. Producción de enzimas.	65
4.4.6. Polímeros biodegradables.	66
4.4.6.1. Ácido poliláctico (PLA)	70
4.4.6.1.1. Obtención de ácido láctico a partir de glucosa	71
4.4.6.2. Polihidroxialcanoatos (PHA's)	73
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	78
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
7. REFERENCIAS	85
8. ANEXOS	94
8.1. ANEXO A. Pretratamientos para materiales lignocelulósicos.	94
8.2. ANEXO B. Diagrama de proceso en la bioconversión de bagazo de Tequila y bagazo de caña de azúcar a etanol y xilitol.	98
8.3. ANEXO C. Tabla resumen de pretratamientos para obtención de azúcares reductores y glucosa.	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de Tequila.....	10
Tabla 2. Composición de la lignocelulosa en porcentaje en peso húmedo.....	25
Tabla 3. Bacterias y microorganismos reportados en la degradación de materiales lignocelulósicos.	43
Tabla 4. Enzimas para la degradación de los monómeros que conforman la lignocelulosa.....	46
Tabla 5. Principales químicos/productos con potencial económico seleccionados por el USDOE a partir de lignocelulosa	50
Tabla 6. Azúcares reductores obtenidos mediante hidrólisis ácida y alcalina.....	52
Tabla 7. Balance de materia, condiciones del tratamiento y porcentaje de conversión de celulosa a glucosa mediante el método etanosolv aplicado a BAT.....	55
Tabla 8. Conversión y producción de glucosa con diferentes cargas de sólidos y diferentes cepas.	57
Tabla 9. Enzimas que se pueden obtener del bagazo de <i>Agave tequilana</i> Weber var. azul.....	65
Tabla 10. Condiciones experimentales para la producción de glucosa y ácido láctico	72
Tabla 11. Principales estructuras de la familia de los PHA.....	74
Tabla 12. Microorganismos utilizados en la producción de PHAs	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura molecular de inulina, conformada por 43 monómeros de fructosa y una molécula de glucosa a cada extremo.....	2
Figura 2. Proceso de destilación de Tequila, mediante la utilización de columna de destilación y alambiques.	7
Figura 3. Diagrama simplificado de destilación de Tequila.....	9
Figura 4. Diagrama de proceso de elaboración de Tequila.	11
Figura 5. Volumen de producción de Tequila expresado en millones de litros de enero de 2011 a diciembre de 2021.....	12
Figura 6. Esquema general de economía lineal y circular.	16
Figura 7. Ejemplos de diferencias entre economía lineal y circular en la que los desechos son reaprovechados.....	17
Figura 8. Diagrama de bloques de la metodología empleada.	24
Figura 9. Estructura de primaria de la celulosa.	27
Figura 10. Estructura de la hemicelulosa.	27
Figura 11. Estructura de la lignina.	28
Figura 12. Composición y efectos del tratamiento de lignocelulosa.	29
Figura 13. Etapas de proceso generalizado para la bioconversión de lignocelulosa en productos de valor agregado.....	31
Figura 14. Ejemplo de la estructura del IL $[C_3H_3N_2RR'] [BF_4]$, y los cationes y aniones más utilizados en la formación de IL.....	36
Figura 15. Proceso propuesto por Varanasi para la obtención de azúcares con un pretratamiento con IL.	39
Figura 16. Acción de los distintos tipos de celulasas (endocelulasas, exocelulasas y β -glucosidasas) sobre la celulosa, para formación de glucosa.	45
Figura 17. Bioproductos comerciales a partir de biomasa de lignocelulosa.	49
Figura 18. Ejemplos de polímeros acomodados de acuerdo a origen y biodegradabilidad.	68
Figura 19. Ruta simplificada para la producción de ácido poliláctico a partir de la fermentación de glucosa.	71
Figura 20. Estructura química general de los polihidroxialcanoatos (PHAs).	74

ABREVIATURAS

%	Por ciento
(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	Celulosa
[C2mim][OAc]	Acetato de 1-etil-3-metilimidazolio
[Emim][OAc]	1-etil-3-metilimidazolio
~	Aproximadamente
<	Menor que o menor a
>	Mayor que o mayor a
°C	Grado Celsius
AB	Agave Bagasse (Bagazo de Agave, por sus siglas en inglés)
AFEX	Explosión de Fibra con Amoníaco
Alc. Vol.	Alcohol volumétrico
ATB	Agave Tequilana Bagasse (Bagazo de <i>Agave Tequilana</i> , por sus siglas en inglés).
atm	Atmósferas
ATP	Adenosin Trifosfato
AXU/g	Unidades de Xilanasas por gramo
bar	bar
BASF	Badische Anilin- und Soda-Fabrik (empresa)
BAT	Bagazo de <i>Agave Tequilana</i>
BCA	Bagazo de caña
Br ⁻	Bromuro

BTU	Unidades de beta-glucosidasa
C ₂ H ₅ OH	Etanol
C ₆ H ₁₂ O ₆	Glucosa
cal	Caloría
CBU/mL	Unidades de celobiasa por mililitro
Cellic®CTec2	Complejo de celulasa para la degradación de celulosa
CH ₃ COOH	Ácido acético
CIATEJ	Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco
Cl ⁻	Cloruro
cm	Centímetro
CNIT	Cámara Nacional de la Industria del Tequila
CO(NH ₂) ₂	Urea
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₃ ²⁻	Carbonato
COVID-19	Coronavirus Disease 2019
CRT	Consejo Regulador del Tequila
D-	Estereoisómero D
DOF	Diario Oficial de la Federación
DP	Direct Polymerization (Polimerización Directa, por sus siglas en inglés)
EC	Economía Circular

ECU/g	Unidades de endocelulasa por gramo
EGU/g	Unidades de endoglucanasa por gramo
et al.	y otros
FBG/g	Unidades de betaglucanasa funguica por gramo
FPU/mL	Unidades de papel filtro por mililitro
g	Gramo
g/g	Gramo sobre gramo total
g/L	Gramos sobre litro
gDWM	Dry Weight Matter (gramos de peso de materia seca, por sus siglas en inglés)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
h	Hora
H ⁺	Hidrón
H ₂ O	Agua
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HBP	Hongos de Pudrición Blanca
HCl	Ácido clorhídrico
HCO ₃ ⁻	Bicarbonato
HNO ₃	Ácido nítrico
HPLC	High Performance Liquid Chromatography (Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia, por sus siglas en inglés)

HTec2	Endoxilanasas con alta especificidad hacia hemicelulosa soluble
ICIDCA	Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar
IIEG	Instituto de Información Estadística y Geográfica
IL's	Ionic Liquid (Líquidos iónicos, por sus siglas en inglés)
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
kg	Kilogramo
kg/cm ²	Kilogramo por centímetro cuadrado
KOH	Hidróxido de Potasio
l	Litro
L-	Estereoisomero L
LA	Ácido Láctico
lcl-	Long chain length (Cadena de Longitud Larga, por sus siglas en inglés)
mcl-	Médium chain length (Cadena de Longitud Media, por sus siglas en inglés)
mg	Miligramo
Mg(NO ₃) ₂	Nitrato de magnesio
mg/mL	Miligramos por mililitro
min	Minuto
mm	Milímetros
mM	Milimolar

mmHg	Milímetros de mercurio
mol/L	Mol sobre litro
MPa	MegaPascal
Mt	Mezontete
Mz	Metzal
N	Concentración Normal
N ₂	Nitrógeno
NaOH	Hidróxido de sodio
NOM	Norma Oficial Mexicana
p/p	Peso de preparación sobre peso total
p/v	Peso sobre volumen
PBAT	Poli(Butilén Adipato-co-Tereftalato)
PBS	Succinato de polibutileno
PCL	Policaprolactona
PE	Polietileno
PET	Polietilentereftalato
pH	Potencial de Hidrógeno
PHA	Polihidroxiácido
PHB	Polihidroxiacetato
PLA	Ácido poliláctico
PP	Polipropileno

PTT	Poli(tereftalato de trimetileno)
PVOH	Polivinilalcohol o alcohol polivinílico
RH	Rice Husks (Cáscaras de arroz, por sus siglas en inglés)
ROP	Ring Opening Polymerization (Polimerización por apertura de anillo, por sus siglas en inglés)
rpm	Revoluciones por minuto
RTIL	Room Temperature Ionic Liquids (Líquidos iónicos a temperatura ambiente, por sus siglas en inglés)
S.A. de C.V.	Sociedad Anónima de Capital Variable
s.f.	sin fecha
SAGARPA	Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
scl-	Short chain length (Cadena de Longitud Corta, por sus siglas en inglés)
SCN ⁻	Sulfocianato
SJR	SCImago Journal Rank (índice de impacto)
SNIP	Source Normalized Impact per Paper (índice de impacto)
T	Temperatura
t	Tiempo
TABH	Tequila Agave Bagasse Hydrolysate (Hidrolizado de Bagazo de Agave de Tequila, por sus siglas en inglés)
TCP-ET	Copoliéster termoplástico
TS	Total de Sólidos
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México

USD	Dólares Americanos
USDOE	United States Department of Energy (Departamento de Energía de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés)
v/v	Volumen sobre volumen total
var.	Variedad
vol.	Volumen
w/v	Peso sobre volumen total
w/w %	Wet Weight (porcentaje en peso húmedo, por sus siglas en inglés)

1. ANTECEDENTES

1.1. Proceso de elaboración del Tequila.

De acuerdo con la NOM-006-SCFI-2012 se define al Tequila como:

“Bebida alcohólica 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, derivados de las cabezas de Agave de la especie *tequilana Weber* variedad azul, previa o posteriormente hidrolizadas o cocidas, y 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 una proporción no mayor de 49% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa, en los términos establecidos en la presente norma y en la inteligencia que no están permitidas las mezclas en frío. El Tequila es un líquido que puede tener color, cuando sea madurado, abocado, o añadido de un color específico.” (DOF, 2012).

La elaboración del Tequila comprende varias etapas, las cuales a continuación se explicarán a detalle:

- Plantación y cosecha del agave de la especie *tequilana Weber* variedad azul.
- Cocción o hidrólisis de los azúcares.
- Extracción: suave, tahona, tren de molinos
- Formulación: Tequila 100% o Tequila
- Fermentación
- Destilación: columnas, alambiques.
- Maduración o Añejamiento
- Mezclado
- Envasado

El proceso de producción inicia desde la plantación de un tipo específico de agave, el cual corresponde a la especie *Agave tequilana Weber* variedad azul, en la que

desde la plantación hasta su cosecha deben de pasar como mínimo siete años aproximadamente, tiempo durante el cual el agave alcanza la madurez y obteniéndose de esta manera una planta con los requerimientos necesarios para la producción del mejor Tequila, puesto que durante esta edad, el agave contiene la acumulación máxima de carbohidratos, de los cuales la inulina (Figura 1) representa el principal de ellos.

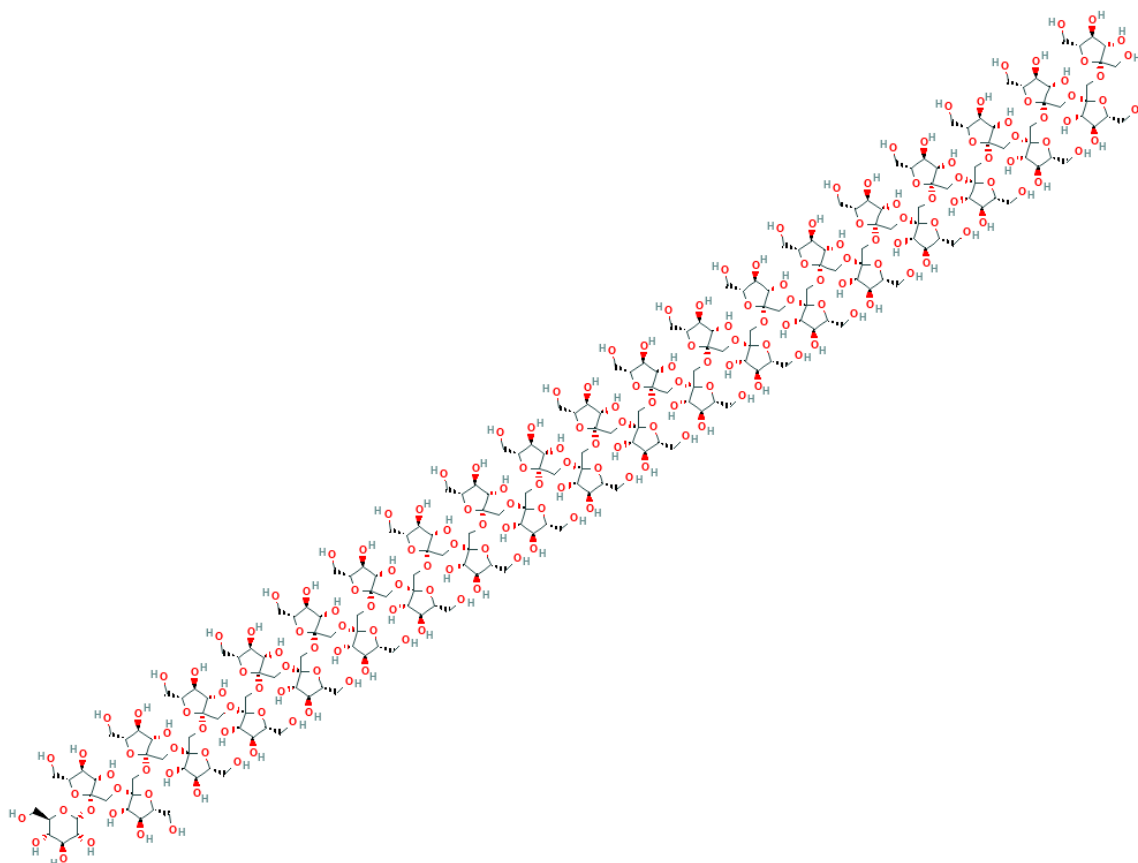


Figura 1. Estructura molecular de inulina (National Center for Biotechnology Information, 2021), conformada por 43 monómeros de fructosa y una molécula de glucosa a cada extremo (CRT, 2018).

De acuerdo con la NOM-006-SCFI-2012, esta variedad de agave tiene que ser: “1) cultivado y cosechado en zonas geográficas delimitadas por la Declaratoria general de denominación de origen, y de acuerdo con la NOM-006-SCFI-2012, y 2) debe estar registrado en el organismo de certificación del Tequila” (CRT, 2018).

La parte importante del agave para la elaboración del Tequila es la “piña” la cual es obtenida cortando con una coa las hojas de la planta (proceso conocido como jima)

en cuya parte se encuentran almacenados en mayor cantidad dichos carbohidratos. Para definir la cantidad de carbohidratos almacenados se realiza un muestreo de las mismas mediante métodos analíticos (Caza Sauza, 2021). Las piñas se consideran de mayor calidad cuando al analizar contienen de 25 a 30% de azúcares con respecto al peso, el cual es un indicador de la cantidad de inulina que contienen las mismas (Bautista Justo et al., 2001). Además, se analizan otros parámetros de importancia como contenido de humedad, cenizas, nivel de pH (Alemán-Nava et al., 2018).

Sin embargo, como la inulina es un carbohidrato complejo es necesario descomponerlo en azúcares más simples (fructosa, sucrosa y glucosa) para que posteriormente pueda ser fermentado por las levaduras. Mediante la hidrólisis de la inulina es posible obtener fructosa, mediante procesos térmicos y enzimáticos, o la combinación de ambos. Para tal procedimiento las piñas se hornean cortadas por la mitad con vapor de agua a 100 y 110°C en hornos de mampostería durante un tiempo de 50 a 72 horas. También este proceso puede llevarse a cabo en autoclaves (tanques de acero con toneladas de capacidad), en los cuales el tiempo puede ser reducido entre 8 a 14 horas (CNIT, 2018).

Después de la hidrólisis, se procede a extraer los carbohidratos de la fibra. Para esto, las piñas ya cocidas se pasan por desgarradoras y por trenes de molinos de rodillos, donde se obtienen pequeñas porciones de fibra, que a continuación son exprimidas mediante la inyección de agua, dando como producto las mieles del agave que posteriormente serán fermentadas. Estas mieles son conocidas comúnmente como "mosto fresco" el cual es destinado para producir Tequila y Tequila 100% de agave.

La NOM-006-SCFI-2012 establece que:

"Tequila 100% de agave: Es el producto, que no es enriquecido con otros azúcares distintos a los obtenidos del Agave de la especie *tequilana weber* variedad azul cultivado en el territorio comprendido en la Declaración. Para que este producto sea considerado como "Tequila 100% de agave" debe ser envasado en la planta que controle el propio Productor Autorizado,

misma que debe estar ubicada dentro del territorio comprendido en la Declaración.

Este producto debe ser denominado únicamente a través de alguna de las siguientes leyendas: "100% de agave", "100% puro de agave", "100% agave", o "100% puro agave", al final de las cuales se puede añadir la palabra "azul".

Tequila: Es el producto, en el que los mostos son susceptibles de ser enriquecidos y mezclados conjuntamente en la formulación con otros azúcares hasta en una proporción no mayor de 49% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa. Este enriquecimiento máximo de hasta 49% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa, no se debe realizar con azúcares provenientes de cualquier especie de agave. Sólo se podrá incrementar el 51% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa con azúcares reductores totales provenientes de *Agave de la especie tequilana weber* variedad azul cultivado en el territorio comprendido en la Declaración.

Este producto puede ser envasado en plantas ajenas a un Productor Autorizado, siempre y cuando los envasadores cumplan con las condiciones establecidas en el inciso 6.5.4.2 y demás aplicables de la presente norma” (DOF, 2012).

En algunos casos la extracción se realiza con técnicas artesanales mediante el uso de tahonas (enorme piedra circular que gira dentro de una tinaja o piedra de concreto, jalada mediante animales de carga o tractores), el cuál es pasado sobre las piñas cocidas de agave, extrayendo el jugo y los azúcares de las fibras (Nájar, Procesos de extracción de azúcar del agave., 2017).

Recientemente y en otros casos se utilizan trenes de molinos mecánicos, impulsados mediante motores eléctricos, y a partir de la presión ejercida por los mismos, desgarran y apachurran las fibras cocidas (Nájar, Procesos de extracción de azúcar del agave., 2017).

Actualmente, se usan difusores de agua (mejor conocido como proceso de extracción suave) los cuales ayudan a que el proceso sea más eficiente, ya que, al

estar las piñas desgarradas, las fibras tienen un área de contacto mayor con el agua. A diferencia del proceso utilizado tradicionalmente, y que se ha explicado en párrafos anteriores, en el proceso de extracción suave el agave se procesa en crudo (no es sometido a cocción), desgarrándose las piñas para así obtener una cantidad considerable de fibras que quedarán expuestas al difusor y extrayendo suavemente mediante agua caliente (no hirviendo) a contracorriente y vapor los carbohidratos de cada una de las fibras. De esta manera el resultado es un jugo alto en azúcares, obteniéndose así 20% más jugo de agave que mediante el método tradicional de hornos. Posteriormente lo obtenido se lleva a autoclaves y trenes de molinos, estos últimos para eliminar el exceso de agua de las fibras (Nájar, Procesos de extracción de azúcar del agave., 2017).

De acuerdo con las investigaciones de Rodrigo Nájar (2017), existen empresas que combinan procesos tanto artesanales como industriales para la extracción de los mostos, reuniendo algunas ventajas y desventajas de cada proceso como son:

Ventajas de proceso de extracción suave:

- Tequila con sabor más fresco y herbal.
- No se amarga el producto final.
- Bagazo con menos residuos de azúcar, lo que ocasiona que sea más eficiente la obtención de los azúcares y además haciendo que el bagazo este más limpio para su posterior implementación en el reciclaje.
- Jugo más homogéneo.
- No hay cocción, presentando un ahorro energético.
- No se someten las fibras de agave a altas presiones.

Desventajas del proceso de tahona:

- Contaminación por bacterias, gases de combustión producto de los tractores (humo combustible), contaminando las notas sensoriales del Tequila.
- Productividad, al quedar más azúcares en el bagazo.

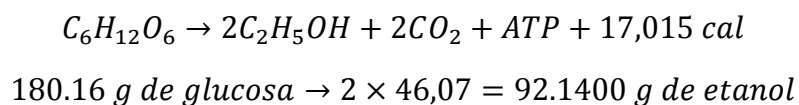
Desventajas del proceso de molinos:

- Obtención de notas amargas en el Tequila, dada la cantidad de presión ejercida sobre el bagazo de Tequila.
- Energía, un tren de molienda necesita de 40% mayor de potencia que la requerida para un difusor.
- Mantenimiento de equipos, puesto que el desgaste del equipo de molinos es mucho mayor que en el difusor, además del que el costo de mantenimiento de los mismos es mayor en comparación al difusor.

Durante la formulación se define el tipo de Tequila (Tequila 100% o Tequila) al cual será destinadas las mieles. Esto es un paso previo a la fermentación en el cual se prepara el mosto fresco a condiciones de temperatura y pH óptimas para la fermentación por levaduras.

En el Tequila, según la NOM-006-SCFI-2012, establece que 49% de los azúcares (en unidades de masa) a ser fermentados pueden provenir de otras fuentes, a diferencia del Tequila 100% cuyos azúcares a ser fermentados provienen del agave. Por lo tanto, para la formulación del Tequila es necesaria la mezcla de los azúcares, como puede ser la adición de glucosa, piloncillo o sacarosa, solo por mencionar algunos de los cuales pueden ser añadidos (Bautista Justo, et al., 2001; CRT, 2019).

Después de este proceso se procede a la fermentación de tipo anaeróbica, cuyo proceso y reacción química, se encuentra simplificado en la Ecuación 1, en el que los mostos son transformados en alcohol etílico y dióxido de carbono, mediante la utilización de levaduras *Saccharomyces cerevisiae*, además de formarse otros compuestos que ayudan a la composición organoléptica que caracteriza al Tequila.



Ecuación 1. Proceso de fermentación (CRT, 2019).

Esta etapa se lleva a cabo en tanques de acero inoxidable, tomando un tiempo aproximado de 24 a 28 horas (Caza Sauza, 2021), hasta que el mosto haya alcanzado una graduación alcohólica de entre 5 y 7 por ciento, dejándose reposar horas antes de la destilación del mismo. Es de vital importancia durante este proceso controlar las condiciones de temperatura (32-35°C), pH (4-5) y nutrientes, para favorecer la fermentación y a su vez evitar la contaminación por patógenos ajenos al proceso (como hongos y bacterias), así como por minerales (calcio y azufre), los cuales pueden inhibir el proceso de fermentación (muerte de las levaduras), afectando así la calidad del Tequila (CRT, 2019). Después de esta etapa, se procede a la destilación del producto, proceso mediante el cual se separan los componentes alcohólicos del mosto, que van desde pequeños residuos no deseados hasta lo esencial que se requiere en el Tequila.

Este proceso se lleva a cabo en dos etapas en alambiques de cobre o en columnas de destilación, aunque existen procesos que se llevan a cabo incluso en tres etapas, tal como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Proceso de destilación de Tequila, mediante la utilización de columna de destilación y alambiques (Cornejo Trujillo, 2017).

Siendo el caso de que se utilicen torres de destilación (proceso de destilación continuo), en éste se circula vapor en contracorriente con los mostos, que son introducidos desde la parte de arriba de la torre de destilación. La acción del vapor es arrastrar el alcohol y de esta manera obtener vapores alcohólicos, que posteriormente serán condensados y enviados a los alambiques (Cornejo Trujillo, 2017).

Los alambiques (o destilación por lotes) tienen la ventaja de que se puede controlar los perfiles sensoriales del Tequila final, mientras que en las torres de destilación solo se obtendrá un producto más neutro, y con perfiles sensoriales menos perceptibles, ya que en estas solo se concentra el alcohol. Durante esta etapa la cantidad de azúcares es mínima, al convertir la mayoría en alcohol, siendo la cantidad de este último compuesto de 4-10% alc. volumétrico aproximadamente (Caza Sauza, 2021).

En la primera etapa o destilación (conocida comúnmente como destrozamiento o agotamiento) que comprende 2 horas aproximadamente, se eliminan componentes no deseados y que además son menos volátiles como residuos de levaduras, sales nutritivas, sólidos, alcoholes no deseados como el metanol, alcoholes superiores y agua. A todo este conjunto de componentes se le conoce como vinazas, las cuales son desechadas y deben de ser tratadas adecuadamente. El producto obtenido en esta etapa se conoce como ordinario, un líquido con una graduación alcohólica aproximadamente de 20%. Alc. Vol. (Cámara Nacional de la Industria del Tequila, 2018).

En la segunda etapa (rectificación o enriquecimiento) se realiza la misma operación, separándose los compuestos más volátiles para obtener un producto más puro, siendo este un líquido transparente y que ya puede ser considerado Tequila Blanco, mismo que puede ser utilizado para madurarse y obtener otras clases de Tequila. Esta etapa puede tardar entre 3 a 4 horas. Durante esta se obtiene un producto con una graduación alcohólica de alrededor de 55% Alc. Vol. (Cámara Nacional de la Industria del Tequila, 2018).

En esta segunda etapa de destilación las sustancias obtenidas se dividen en tres partes:

- **Cabezas o puntas:** conformadas por aldehídos y alcoholes no deseables, los cuales son desechados; dependiendo el proceso se obtienen durante los primeros minutos;
- **Corazón:** se utilizan en la elaboración del Tequila, y puede tener una graduación alcohólica de mínimo de 80% alc. Vol. en un inicio, y poco a poco ir disminuyendo, conforme se va juntando el destilado;
- **Colas:** son recicladas en la segunda etapa o simplemente se desechan, no sin antes darles tratamiento previo, para su correcta disposición. En esta etapa se realiza el corte, una vez que se ha alcanzado el porcentaje de alcohol deseado. De este destilado se obtiene una cantidad mínima de alcoholes que ya no son utilizados en la elaboración del Tequila.

En la Figura 3 se puede apreciar de manera sencilla cómo se obtiene los ordinarios, residuos y Tequila blanco.

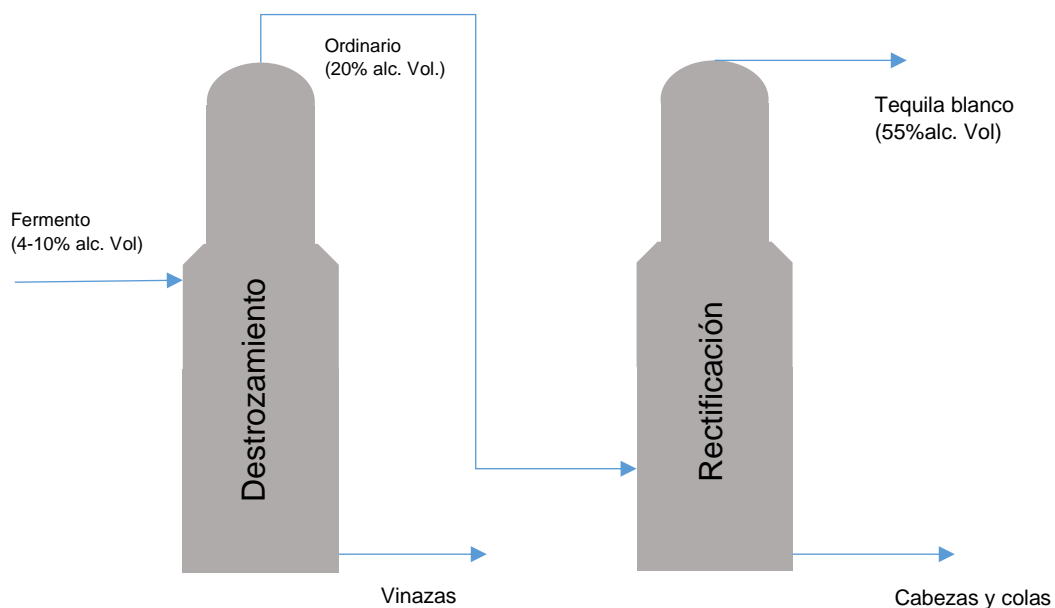


Figura 3. Diagrama simplificado de destilación de Tequila.

En la maduración se obtienen distintas variedades de Tequila mediante el contacto del Tequila previamente destilado con recipientes de roble blanco y encino que, dependiendo del tiempo de maduración se obtiene distintos tipos de reposado que, de acuerdo con la NOM-006-SCFI-2012, se clasifican como se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Tipos de Tequila.

Tipo de Tequila	Tiempo de maduración	Resultado de:
Blanco o plata	<2 meses	Destilación y agua de dilución
Joven u oro		Mezcla de Tequila blanco y Tequilas reposados, añejos y/o extra añejos
Reposado	2 meses	Contenido alcohólico ajustado con agua de dilución.
Añejo	~1 año	
Extra añejo	~3 años mínimo	

Elaboración propia (2018) con datos de CRT, 2018 y CNIT, 2018.

Asimismo, establece que para la elaboración de Tequila de tipo añejo y extra añejo deben de utilizarse únicamente barricas de 600 litros de capacidad máximo.

Dependiendo del tratamiento que reciban dichas barricas (como tostado o quemado), los ciclos de las mismas, la humedad y temperatura ambiental, contenido alcohólico inicial del Tequila y el tiempo, influirán en las distintas propiedades organolépticas del Tequila final.

De acuerdo con el Consejo Regulador del Tequila (2018), “los cambios durante la maduración del Tequila son causados principalmente por:

- 1) Un decremento en los alcoholes superiores los cuales son absorbidos por el carbón de las barricas y ahumando el producto final;
- 2) por extracción de compuestos de la madera mismos que proporcionan el color y el aroma particular a taninos;
- 3) reacción entre algunos componentes del Tequila dando lugar a otros nuevos;
- 4) oxidación de los componentes originales del Tequila y aquellos extraídos de la madera.”

La graduación final del Tequila, sea 100% o no, debe de ser de 35-55% alc. vol. según la NOM-006-SCFI-2012 (Cámara Nacional de la Industria del Tequila, 2018).

En la Figura 4 se muestra el proceso del Tequila simplificado en un diagrama de bloques.



Figura 4. Diagrama de proceso de elaboración de Tequila (Elaboración propia).

1.2. Estadística económica en la producción del Tequila y problemática ambiental.

En palabras de Gallardo Valdez (2019), “el Tequila es una de las bebidas alcohólicas más consumidas a nivel mundial, datos recientes difundidos por el CRT, refieren que la producción de esta bebida ha tenido una tasa de crecimiento anual promedio, en los últimos 20 años (1998-2014), de 4.5%.

En 2016, la producción de Tequila llegó a la cifra de 273.3 millones de litros, siendo éste el mayor volumen alcanzado por la industria, desde que se tiene registro. Este incremento responde a un aumento en el consumo en el ámbito nacional y las exportaciones de esta bebida a 170 países.”

En los últimos diez años (2011-2021), la producción total de Tequila muestra una tendencia de crecimiento positiva. Dicha tendencia se puede ver gráficamente en la Figura 5.

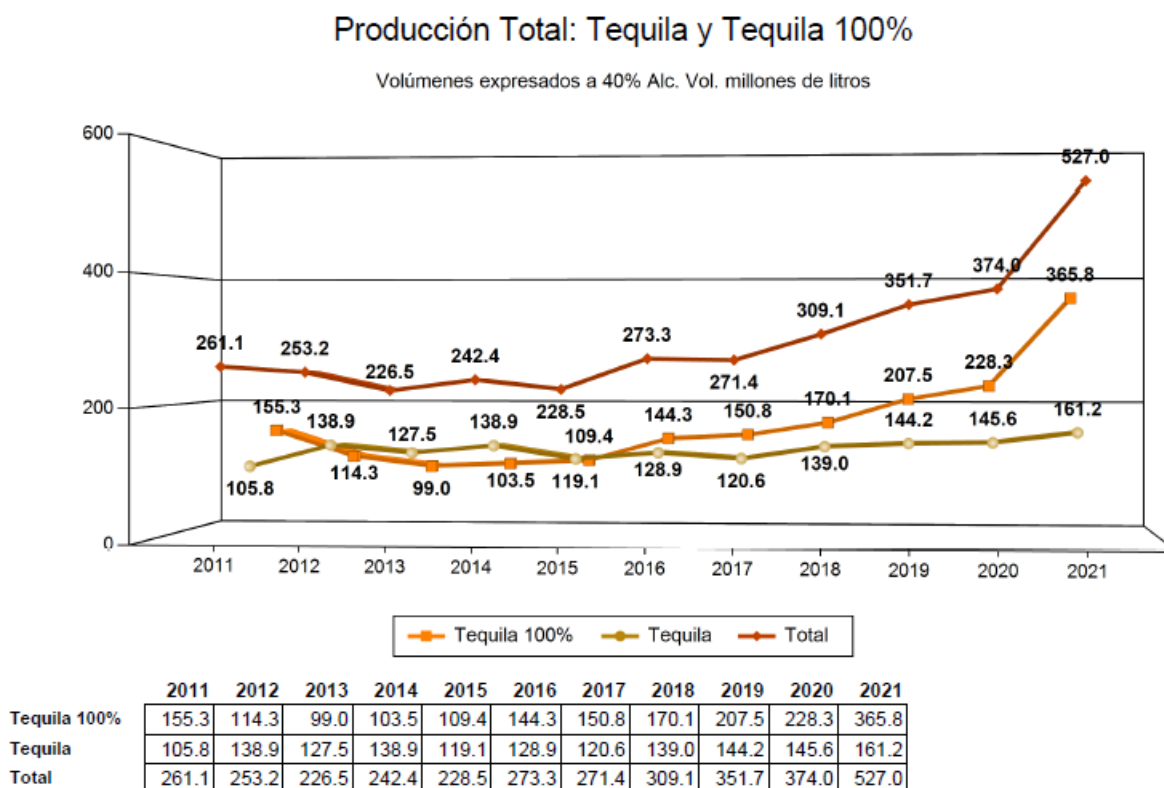


Figura 5. Volumen de producción de Tequila expresado en millones de litros de enero de 2011 a diciembre de 2021 (CRT, 2022).

Datos del 2021 arroja que la industria del Tequila se encontraba conformada por 158 destilerías certificadas por el CRT (115 micros, 15 pequeñas, 10 medianas y 18 grandes), dando empleo a cerca de 13 mil 256 agricultores y sustento a alrededor de 70 mil familias (IIEG, 2021).

Según estadísticas, 49% de la producción total de la industria del Tequila y el Mezcal es destinado a consumo nacional (de esta industria el 87% corresponde a producción de Tequila), mientras que el 51% restante es destinado a exportación. En 2018 se exportaron alrededor de 209 millones de litros de Tequila, lo cual representa 1,582 millones de dólares, de lo cual 78.9% de estas ganancias es representado por lo exportado a Estados Unidos (principal país de los 170 países al cual se exporta el Tequila), dando un total de 165 millones de litros lo cual tiene un valor de 1,087 millones de dólares (INEGI, 2019).

Como se puede observar, los datos reflejan una industria sólida y creciente.

Sin embargo, dada la gran demanda que representa y teniendo en cuenta la cantidad de residuos generados por la industria del tequila en su elaboración, “Es necesario reflexionar sobre la producción de grandes volúmenes de residuos durante el proceso de elaboración de esta bebida, los cuales tienen como destino final el suelo y los cuerpos de agua, considerados como elementos básicos de todo ecosistema.” (Gallardo Valdez, 2019).

En la elaboración de Tequila se genera diferentes residuos. Dos de los principales residuos que generan mayor impacto son el bagazo (residuo sólido obtenido después de extraer el jugo, posterior a la cocción y molienda de las piñas) y las vinazas (residuo líquido con contenido de sólidos, obtenido después de la destilación del Tequila), de los cuales se estima que se producen entre cinco kilogramos de bagazo/base húmeda, y 10 litros de vinazas por cada litro de Tequila producido (Gallardo Valdez, 2019).

En este sentido, la generación del bagazo es un factor de estudio desde hace algunos años, dado que su volumen es muy alto.

“Datos del Consejo Regulador del Tequila (CRT) señalan que, en 2016, se requirió de aproximadamente 942 mil toneladas de agave para la producción del sector, por

lo que la generación de bagazo alcanzó una cifra estimada en 4 millones 709 mil toneladas, monto equivalente a los residuos sólidos urbanos generados en la Zona Metropolitana de Guadalajara, en un día.” (Gallardo Valdez, 2019; Consejo Regulador del Tequila, 2022).

Dado que la industria Tequilera muestra una tendencia al crecimiento, según un estudio de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2017), se espera que para los años 2024 y 2030 se alcance una producción de *Agave tequilana* Weber variedad azul de 1,926.42 de miles de toneladas y 2,120.27 de miles de toneladas respectivamente.

Sin embargo, dada la fecha de corte de esta investigación (2021), el CRT reporta que durante ese año se alcanzó una producción de *Agave tequilana* Weber de 2,018.7 miles de toneladas, lo cual modifica las estadísticas vislumbradas por la SAGARPA.

Dado el poco uso de los residuos, y la enorme cantidad generada de los mismos, es elemental encontrar las posibles opciones para el máximo aprovechamiento, en este caso, del bagazo obtenido en la elaboración de tequila, como materia prima para la generación de otros productos de interés, y solucionar así en medida de lo posible la contaminación originada por dicho residuo, al mismo tiempo que, de esta manera, ayudar y aportar en la transformación de la economía lineal imperante en el país, hacia una economía circular en México, con respecto a la industria tequilera se refiere.

1.3. Economía circular.

Desde los años noventa se han propuesto diferentes alternativas que impulsen el desarrollo y transición a sistemas socio técnicos más sostenibles; estos incluyen desafíos económicos e incertidumbre entre pequeñas y grandes empresas a fin de sustentar las necesidades de una población mundial constantemente en crecimiento a presión de materia prima y recursos limitados, dada la pérdida de biodiversidad y problemas sociales como las altas tasas de desempleo en ciertas zonas del mundo y las malas condiciones laborales. Lo anterior mencionado se debe a un modelo económico lineal de “extraer, tomar, hacer, usar y desechar” el cual, por mucho ha sobrepasado la medida de lo sostenible a futuro (Okorie et al, 2018).

La insostenibilidad de la economía lineal impulso el desarrollo e implementación de la Economía Circular (EC) como un modelo alternativo de recursos donde el crecimiento económico se desvincula del consumo de recursos vírgenes (Kirchherr et al, 2017).

Dado que no existe una definición comúnmente aceptada, existen diferentes conceptos en cuanto a lo que es la economía circular, aunque la más aceptada proviene de la Fundación Ellen MacArthur, la cual define a la Economía Circular (EC) como “un sistema industrial restaurativo o regenerativo por intención y por diseño que propone rediseñar productos, modelos de negocio y patrones de producción de tal forma que se eliminen todos los residuos (enfoque cero residuos) de manera sistemática” (INECC, 2022).

La EC es “un sistema económico que representa un cambio de paradigma en la forma en que la sociedad humana se interrelaciona con la naturaleza y tiene como objetivo prevenir el agotamiento de los recursos, cerrar los ciclos energéticos y materiales, y facilitar el desarrollo sostenible” (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Es así que la EC de acuerdo a la Fundación Ellen MacArthur se basa en tres principios fundamentales:

1. Eliminar residuos y contaminación desde el diseño.
2. Mantener productos y materiales en uso.
3. Regenerar sistemas naturales.

La EC ha ganado importancia entre los grupos académicos, políticos e industriales, identificando errores y correcciones en la sostenibilidad, de la misma manera desarrollando proyectos de investigación para aplicar enfoques de reutilización y reintegración incluyendo procesos de fabricación y la Industria 4.0 que, con datos, está permitiendo avances en tecnologías digitales (Okorie et al., 2018). Así mismo, es de vital importancia implementar hojas de ruta para establecer las metas a corto y largo plazo, aunque en México es a partir del 2019 cuando se empezó a establecer esta hoja de ruta para una transición hacia una economía circular.

En la siguiente figura se esquematiza la diferencia entre los modelos de economía lineal y circular:

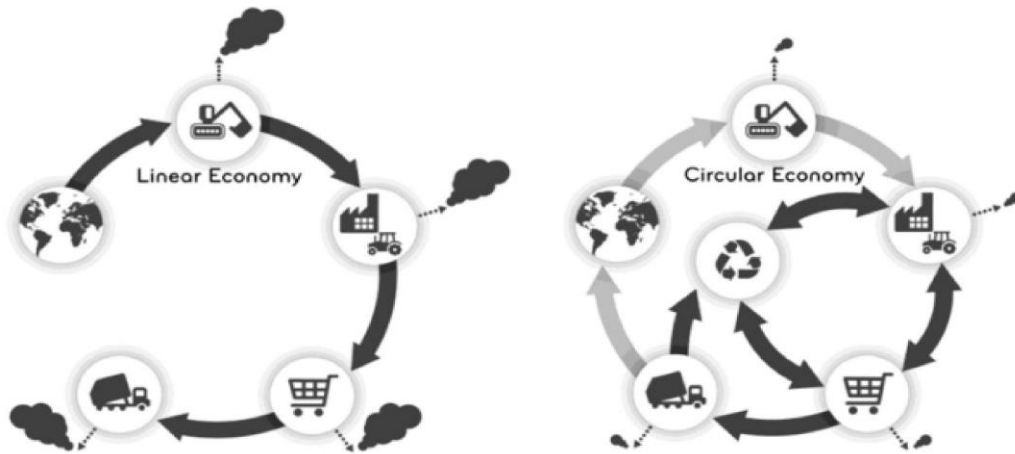


Figura 6. Esquema general de economía lineal y circular (Sauvé et al, 2016).

En la Figura 6 el concepto de economía lineal indica un ciclo incompleto donde se proporcionan los recursos vírgenes extraídos y se reciben los desechos después de que se han utilizado los recursos, como un producto final y de desecho, eliminándolo así en vertederos. El concepto de EC mantiene el producto en uso el mayor tiempo posible y se recicla al final de su vida, optimizándose el uso de los recursos vírgenes, haciendo que estos se encuentren dentro del ciclo durante la mayor cantidad de tiempo, mediante el concepto del reciclaje, la reutilización, el reuso y la recuperación.

Además, en una economía de tipo lineal los residuos se manejan como productos finales y no reaprovechables en las cuales se utilizan fuentes no renovables, ocasionando al mismo tiempo altas emisiones a la atmosfera a diferencia de un sistema circular en el que se obtiene energía de fuentes renovables y se aprovechan residuos en la elaboración de biogás y otros nutrientes como se muestra en la siguiente figura:



Figura 7. Ejemplos de diferencias entre economía lineal y circular en la que los desechos son reaprovechados (INECC, 2022).

Con lo anterior mencionado, al encontrar una economía en constante crecimiento, en materia prima, producto terminado y desechos como el bagazo de tequila es imprescindible el análisis de las posibilidades y el escalamiento en desarrollo y producción de productos.

Al implementar una economía circular se obtiene grandes beneficios de acuerdo con Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), como son:

Ventajas económicas:

- Ahorros netos de costes de materias primas.
- Creación de valor.
- Creación de empleo.
- Innovación.
- Incremento de la productividad y de la competitividad.
- Generación de beneficios (ganancias).
- Reducción de la volatilidad y aumento de la seguridad de los suministros.
- Generación de demanda de nuevos servicios empresariales.
- Estímulo de mayor interacción con los clientes.

Ventajas ambientales:

- Prevención de riesgos y gestión equilibrada de recursos naturales.
- Reducción de emisiones de GEI.
- Reducción del consumo de materias primas.
- Mejora de la productividad y de la calidad del suelo.
- Reducción de externalidades negativas.

Ventajas sociales:

- Incremento de la renta disponible.
- Aumento de la calidad y reducción del precio de productos y servicios.
- Reducción de la obsolescencia.
- Mejoras en prevención, seguridad y salud ambiental.

Dado que la economía circular va de la mano con el concepto de sustentabilidad, es importante mencionar los esfuerzos que se están haciendo actualmente en torno al tema de la cadena agave-tequila. Tal es el caso de los esfuerzos realizados hasta el momento por el CRT en coordinación con el Centro Mario Molina para desarrollar una estrategia y una hoja de ruta hacia una economía sustentable en la que se buscan beneficios ambientales, económicos y sociales en toda la cadena (Consejo Regulador del Tequila y Centro Mario Molina, 2016).

Dentro de esta estrategia para el aprovechamiento de la cadena agave-Tequila en torno al aprovechamiento del bagazo se encuentra el uso del mismo en composta (para enriquecimiento de las tierras, así como la disminución en la utilización de agroquímicos los cuales producen una alta huella de carbono), calderas de biomasa y la producción de carbón.

Las vinazas están siendo actualmente aprovechadas en la generación de biogás y como parte de la composta; además, se propone incrementar el uso de material reciclado en empaques utilizados por la misma industria tequilera.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general.

Con base en el estado del arte actual, mediante la obtención de información, analizar la viabilidad de obtención de productos de interés a partir del bagazo generado en la industria tequilera y, de esta manera, impulsar la economía circular de México.

2.2. Objetivos particulares.

- Recopilar información actualizada mediante la búsqueda en artículos científicos, tesis, patentes y fuentes confiables sobre la producción, tratamiento, utilización y obtención de subproductos del bagazo generado por la industria tequilera en México, a través del estado del arte para determinar los caminos viables y sustentables en la obtención de productos de interés.
- Analizar la información recuperada que permita tener un panorama real y confiable sobre el bagazo de Tequila y su impacto, útil para la toma de decisiones.
- Con la información recuperada para la toma de decisiones encontrar un camino viable y sustentable, tomando en cuenta un modelo de economía circular, que permita obtener mediante el tratamiento del bagazo del Tequila, uno o varios productos que sean del interés en diversas industrias y en beneficio del tratamiento de los residuos para la industria Tequilera.

3. METODOLOGÍA

Como primera instancia, se procedió a analizar el estado de arte, revisando mediante el sistema de Scopus los artículos en cuyo contenido se encontraron las palabras *Tequila bagasse*. Con esta búsqueda se encontraron 34 artículos, los cuales comprenden desde el año 2001 hasta el 2018. Para fines de este proyecto se dará más relevancia a los artículos cuya fecha de publicación sea a partir de 2008.

Teniendo estos resultados, se hizo una búsqueda más refinada, ya que el Tequila procede de la especie de agave, *Agave tequilana* Weber variedad azul, por lo mismo, se buscaron artículos con el criterio de *agave Tequilana bagasse*, encontrándose así 22 nuevos artículos.

Se procedió a clasificar los artículos por temas mediante la lectura del *abstract*.

Para el caso de *Tequila bagasse* se obtuvieron los siguientes temas:

- Biocombustibles (10)
- Composta (10)
- Fibras (4)
- Plásticos (1)
- Alimentos (2)
- Obtención de gas hidrógeno y metano (1)
- Caracterización (2)
- Alternativas varias (4)

Para el caso de *agave Tequilana bagasse*:

- Biocombustibles (7)
- Energía (1)
- Fibras (1)
- Películas plásticas (3)
- Alternativas varias (4)
- Lignocelulosa (2)
- Obtención de gas hidrógeno y metano (3)
- Caracterización (1)

Asimismo, se clasificaron en subtemas encontrándose artículos en cuyo contenido se encuentran temas como:

Digestión anaerobia, biotecnología, bioetanol, eficiencia de energía, composición y análisis químico, modelos cinéticos, hidrólisis enzimática, biomasa de lignocelulosa, producción de ácido succínico, solo por mencionar algunos.

Se eliminaron los artículos destinados únicamente a composta y alimentación de rumiantes, ya que, aunque representan una opción sustentable para la utilización del bagazo, no es una opción en cuanto a la obtención de productos económicamente atractivos.

Teniendo en cuenta que la industria tequilera no es la única que presenta problemas con el bagazo, se procedió a hacer una búsqueda adicional para bagazo de caña, dado los casos de éxito que se han reportado. Debido a que en este tema abundan los artículos, se filtró la búsqueda mediante las referencias de los artículos encontrados para el caso de Tequila, para encontrar artículos referentes al bagazo de caña, ya que la composición de esta es similar a la del bagazo de Tequila. De esta manera se busca que tratamientos dados al bagazo de caña, puedan ser aplicables al bagazo de Tequila. Sobre todo, se buscaron referencias cruzadas solo de aquellos artículos cuyo contenido permita la obtención de algún(os) producto(s) de interés comercial.

De este modo se encontraron 29 artículos referentes al tratamiento de bagazo de caña. Estos también fueron clasificados por subtemas, mediante la lectura del *abstract* y palabras clave.

De la literatura encontrada se buscaron adicionalmente, los índices de impacto (SNIP; SJR, Field Weighted Citation Impact, etc.) sobre todo para conocer cuáles artículos tienen más relevancia que otros y sirvieron como fuente para la realización de otros artículos relacionados. Además, dichos impactos son de utilidad cuando la fuente a pesar de ser antigua, tiene alta relevancia.

Por otro lado, se realizó también la búsqueda de patentes mediante el sistema de *Scopus*, encontrándose así 19 patentes referentes a la búsqueda *agave Tequilana bagasse* entre las cuales se hace mención de métodos y procesos para obtener

etanol, bioplásticos, tratamiento de lignocelulosa y producción de algunos compuestos provenientes del bagazo y hojas de *Agave tequilana* Weber.

Mediante el Banco de tesis de la UNAM, se hizo búsqueda sobre las investigaciones hechas en torno al tema, encontrándose para el caso de “*bagazo de agave*” siete tesis referentes al tema. También se hizo búsqueda para “*agave Tequilana*”, y “*bagazo de caña*” como referencia cruzada dado los casos de éxito para el tratamiento de este material.

De los artículos, patentes, y tesis encontradas para el presente trabajo se definieron los documentos de mayor interés, con el fin de crear así una base de fácil acceso a los mismos y proceder de mejor manera a analizar las posibles soluciones que se le puede dar al bagazo de Tequila, pero sobre todo para obtener uno o varios productos de interés comercial.

Además, también se hizo consulta de páginas de internet buscando que tuviera información confiable para fines de esta investigación.

Mediante la lectura de artículos, visita a conferencias y asesoramiento, se buscó la manera más viable en el tratamiento del bagazo de Tequila. Teniendo en cuenta esto, se dejaron de lado temas como la producción de hidrogeno, metano y etanol, ya que, a pesar de ser una buena opción, aún hay una alta competencia por parte de la industria de hidrocarburos.

Para inicio en el análisis de los artículos, se buscó cuál era la composición química del bagazo de Tequila, para así saber de qué manera tratarlo. Posteriormente se procedió a buscar información sobre los posibles pretratamientos de la lignocelulosa, para conocer cuál es la manera más adecuada de tratar dichos residuos. Encontrando la información pertinente en tesis y artículos, se realizó la redacción para el capítulo de pretratamientos.

Gracias a la conferencia impartida por la Dra. Michelena Álvarez del ICIDCA (Facultad de Química, 15 de octubre de 2018) se hizo además la búsqueda para conocer los avances que se tienen en Cuba para el caso de bagazo de caña, ya que tanto el bagazo de Tequila como el de caña presentan composiciones químicas semejantes.

Tomando en cuenta los pretratamientos y estudios que vislumbran al futuro exitoso de ciertos productos, se procedió a investigar de manera profunda y específica, casos como la obtención de azúcares reductores, como procedimiento importante al ser predecesor para la obtención de cualquier producto de interés posterior; producción de xilitol; ácido succínico (el cual representa un caso de éxito en países como Canadá, tal es el caso de la empresa Succinity); etanol, aunque éste en menor medida, debido a que es un intermediario en la producción del xilitol, aunque no menos importante; enzimas; así como de polímeros biodegradables dado su alto impacto actual, como son ácido láctico como predecesor de ácido poliláctico (PLA) y Polihidroxicanoatos (PHAs).

Dado la pandemia ocasionada por COVID 19 y la desaceleración de información, se procedió a realizar una nueva búsqueda de información, tomado en cuenta lo publicado hasta 2022.

Es así como se encontraron 16 artículos nuevos para la búsqueda “agave Tequilana bagasse”. Dentro de los cuales se encuentran temas tales como tipo de tratamientos, obtención de azúcares reductores, metano, hidrogeno y producción de compositos.

Por último, se consideró la información recopilada, se procedió a redactar conclusiones y recomendaciones.

En la Figura 8 se muestra de manera simplificada la metodología seguida.

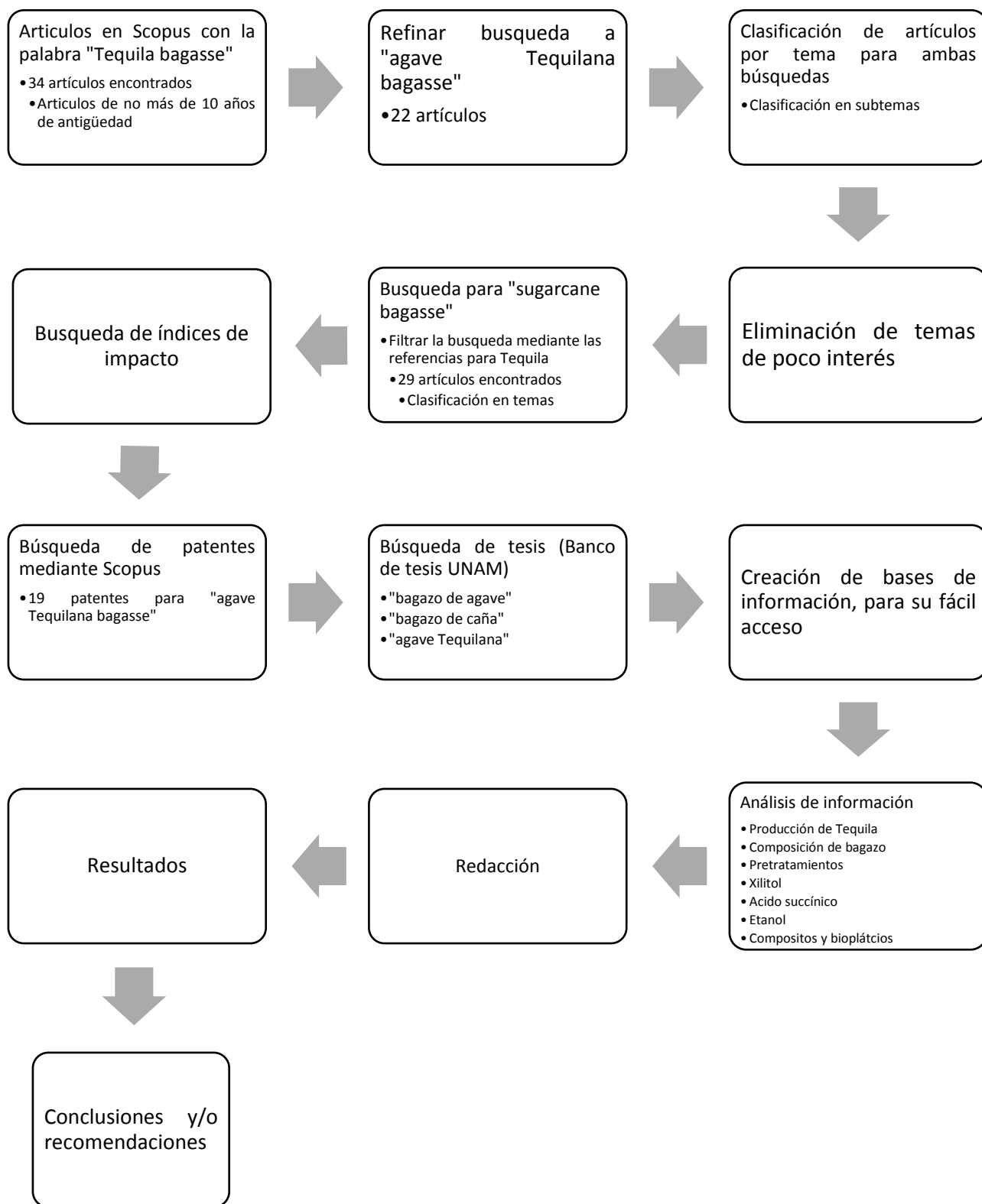


Figura 8. Diagrama de bloques de la metodología empleada (Elaboración propia).

4. RESULTADOS

4.1. Composición del bagazo del Tequila y pretratamientos de lignocelulosa.

El bagazo de Tequila principalmente se compone de lignocelulosa, una macromolécula compuesta a su vez de celulosa, hemicelulosa y lignina. De acuerdo a diversas investigaciones se concluye que la proporción de estas moléculas en valores promedio para el bagazo de agave tequilero son:

- Celulosa (43% base seca)
- Hemicelulosa (19% base seca)
- Lignina (15% base seca)

Derivado de la investigación publicada por José A. Pérez Pimienta (2017), en la Tabla 2 se muestra un resumen de la composición de la lignocelulosa, tanto para las hojas, como para el bagazo de *Agave tequilana* Weber variedad azul:

Tabla 2. Composición de la lignocelulosa en porcentaje en peso húmedo (wet weight por sus siglas en inglés).

	Celulosa (w/w%)	Hemicelulosa (w/w%)	Lignina (w/w%)
Bagazo	26-46	15-23	13-20
Hojas	34-55	9-15	12-16

Elaboración propia con datos de Pérez Pimienta et al, 2017.

Esta composición cambia de acuerdo a condiciones ambientales del origen de la biomasa, tamaño de partícula, extracción, procedimiento de post-cosecha y condiciones de proceso en la elaboración del Tequila sobre todo en la etapa de cocción, por lo que es de suma importancia caracterizar dicha biomasa antes de iniciar cualquier proceso de transformación del bagazo en productos de interés.

En palabras de Gallardo Valdez (2019): “esta composición le atribuye un enorme potencial para diversos usos”.

Sin embargo, el bagazo residual obtenido no puede utilizarse tal cual se obtiene al final del proceso de elaboración del Tequila, ya que este posee humedad que evita utilizarlo de manera eficiente, por lo que tiene que someterse a otros procesos para obtener productos de mayor interés. En general los pasos seguidos en dicho procesamiento, de acuerdo a Echeverría Arjonilla (2013), para obtener fibras adecuadas para su utilización son:

- Triturado y/o despulpado
- Lavado
- Secado
- Molido
- Tamizado

Para que el tratamiento del material lignocelulósico sea eficiente, debe incluir la reducción del contenido de lignina, decrecimiento de la fase cristalina de la celulosa e incremento del área superficial para permitir las reacciones enzimáticas correspondientes (Saucedo Luna et al., 2011).

A continuación, se hablará de manera más detallada sobre los componentes de la lignocelulosa.

4.1.1. Celulosa.

La celulosa es un biopolímero con peso molecular variable, cuya fórmula es $(C_6H_{10}O_5)_n$ en la cual n puede ser de mínimo 200 (Cortínez Villalobos, 2010). Se encuentra conformado exclusivamente de moléculas de β -glucosa (homopolímero lineal), los cuales se unen mediante enlaces glucosídicos β -(1,4) y formando unidades repetitivas de celobiosa (Figura 9). Este polímero contiene en su composición zonas cristalinas muy ordenadas (existen puentes de hidrogeno que le da esa propiedad), las cuales hacen que presente resistencia a la hidrólisis, pero además cuenta con zonas amorfas, las cuales pueden ser hidrolizadas fácilmente (Zavalza Navarrete, 2013). Se estima que la celulosa se conforma por 85% regiones cristalinas y 15% regiones amorfas (Quintana Vega, 2012). Dado que la celulosa se encuentra presente en la composición de todas las plantas, hace de este compuesto uno de los más abundantes del planeta Tierra.

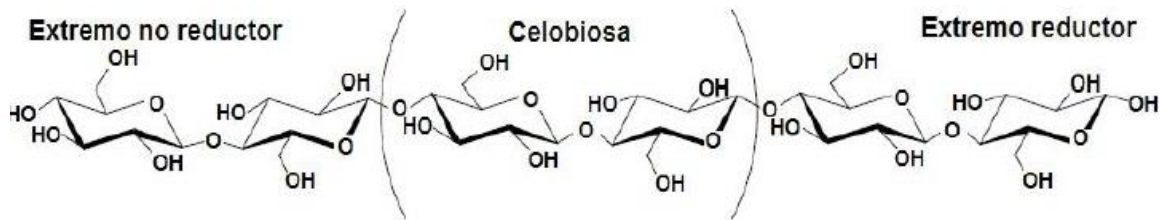


Figura 9. Estructura de primaria de la celulosa (Vázquez Bolaños, 2012).

4.1.2. Hemicelulosa.

Las hemicelulosas (Figura 10) son heteropolisacáridos, es decir, están conformadas por diferentes tipos de monómeros tales como: pentosas (xilosa y arabinosa), hexosas (glucosa, manosa y galactosa), y ácidos urónicos (ácido glucurónico). Este polímero contiene ramificaciones con cadenas lineales cortas de azúcares diferentes proporcionándole una estructura amorfa y por lo tanto haciéndola fácilmente hidrolizable a comparación de la celulosa (Zavalza Navarrete, 2013).

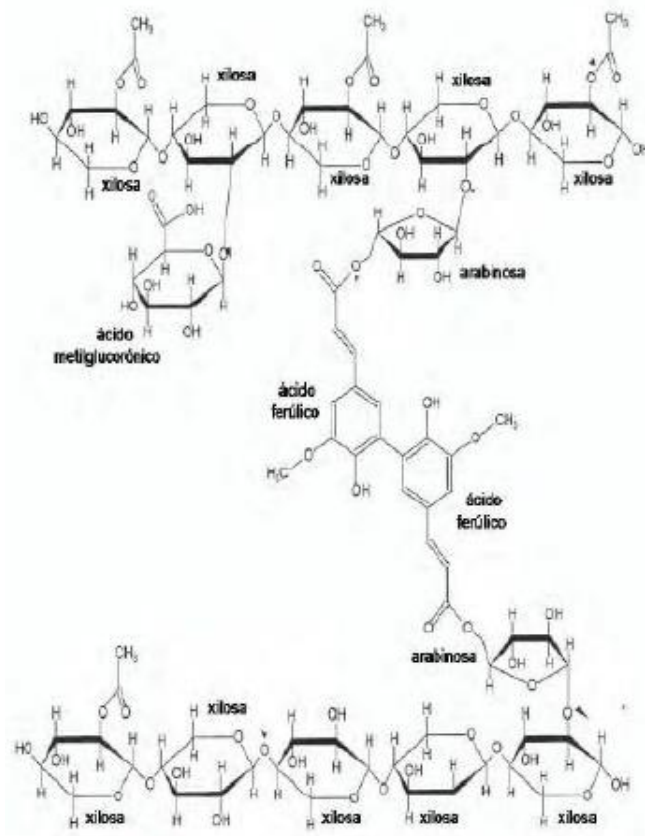


Figura 10. Estructura de la hemicelulosa (Zavalza Navarrete, 2013).

4.1.3. Lignina.

La lignina es una red heteropolimérica ramificada, amorfa y tridimensional que consiste de tres diferentes unidades fenilpropano-monoméricas (alcoholes aromáticos): p-coumaril, coniferil y alcohol sinapílico, unidos por diferentes tipos de enlaces (Zavalza Navarrete, 2013; Quintana Vega, 2012). Este polímero es insoluble en agua y ópticamente inactivo, haciendo de este un polímero recalcitrante, es decir, de difícil de degradación (Howard et al., 2003). En la Figura 11 se muestra una forma general estructural de la lignina, sin embargo, esto solo representa una propuesta, dado que tiene formas diferentes estructurales y heterogeneidad variable. El principal propósito de la lignina es dar soporte estructural a la planta, impermeabilidad, resistencia a ataques microbianos y estrés oxidativo (Escalera Martínez, 2015).

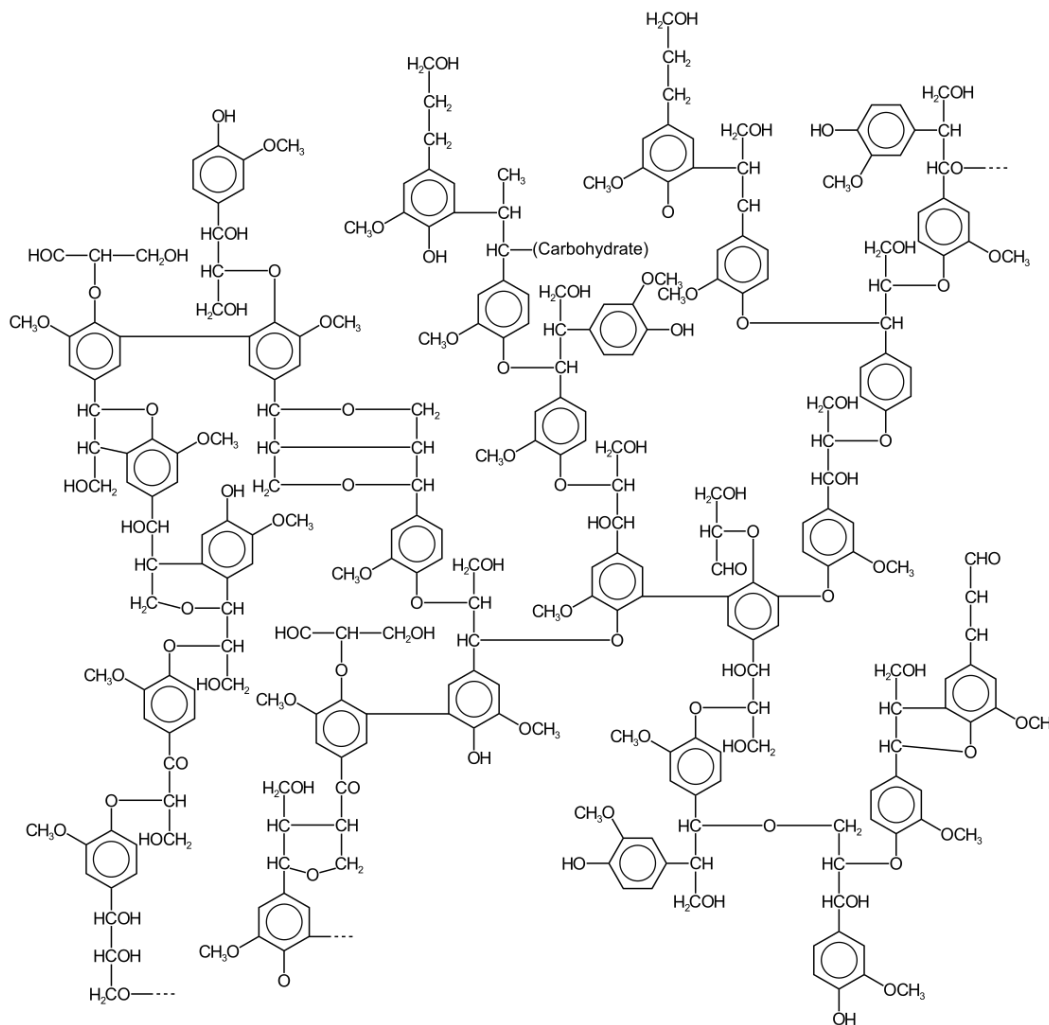


Figura 11. Estructura de la lignina (Escalera Martínez, 2015).

4.2. Consideraciones para el procesamiento de lignocelulosa.

Sin embargo, hay varios retos que hay que superar para el uso potencial e ideal de lignocelulosa como fuente para la producción de productos económicamente atractivos, entre ellos:

- El tratamiento previo para la bioconversión de lignocelulosa (Figura 12), dependiendo de lo que se busque obtener, debe de permitir altos rendimientos y recuperación de azúcares después de la sacarificación enzimática, así como los productos de degradación de la lignina;
- La producción de enzimas (utilizadas en la destrucción de polímeros complejos presentes en los materiales lignocelulósicos), considerando que, dentro del procesamiento de la biomasa, representa una de las etapas más costosas, estimándose que representa el 50% del costo total del proceso de hidrólisis (Howard et al., 2003);
- Los costos de capital y operación asociados al proceso de bioconversión, así como la demanda de energía, lo cual en su conjunto genera un alto costo con respecto a lo convencional (materias obtenidas mediante procesos convencionalmente utilizados). En cambio, el costo puede verse minimizado por la materia prima proveniente del desecho del Tequila. Esto dará pauta a reducir los costos de los productos finales, y;
- Así mismo se deben de buscar procesos cuya producción de efluentes sea mínima.

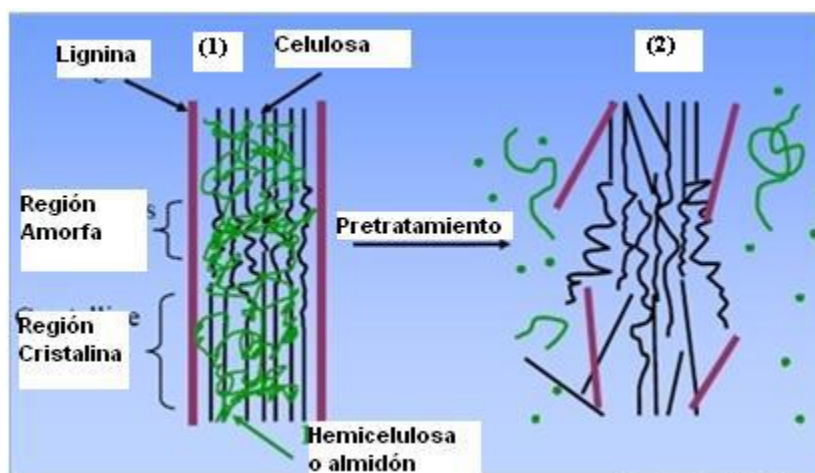


Figura 12. Composición y efectos del tratamiento de lignocelulosa (Cortínez Villalobos, 2010).

De acuerdo con Howard et al., 2003, la tecnología de bioprocesamiento de materias primas o sus componentes en bioproductos implica tres pasos:

- Diseño de procesos
- Optimización de sistemas
- Desarrollo de modelos.

El procesamiento implica el uso de biocatalizadores, microorganismos completos o sus enzimas o enzimas de otros organismos para sintetizar o bioconvertir materias primas en nuevos productos; recuperar/purificar tales bioproductos y, posteriormente, cualquier modificación posterior necesaria.

Las bioconversiones de materiales lignocelulósicos a productos útiles de mayor valor normalmente requieren procesos de varios pasos, como se puede apreciar en la Figura 13, que incluyen:

1. Pretratamiento: mecánico y/o físico, químico, biológico y fisicoquímico;
2. Hidrólisis de los polímeros: para producir moléculas fácilmente metabolizables (por ejemplo, azúcares de hexosa o de pentosa)
3. Bioutilización de estas moléculas para apoyar el crecimiento microbiano o para producir productos químicos, y;
4. Separación y purificación.

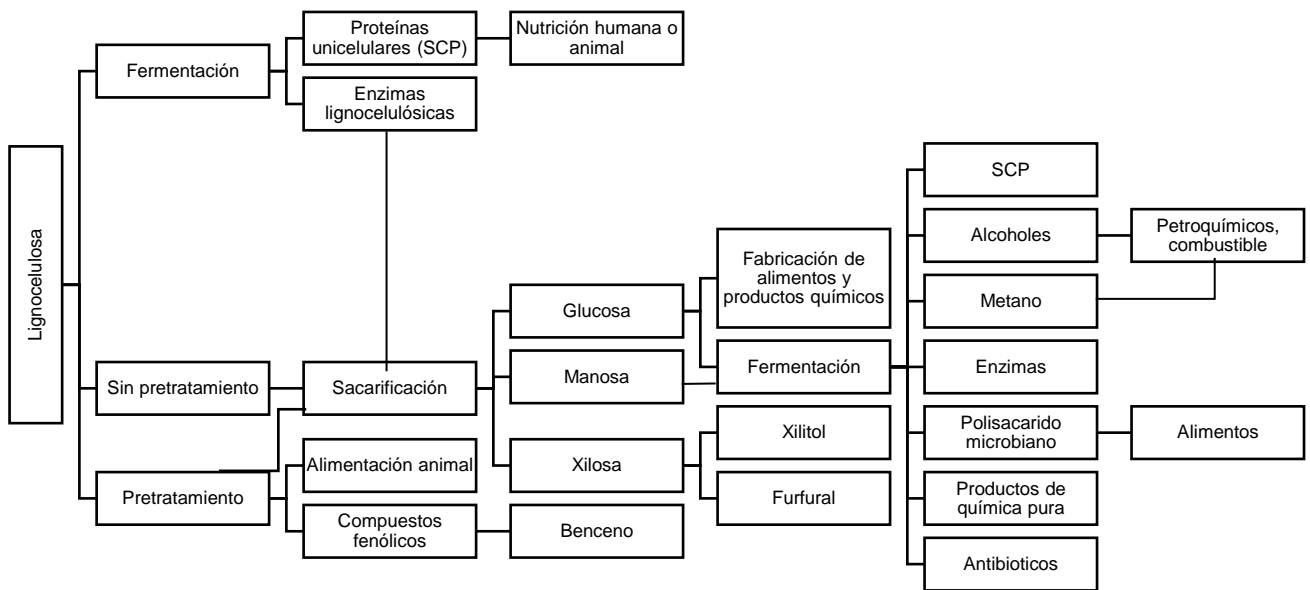


Figura 13. Etapas de proceso generalizado para la bioconversión de lignocelulosa en productos de valor agregado, adaptado de (Howard et al., 2003).

El pretratamiento tiene como finalidad descomponer a la biomasa de lignocelulosa en los compuestos que la conforman (Figura 12), facilitando así, en palabras de Vyas, P. et al., 2018:

- a) “El aumento a la accesibilidad de la enzima a la celulosa y promover la descristalización de la celulosa;
- b) Desnaturalización de celulosa y hemicelulosa;
- c) Solubilización de hemicelulosa y lignina;
- d) Modificación estructural de la digestibilidad enzimática de la lignina;
- e) Digestibilidad enzimática de la celulosa y hemicelulosa preparadas, para su posterior hidrólisis;
- f) Minimización de la pérdida de azúcares;
- g) Evitar la degradación;
- h) Evitar la formación de subproductos inhibidores para procesos posteriores;
- i) Minimizar los costos de inversión y procesamiento.”

Los métodos de pretratamiento deben de permitir proteger la porción de hemicelulosa y celulosa contenida en la biomasa, al mismo tiempo que se disminuye la barrera que genera la lignina entre la hemicelulosa y la celulosa, removiéndola, pero sin eliminarla, ya que este compuesto es clave en la formación de otros productos de interés, como los de tipo aromático.

Los métodos de pretratamiento se clasifican en físicos, químicos, biológicos y fisicoquímicos.

4.3. Pretratamientos, efectos sobre el material lignocelulósico y condiciones de proceso.

Los pasos ideales en el pretratamiento de biomasa se pueden enumerar en tres etapas importantes:

- Desplazar y/o remover el revestimiento de lignina.
- Dejar al descubierto y/o remover la hemicelulosa.
- Reducir y/o eliminar la cristalinidad de la fracción de celulosa.

Esto se puede mejorar combinado algunos de los pretratamientos que se describirán a continuación, aunque en algunos tratamientos con la utilización de alguno, ya se pueden obtener rendimientos considerables, según lo que se busque obtener. La segunda etapa es esencial, para reducir los tiempos y las cargas de enzimas a utilizar para realizar una hidrólisis eficiente (Cortínez Villalobos, 2010).

4.3.1. Pretratamientos químicos.

Algunas desventajas de este tipo de métodos son la obtención de productos intermedios tóxicos, la pérdida de polímeros de carbohidratos y el alto costo del tratamiento. (Shuang Qi, Ren Yong, & Zhi Cheng, 2018).

- **Hidrólisis ácida (diluido).**

Se utiliza muy comúnmente como un tratamiento previo a la hidrólisis enzimática. Este tratamiento permite la hidrólisis de la celulosa a altas tasas de reacción (como en el caso de la utilización de H_2SO_4) y a temperaturas moderadas el rendimiento en la sacarificación es bajo (rompimiento de carbohidratos complejos en monosacáridos). A altas temperaturas se ve favorecido la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa obteniéndose así rendimientos de alrededor del 80% para esta última.

La lignina no se solubiliza, pero permite los rendimientos para la hidrólisis enzimática.

De acuerdo a la información recopilada por Cortínez Villalobos (2010), y las investigaciones de Sun y Cheng (2002), comúnmente se utilizan dos tipos de hidrólisis con ácido diluido: a altas y a bajas temperaturas. A altas temperaturas (160-200°C) se utilizan bajas cargas de sólidos (5-10% sustrato/peso mezcla), a bajas temperaturas (120-160°C) se utilizan altas cargas de sólidos (10-40% sustrato/peso mezcla).

Por lo general se utilizan ácidos como sulfúrico (H_2SO_4), clorhídrico (HCl), nítrico (HNO_3), fosfórico, fórmico, acético a una dilución entre 1-5% según estudios previos en otras materias lignocelulósicas según afirma Cortínez Villalobos (2010).

Algunas variables que se tienen que tener bajo control son la temperatura, el tiempo de reacción, la concentración y la razón sólido/líquido (p/v). Para dichos fines se recomienda hacer uso de reactores flujo pistón, reactores de percolación, reactores progresivos batch/percolación, reactores contra y co-corriente (Cortínez Villalobos, 2010).

Este tratamiento además es económicamente favorable en la obtención de xilano a xilosa obteniéndose altas conversiones.

- **Hidrólisis con ácido concentrado.**

Se utilizan ácidos como H_2SO_4 o HCl a concentraciones entre 10-30% y temperaturas entre 170-190°C. Se pueden obtener rendimientos de hidrólisis de alrededor de 90% para obtención de glucosa (Zavalza Navarrete, 2013).

Sin embargo, al ser procesos más tóxicos, corrosivos y peligrosos se deben de utilizar reactores que resistan dichas condiciones.

En el tratamiento con ácido se debe de neutralizar el pH para su utilización posterior en hidrólisis enzimática, encontrándose como una de las principales desventajas de este proceso, aumentando directamente el costo del mismo (Cortínez Villalobos, 2010), a su vez si el proceso lo permite, se debe de recuperar el ácido o recircular al proceso, para hacerlo más factible económicamente.

- **Hidrólisis básica o alcalina.**

El efecto de este método depende del contenido de lignina del material lignocelulósico (Sun y Cheng, 2002). Se recomienda la utilización de soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) o Carbonato de sodio al 2-5% p/v a temperaturas de 120°C por periodos de 90 minutos; el tratamiento con amoníaco usualmente se usa para remover lignina. También se puede hacer uso de hidróxido de potasio (KOH) El principio de este tratamiento se basa en la saponificación de los enlaces de éster entre los xilanos que conforman la hemicelulosa permitiendo así el aumento del área superficial de la hemicelulosa, producto del hinchamiento de la biomasa y a su vez el aumento de sitios de reacción para una hidrólisis enzimática adicional; y/o entre la lignina y componentes de la hemicelulosa, provocando una disminución del grado de polimerización y la cristalinidad de la lignina (Cortínez Villalobos, 2010), a su vez que se produce ruptura entre las uniones de la lignina y carbohidratos (Zavalza Navarrete, 2013).

Entre algunas desventajas de este método se encuentra la formación de sales.

- **Ozonólisis.**

Procedimiento que se utiliza para degradar la lignina y hemicelulosa. Como ventajas de este método se tiene: 1) remoción efectiva de lignina; 2) no produce residuos tóxicos aguas abajo, como son algunos de los productos obtenidos tales como ácidos carboxílicos (ácido fórmico, acético oxálico, y otros dicarboxílicos); 3) la reacción puede ser llevada a presión y temperatura ambiente, lo cual ayuda a que los costos de energía y capital, puedan ser reducidos; 4) Los fragmentos de degradación son biodegradables;

Dentro de las desventajas se puede mencionar que el proceso necesita una gran cantidad de ozono lo que hace aumentar los costos del mismo (Sun y Cheng, 2002; Vidal y Molinier, 1988). Este último es una variable a controlar dentro del proceso. De acuerdo con Neely mencionado por Vidal y Molinier, recomienda que el consumo de ozono debe de estar entre un rango de 4 a 6% por peso de material seco para que sea una reacción más costo efectiva. El ozono puede ser fácilmente descompuesto en reactores de lecho catalítico o aumentando la temperatura del mismo y de esta manera hacer de este proceso más amigable al ambiente, ya que el ozono representa un gas de efecto invernadero.

En este proceso se hace uso de agua en la alimentación, una variable a controlar, puesto que diluciones menores ocasiona que la cantidad de ozono sea mayor y por lo tanto menos rentable, por lo mismo se recomienda el uso de 30% de agua para que sea económicamente viable (Vidal y Molinier, 1988).

- **Deslignificación oxidativa.**

Biodegrada la lignina en presencia de peroxidasa y H_2O_2 al 2%, a una temperatura de 20°C por 8 horas. Para bagazo de caña estas condiciones permiten la degradación del 50% de la lignina y la mayor parte de la hemicelulosa es solubilizada. En dicho estudio se obtuvo una eficiencia del 95% para la conversión de celulosa a glucosa, con un tratamiento enzimático posterior con celulasa a $T=45^\circ C$ durante 24h (Sun y Cheng, 2002). En otro estudio realizado sobre trigo y utilizando las mismas condiciones, se obtuvo una conversión de 85% de celulosa a glucosa, utilizando como método posterior una hidrólisis enzimática (Cortínez Villalobos, 2010).

- **Proceso Organosolv.**

Procedimiento para romper la pared de lignina y los enlaces de hemicelulosa. Se utilizan como disolventes orgánicos: metanol, glicerol, acetona, etileno, etilenglicol, trietilenglicol y alcohol tetrahidrofurfuril mezclado con ácidos inorgánicos como HCl o H_2SO_4 . A temperaturas arriba de 185°C la adición de un catalizador no es necesaria para la deslignificación. En caso de temperaturas más bajas, se puede utilizar como catalizadores ácidos orgánicos como el oxálico, acetilsalicílico y salicílico.

Por lo general se obtienen rendimientos altos para la producción de xilosa agregando ácido, lo que hace que este proceso sea costoso, por lo mismo se recomienda reciclar el ácido y condensar y evaporar los solventes usados. Es necesaria la remoción de los solventes ya que inhiben el crecimiento de microorganismos para una hidrólisis enzimática posterior. Variables a controlar son: temperatura, tiempo de reacción y la concentración de las soluciones (Cortínez Villalobos, 2010; Sun y Cheng, 2002).

- **Líquidos iónicos (IL's).**

Como su nombre lo indica, se trata de sales que se conforman completamente de iones. Los compuestos iónicos al fundirse adquieren forma líquida, pero sin perder sus propiedades, además estos se conforman por cationes y aniones de tipo inorgánicos a diferencia de los líquidos iónicos los cuales poseen un catión de tipo orgánico y un anión de tipo inorgánico, además de poder permanecer en estado líquido en un amplio rango de temperaturas, incluyendo la temperatura ambiente. Entre los cationes orgánicos más comunes se encuentran los de alquilamonio, alquilfosfonio, *N*-alquilpiridinio y *N,N'*-alquilimidazolio, ejemplos de aniones se pueden mencionar halogenuros, tetrafluoroborato, hexafluorofosfato, triflato, triflimida y dicianimida, etc. (González Abrego et al., s.f.). En la Figura 14 se puede apreciar un ejemplo de cómo se conforman los líquidos iónicos.

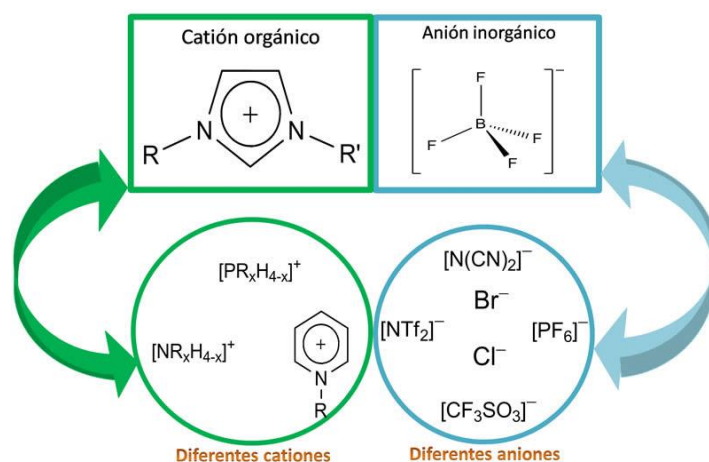


Figura 14. Ejemplo de la estructura del IL $[C_3H_3N_2RR'] [BF_4]$, y los cationes y aniones más utilizados en la formación de IL. (González Abrego et al., s.f.).

De acuerdo con Cortínez Villalobos (2010), los ILs (Líquidos iónicos, por sus siglas en inglés) poseen propiedades importantes como:

1. Alta conductividad iónica.
2. Tensión de vapor prácticamente nula (no se evaporan y son difícilmente inflamables), por lo mismo se consideran solventes amigables con el ambiente (en cuanto a contaminación de aire) y se conocen como “disolventes verdes”.

3. Se mantienen en estado líquido en un amplio rango de temperaturas, con alta estabilidad térmica, que en muchos casos supera los 300°C. Por encima de esta temperatura suelen descomponerse.
4. Poseen un alto poder disolvente con distintas materias orgánicas e inorgánicas, dentro de un amplio espectro de sustancias, desde carbón hasta plásticos, metales e incluso, rocas
5. Son difíciles de oxidar.
6. Fácil de sintetizar y recuperar (mediante la utilización de membranas), esto último hace que estos puedan ser reciclados, optimizando el uso de estos, a su vez que, hace de este método más rentable y de un menor costo.
7. Se puede trabajar con ellos a condiciones de proceso suaves, como son a presión atmosférica, así como a temperaturas bajas.

Dichas propiedades hacen que tengan un amplio uso en aplicaciones industriales, dado a que son de uso específico, y por lo mismo son conocidos como “solventes de diseño”.

Dentro de los ILs utilizados para la disolución de la celulosa se encuentran 1-butil-3-metilimidazolio cloro ($[bmim^+]Cl^-$) y 1-alil-3-metilimidazolio cloro ($[amim^+]Cl^-$), disolviendo hasta un 10% p/p de ésta, bajo condiciones de $T=100^\circ C$. También se pueden utilizar aniones de bromuro (Br^-) y de sulfocianato (SCN^-).

Sin embargo, hay aspectos que hay que tomar en cuenta en la utilización de ILs para la disolución de celulosa como:

- El largo de la cadena alquilo lineal influye en la solubilidad de la celulosa, es decir, a cadena más larga, la celulosa se vuelve menos soluble. Tal es el ejemplo del alquilo lineal imidazol cloro, incluido en los ILs de cloruro de 1-*n*-butil-3-metilimidazolio ($[C_4mim^+]Cl^-$), cloruro de 1-hexil-3-metilimidazolio ($[C_6mim^+]Cl^-$), cloruro de 1-octil-3-metilimidazolio ($[C_8mim^+]Cl^-$).
- El grado de polimerización de la celulosa influye en su solubilidad para la utilización de un mismo IL, a mayor grado de polimerización de la celulosa, menor será la solubilidad en un IL de la misma.
- El calor aumenta la solubilidad de la celulosa

El objetivo en el tratamiento de lignocelulosa es la extracción de la celulosa desde la biomasa de interés y no la disolución de la misma, además permite la recuperación de la mayor parte de la lignina.

Estos métodos permiten la disminución de la cristalinidad de la celulosa y eliminación parcial de lignina y hemicelulosas. Esto a su vez permite la solubilización de los componentes principales de la pared celular de la planta durante la sacarificación sin generar inhibidores de la fermentación (Pérez Pimienta et al., 2019).

Sin embargo, algunas desventajas de este tratamiento es la alta toxicidad hacia la celulosa y la alta viscosidad de los productos obtenidos para tratamientos posteriores. Para evitar dicha toxicidad, la celulosa obtenida debe de ser regenerada con el uso de antisolventes, como son agua y/o acetona. Este fenómeno puede suceder con ILs de tipo [Cación]-Cl.

Este tratamiento permite la extracción de la celulosa sin que esta se degrade. Para disminuir la cristalinidad de la celulosa, se pueden utilizar ILs en cuya composición se encuentren iones imidazolio, piridinio y fosfonio.

Dentro de las ventajas de este tratamiento podemos encontrar:

- La utilización de mayores cargas de sólidos.
- La capacidad de utilizar menores cargas de enzimas para completar la sacarificación en un tratamiento enzimático posterior, así como en un tiempo menor, debido a que con los ILs ya se pueden obtener altos rendimientos.
- Fácil recuperación de los ILs utilizados para su reutilización, por métodos tales como: carbón activado, destilación, separación con membranas, técnicas electroquímicas de separación, extracción de fase sólida y extracción líquido-líquido.
- No se producen casi inhibidores en la de obtención de etanol.

Para hacer más rentable el procedimiento se pueden recuperar las enzimas utilizadas desde el reactor de sacarificación y posteriormente ser recicladas al proceso. En la Figura 15 se puede apreciar un esquema general de cómo sería un proceso con ILs para que sea más económico y rentable.

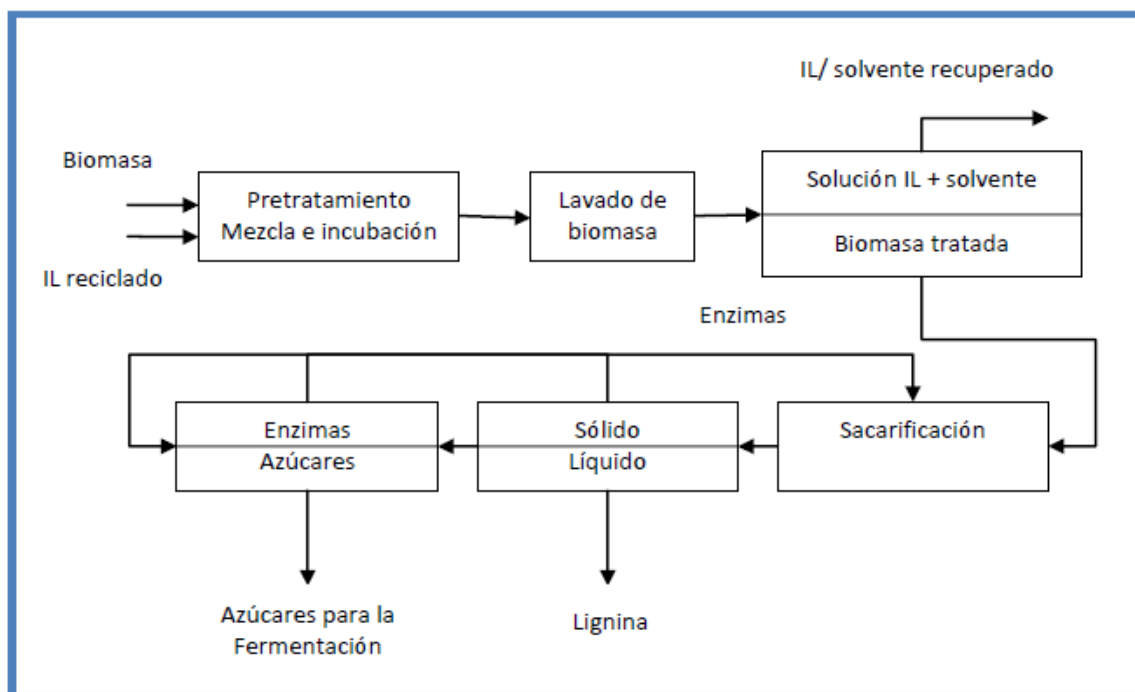


Figura 15. Proceso propuesto por Varanasi para la obtención de azúcares con un pretratamiento con IL (Cortínez Villalobos, 2010).

Otras desventajas de los ILs es que resultan ser materiales poco disponibles y a su vez costosos (Pérez Pimienta et al., 2019).

4.3.2. Pretratamientos físicos.

- **Pulverizado mecánico.**

Tiene como finalidad reducir el tamaño de las fibras mediante trituración y molienda, para disminuir la cristalinidad de la celulosa y aumentar el área que estará expuesta a hidrolisis posterior. Para dicho fin, se utilizan molino de bolas, permitiendo un tamaño de partícula de 0.2-2 mm y/o un molino de cuchillas o martillo, para obtener tamaños de partícula de entre 3-6 mm. Sin embargo, el alto uso de energía por parte del molino, hace que este proceso tenga un mayor costo, por obvias razones, a menor tamaño de partícula a obtener, se necesitara del empleo de más energía (Cortínez Villalobos, 2010).

- **Pirólisis.**

Procedimiento para descomponer a la celulosa. Si se utilizan temperaturas, mayores a 300°C, se pueden obtener residuos como carbón y productos volátiles (dado a la rápida descomposición de la celulosa), por lo mismo, este procedimiento debe de realizarse a condiciones mucho más suaves.

Los residuos de la pirólisis se someten a hidrólisis suave (a hidrólisis con ácido diluido, por ejemplo, H₂SO₄ 1N, a T=97°C, t=2.5 h) para de esta manera obtener el 80-85% de la conversión de la celulosa a azúcares reductores y obteniéndose a su vez más del 50% de la glucosa.

Se pueden usar catalizadores como cloruro de zinc o carbonato de sodio para llevar este proceso a una menor temperatura (Sun y Cheng, 2002).

También, este procedimiento se puede llevar a temperaturas más altas, bajo condiciones de vacío obteniéndose así la mayor temperatura del proceso en un menor tiempo (400°C, p=1 mmHg, t=20 min) (Cortínez Villalobos, 2010).

4.3.3. Pretratamientos fisicoquímicos.

- **Explosión a vapor (autohidrólisis).**

Es uno de los pretratamientos más usados debido a su bajo costo.

La biomasa es tratada con vapor saturado a altas presiones para luego ser reducida lentamente, sometiendo al material lignocelulósico a una descompresión explosiva.

Se usan temperaturas que rondan entre 160 a 260°C y presiones de 0.69 a 4.83 MPa. Posterior a unos minutos el material es expuesto a presión atmosférica. Este tratamiento causa la degradación de la hemicelulosa y la lignina, aumentando la posibilidad de hidrolizar la celulosa. Entre las principales variables a controlar son: tiempo de residencia, temperatura, la humedad y el tamaño de partícula. Se recomienda que este procedimiento se realice a bajas temperaturas y con un tiempo de residencia largo. Las condiciones favorables son temperaturas de alrededor de 190°C con un tiempo de residencia aproximado de 10 min.

Si se combina en condiciones ácidas (H₂SO₄, CO₂, SO₂) se obtiene una mejora posterior a una hidrólisis enzimática, permitiendo que se evite la formación de inhibidores y además se pueda remover la mayor cantidad de hemicelulosa.

Algunas ventajas del proceso son: bajo requerimiento de energía en comparación con el pulverizado mecánico (se requiere 70% menos de energía), además por la naturaleza del proceso no se generan costos medioambientales.

Dentro de las desventajas, podemos encontrar: la destrucción de una fracción de la xilosa obtenida, el rompimiento incompleto de la matriz de lignina-carbohidrato y la generación de compuestos inhibidores para los microorganismos utilizados en una hidrólisis enzimática posterior. Para evitar este problema se debe realizar un lavado de la biomasa con agua para remover material inhibidor, sin embargo, se disminuye los rendimientos en la sacarificación, al remover los azúcares solubles (Cortínez Villalobos, 2010; Sun & Cheng, 2002).

- **Explosión de fibra con amoníaco (AFEX).**

Es similar al proceso de explosión al vapor excepto que en este caso además se utiliza amoníaco líquido impregnado en el material lignocelulósico. Las condiciones del proceso son 1-2 kg de amoníaco/kg de biomasa seca por 30 minutos a 90°C (Cortínez Villalobos, 2010; Sun & Cheng, 2002).

Este tipo de tratamiento es más económico que la hidrólisis ácida, permitiendo una alta digestibilidad de la celulosa, pero a mayor contenido de lignina en la biomasa el proceso es menos eficiente.

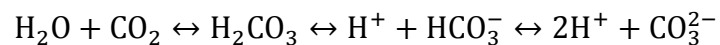
Este proceso permite una alta conversión (90%) en la hidrólisis enzimática de la celulosa para bagazo de caña.

A diferencia de la explosión a vapor, no se requiere un tamaño de partícula pequeño para ser eficaz; no hay producción de inhibidores por parte del proceso, por lo que no se necesita un lavado posterior de la biomasa tratada; además, se puede recuperar el amoníaco utilizado, reduciendo así los costos de producción, así como el impacto ambiental.

Para la recuperación de amoníaco se hace pasar vapor sobrecalentado a 200°C para vaporizar el amoníaco residual en la biomasa tratada y mediante un controlador de presión es recuperado (Sun y Cheng, 2002).

- **Explosión con CO₂.**

Es un proceso similar a la Explosión AFEX y autohidrólisis. Estudios reportan que el CO₂ empleado puede formar ácido carbónico, producto del agua contenida en el proceso y el CO₂ (Ecuación 2), provocando así al mismo tiempo una hidrólisis ácida (el pH disminuye a 2.9), haciendo que las tasas de hidrólisis sean mayores, sin embargo, los rendimientos son menores comparado con los dos procesos mencionados anteriormente, pero se obtienen rendimientos mayores con respecto a la hidrólisis enzimática sin tratamiento previo, esto de acuerdo a un estudio realizado por Zheng referenciado por Sun y Cheng (2002). Sin embargo, a diferencia de estos es más costo-efectivo.



Ecuación 2 Formación de ácido carbónico (Masahide y Kurumi, 2021).

En este proceso no se forman productos inhibidores., además por su baja temperatura a la cual se lleva este proceso no permite que la condición ácida del medio descomponga los monosacáridos contenidos en el material lignocelulósico (Zheng, Lin, y T. Tsao, 1998; Cortínez Villalobos, 2010).

Una forma efectiva para aumentar los rendimientos es utilizando una mayor presión del CO₂, ya que esto permite una mejor penetración en los poros del material lignocelulósico (Masahide y Kurumi, 2021).

4.3.4. Pretratamientos biológicos.

- **Hidrólisis enzimática.**

Este tipo de tratamiento se lleva a cabo con enzimas celulasas con alta especificidad. Con este proceso se pueden obtener productos tales como pentosas, hexosas, y glucosa, los cuales a su vez pueden ser fermentados para obtención de etanol mediante levaduras o bacterias (Cortínez Villalobos, 2010). En la Tabla 3 se reportan bacterias y microbios destinados en la producción de enzimas para la degradación de material lignocelulósico.

Tabla 3. Bacterias y microorganismos reportados en la degradación de materiales lignocelulósicos (Vyas, Kumar, y Suren, 2018).

Bacterias reportadas para hidrolizar celulosa	
Condiciones anaerobias	Condiciones aerobias
<i>Anarocellum thermophilum</i>	<i>Clostridium thermocellum</i>
<i>Ruminococcus albus</i>	<i>Cellulomonas fermentans</i>
<i>Clostridium thermocellum</i>	<i>Fibrobacter succinogenes</i>
<i>Caldicellulosiruptor saccharolyticus</i>	<i>Ruminococcus flavefaciens</i>
<i>Ruminococcus flavefaciens</i>	<i>Clostridium thermocellum</i>
<i>Clostridium cellulolyticum</i>	<i>Clostridium cellulolyticum</i>
<i>Clostridium thermocellum</i>	<i>Cellulomonas udaJC3</i>
<i>Caldicellulosiruptor bescii</i>	<i>Klebsiella oxytoca</i>
<i>Bacteroides succinogenes</i> + <i>Selenomonas ruminantium</i>	<i>Klebsiella pneumonie</i>
<i>Clostridium thermocellum</i> + <i>Clostridium thermohydrosulfuricum</i>	<i>Klebsiella variicola</i>
<i>Clostridium thermocellum</i> + <i>Clostridium thermohydrosulfuricum</i>	<i>Bacillus pumilus</i>
<i>Fibrobacter succinogenes</i>	<i>Enterococcus casseliflavus</i>
	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>
	<i>Microbacterium testeceum</i>
Bacterias reportadas para degradar lignina bajo condiciones aerobias	Microbios degradantes de la lignocelulosa
<i>Pseudomonas spp.</i>	<i>Proteus vulgaris</i>
<i>Acinetobacter spp.</i>	<i>Bacillus circulans</i>
<i>Pseudomonas spp.</i>	<i>Klebsiella pneumonia</i>
<i>Xanthomonas spp.</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
<i>Streptomyces badius</i>	<i>Enterobacter sp.,</i>
<i>Streptomyces viridosporous</i>	<i>P. aeruginosa,</i>
<i>Streptomyces cyaneus</i>	<i>Aeromonas sp.,</i>

Tabla 3 continuación

Bacterias reportadas para degradar lignina bajo condiciones aerobias	Microbios degradantes de la lignocelulosa
<i>Thermomonospora mesophila</i>	<i>Citrobacter freundii</i>
<i>Pandorea norimbergensis</i> LD001	<i>Serratia liquefaciens</i>
<i>Psuedomonas</i> sp. LD002	<i>Escherichia coli</i>
<i>Bacillus</i> sp. LD003	<i>Erwinia</i> sp

Algunas bacterias que pueden producir celulasas son las del género *Clostridium*, *Cellulomonas*, *Bacillus*, *Thermomonospora*, *Ruminococcus*, *Bacteroides*, *Erwinia*, *Acetovibrio*, *Microbispora* y *Streptomyces*; así como algunos hongos como los del tipo *Sclerotium rolfsii*, *P. chrysosporium* y especies de *Trichoderma* (los más estudiados), *Aspergillus*, *Schizophyllum* y *Penicillium*, los cuales son los más comercialmente utilizados ya que han sido investigados como mucho mayor extensión que las bacterias debido a que bacterias de tipo anaeróbico crecen lentamente dadas las condiciones de su medio (Sun y Cheng, 2002).

De acuerdo con Cortínez Villalobos (2010), las celulasas son usualmente una mezcla de varias enzimas. Al menos tres grupos de celulasas están involucradas en el proceso de hidrólisis (Figura 16):

- 1) Endoglucanasas: estas atacan las regiones internas de baja cristalinidad en las fibras de celulosa, creando cadenas libres de enlaces.
- 2) Exoglucanasas o celobiohidrasas: degradan las moléculas por la eliminación de unidades de celobiosa desde los extremos de las cadenas.
- 3) β -glucosidasas: hidrolizan celobiosa para producir glucosa.

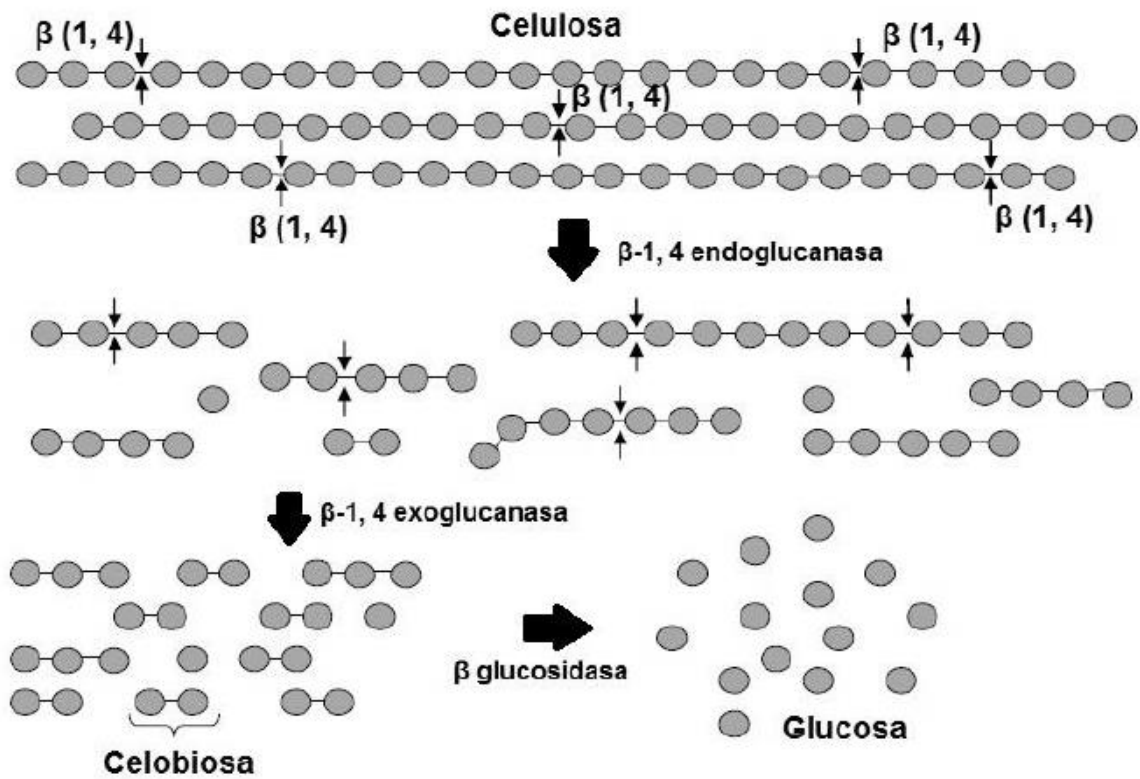


Figura 16. Acción de los distintos tipos de celulasas (endocelulasas, exocelulasas y β -glucosidasas) sobre la celulosa, para formación de glucosa (Vázquez Bolaños, 2012).

Además de estos tres grupos principales de enzimas celulasas existen otras enzimas que atacan la hemicelulosa como las glucoronidasas, acetillesterasas, xilanasas, β -xilosidasas, galactomanasas y glucomanasas.

En la Tabla 4 se muestran algunas enzimas utilizadas para degradar cada uno de los monómeros que conforman la lignocelulosa.

Tabla 4. Enzimas para la degradación de los monómeros que conforman la lignocelulosa (Vyas, Kumar, y Suren, 2018).

Monómeros de lignocelulosa	Enzimas
Lignina	Laccase, Manganese peroxidase, & lignin peroxidase
Hemicelulosa	Endo-xylanase, β -xylosidase, endomannanase, acetyl xylan esterase, β -mannosidase, α -L-arabinofuranosidase, ferulic acid esterase, α - glucuronidase, α -galactosidase, p-coumaric acid esterase, xyloglucanases, and glucuronidases
Celulosa	Cellobiohydrolase, endoglucanase, and β -glucosidase

Las enzimas son utilizadas en cócteles y en proporciones adecuadas puesto que son específicas de la composición individual de la biomasa pretratada, haciendo que el rendimiento sea mayor.

Algunos de los retos a vencer en el tipo de hidrólisis enzimática son el tipo y concentración del sustrato a utilizar (que, para fines de esta tesina, es para bagazo de *Agave tequilana* Weber var. azul), la actividad de la celulasa y las condiciones adecuadas de temperatura, pH, entre otros parámetros.

La hidrólisis enzimática por lo general se lleva a cabo bajo condiciones suaves, siendo lo más óptimo condiciones de operación con pH=4.8 y temperaturas bajas de 45-50°C y no presenta corrosión, ya que no requiere condiciones acidas o alcalinas para llevarse a cabo (Sun y Cheng, 2002).

Ventajas de este tipo de tratamiento son: casi no se generan inhibidores de la fermentación, se puede llevar a cabo bajo condiciones ambientales (lo cual permite hacer poco uso de energía), es selectiva, y ambientalmente amigable.

Sin embargo, como todo proceso presenta desventajas, tales como: se requieren de largos tiempos de tratamiento (a veces puede aplazarse semanas), es de alto costo debido a la producción de celulasas, además de que se requiere de un tratamiento previo para hacer uso de este tipo de pretratamiento. Para el caso de

producción de bioetanol se puede proceder a producir la celulosa in situ para disminuir los costos.

- **Hongos de pudrición blanca (HBP) y parda.**

Se utilizan hongos de pudrición blanca para degradar lignina mediante un proceso enzimático, aunque a veces dichos hongos deben de ser modificados para evitar que degraden parcialmente la hemicelulosa y celulosa, mediante la liberación de hemicelulasa, celulasa y/o enzimas. Los hongos de pudrición parda por lo general son utilizados para degradar celulosa, hemicelulosa, pectina (este último compuesto puede estar presente en algunos materiales lignocelulósicos) y para modificar la lignina (Sun y Cheng, 2002). Al igual que el tratamiento enzimático se requiere de poca energía para llevarse a cabo, debido a que se puede hacer bajo condiciones ambientales, pero el tiempo de residencia de este proceso puede tomar semanas. Es posible obtener altos rendimientos con este tratamiento.

Los hongos de pudrición blanca por lo general son usados para degradar lignina y hemicelulosa, mientras que los hongos de pudrición parda son utilizados para atacar la celulosa (Sun y Cheng, 2002).

Es así que al tener conocimientos de los diferentes pretratamientos aplicados a diversos materiales lignocelulósicos, se recomienda que, antes de un tratamiento de tipo enzimático se realice un tratamiento mencionado anteriormente para la descomposición exitosa de la biomasa lignocelulósica, según lo que se desea recuperar. De esta manera, durante los pretratamientos físicos, fisicoquímicos y químicos se puede obtener cerca del 20% de la glucosa contenida en la celulosa (Vyas, Kumar y Suren, 2018).

En el ANEXO A se resumen los distintos métodos de pretratamiento.

4.4. ALTERNATIVAS PARA LA UTILIZACIÓN DEL TEQUILA EN LA OBTENCIÓN DE PRODUCTOS ECONÓMICAMENTE ATRACTIVOS

4.4.1 Usos actuales del bagazo del Tequila y prospectos.

La gran mayoría del bagazo producido en la elaboración del Tequila, es utilizado en el compostaje, el cuál es destinado a los campos de cultivo del mismo, permitiendo que los suelos de siembra del agave sean enriquecidos y a su vez no sean bombardeados por agroquímicos, evitando así la erosión del suelo y enfermedades en las plantas (Gallardo Valdez, 2019).

Otros usos que se le han dado es la elaboración de papel, pero se obtiene un producto de baja resistencia; aglomerados, en la fabricación de muebles y como relleno en colchones; para fabricación de ladrillos y como sustrato en la producción de hongos para su consumo. También se usa como alimento de rumiantes.

Aunque todos estos usos hacen aprovechamiento del bagazo ayudando en parte a evitar la contaminación causada por dicho residuo, esto no resuelve el problema a corto plazo, dado que la industria en la producción del tequila presenta tendencia positiva al crecimiento, lo cual se traduce en más generación de residuos. Además, aún no se encuentra un proceso definitivo para tratar este bagazo y así obtener un beneficio tanto ambiental como económicamente atractivo (González García et al., 2005).

Algunas formas de aprovechar dicho bagazo es mediante la obtención de lignocelulosa y sus derivados (Figura 17), pues en lo que respecta al bagazo de agave tequilero, este representa el 40% del peso del total de la planta (peso seco) (Palomo Briones et al, 2018), el cual contiene alto contenido de polisacáridos (especialmente celulosa y hemicelulosa) para implementación en generación de bioetanol para biocombustibles, dado el alto contenido de hexosas (lo cual favorece los procesos fermentativos) del bagazo, lo hace un material con potencial hacia el futuro y como alternativa a los combustibles de origen fósil, así como la obtención de fibras para uso textil y como material reforzador para la industria automotriz.

Además, se han encontrado usos biotecnológicos, tal es el caso en la creación de enzimas como la inulinasa, fructanasa y pectinasa para producción de fructosa y aditivos para la industria alimentaria respectivamente, utilizando como inóculos

microrganismos de las variedades *Aspergillus* y *Kluyveromyces* (Gallardo Valdez, 2019).

Otras medidas con potencial: generación de biogás como hidrógeno y metano, así como en la elaboración de bioplásticos a partir de la bioconversión por bacterias, obteniendo como materia prima ácido succínico para dicho fin. Por otra parte, se han hecho estudios para obtener otros productos de interés químico como el xilitol, inulina, hidróxido de calcio, etc.

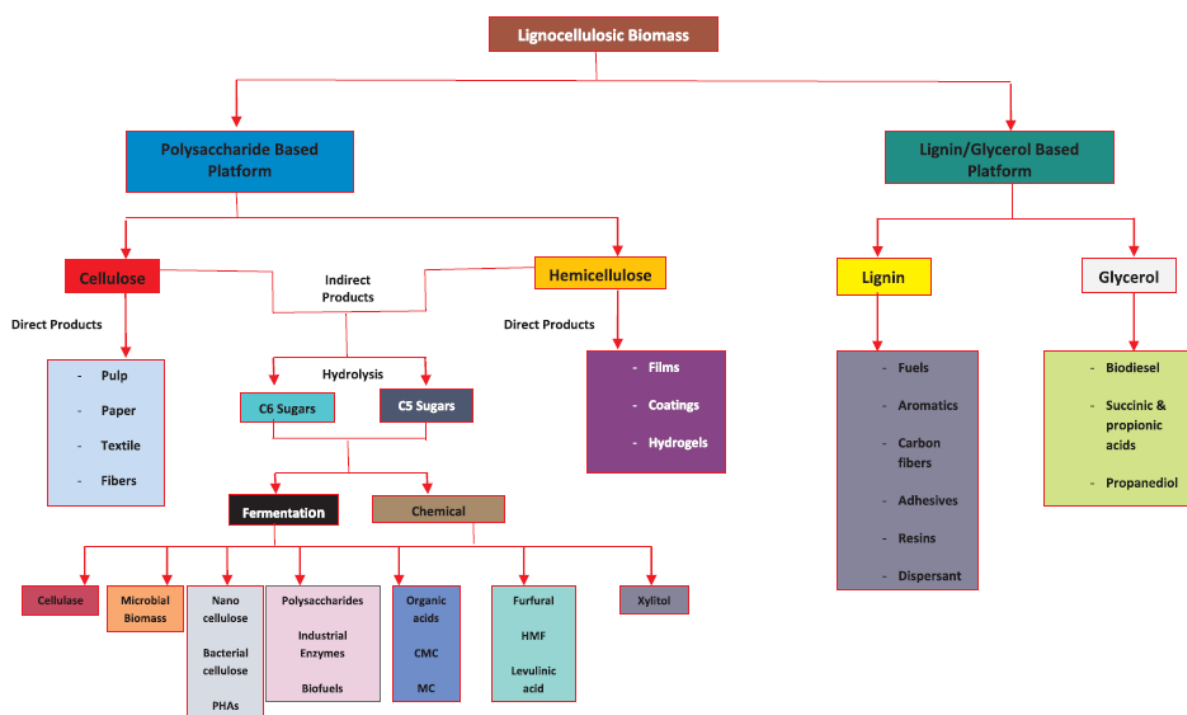


Figura 17. Bioproductos comerciales a partir de biomasa de lignocelulosa (Chandel et al., 2018).

Estudios del Departamento de Energía de los Estados Unidos (USDOE, por sus siglas en inglés), muestra que para productos biobasados a partir de lignocelulosa como fuente de origen que tendrán potencial económico son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 5. Principales químicos/productos con potencial económico seleccionados por el USDOE a partir de lignocelulosa (Chandel et al., 2018).

Productos/químicos biobasados con potencial en 2004	Principales químicos de plataforma biobasados en química verde en 2010
Ácidos 1,4 succínico, fumárico y málico	Etanol
Ácido 2,5-furanodicarboxílico	Furanos (furfural, 2,5-FDCA)
Ácido 3-hidroxipropiónico	Glicerol y sus derivados (propanodiol, carbonato de glicerol, epiclorhidrina)
Ácido aspártico	Hidrocarburos (isoprenos, ...)
Ácido glutárico	Ácido láctico
Ácido itacónico	Ácido succínico / Aldehído / Ácido 3-hidroxipropiónico
Ácido levulínico	Ácido levulínico
3-hidroxi butirrolactona	Sorbitol
Glicerol	Xilitol
Sorbitol	

4.4.2. Obtención de glucosa y azúcares reductores a partir de bagazo de Tequila.

Dentro de los pretratamientos reportados en artículos para el bagazo de Tequila, se encuentran tratamientos de tipo AFEX, ácido concentrado y diluido, alcalino, etc., sin embargo, a pesar de que haya diversos tratamientos; para obtener mejores resultados, es decir, una mejor sacarificación, es necesario hacer un tratamiento posterior mediante vía enzimática, como ya se ha mencionado con anterioridad.

A continuación, se explica el tratamiento hecho por Hernández Salas et al., (2009), llevado a cabo en bagazo de *Agave atrovirens*, utilizado en la producción del mezcal (dada la similitud respecto al bagazo de *A. tequilana*), al cual se le aplicó un tratamiento previo al tratamiento enzimático y ácido consistente en explosión al vapor en autoclave a 121°C y 1.1kg/cm² por 4h.

Tratamiento con ácido diluido (HCl 1.2-2% v/v): Se utilizó como material de la planta lo siguiente:

- **Metzal (Mz):** el material celulósico obtenido del desguace (cortar en trozos) de piña de agave antes y durante la producción de “aguamiel”.
- **Mezontete (Mt):** toda la biomasa de agave (hojas y piña) después de que la producción de "aguamiel" haya cesado. Básicamente se encuentra físicamente desgarrado.

Tratamiento alcalino diluido (NaOH 2% w/v)-enzimático: tratamiento enzimático posterior llevado a cabo en un baño de agua a 55°C por 4h, 20% (p/p) de enzima por bagazo peso en seco (Hernández Salas et al., 2009). Las preparaciones usadas para dicho tratamiento enzimático fueron Viscozyme, Celluclast, Novozyme, Cellubrix y Pulpzyme proveídas por Novozymes® (México). A continuación, se hace una descripción de cada una de las preparaciones de las enzimas utilizadas:

- **Pulpzyme HC:** es una preparación líquida producida por fermentación sumergida de cepa modificada genéticamente de *Bacillus sp.* con una actividad de 1000 AXU/g (unidades de xilanasas por gramo).
- **Cellubrix L:** es una preparación líquida de celulasa y celobiosa producido por fermentaciones separadas de una cepa de *Thichoderma longibrachiatum* y una cepa de *Aspergillus Níger*.
- **Novozyme:** es una preparación líquida producida por fermentación sumergida de endo-glucanasa monocomponente por cepa modificada genéticamente de *Aspergillus spp.* con una actividad de 5000 ECU/g (unidades de endocelulasa por gramo).
- **Celluclast:** es una preparación líquida de celulasa producida por fermentación sumergida de la cepa de *T. reesei* con una actividad de 1.51 Celluclast 700 EGU/g (unidades de endoglucanasa por gramo).
- **Viscozyme:** es una preparación líquida de complejo multienzimático de arabinasa, b-glucanasa, hemicelulasa, celulasa y xilanasas producida por una cepa de *Aspergillus aculeatus* con una actividad de 100 FBG/g (unidades de beta-glucanasa fúngica por gramo).

Las preparaciones que mostraron un mayor rendimiento fueron con Viscozyme L y Celluclast. Para Viscozyme L fueron rendimientos de 36% (piña-hojas o Mt) y 58% (piña o Mz). Para estos dos tratamientos, se hizo una comparación, resultando el tratamiento alcalino mejor que el tratamiento con ácido diluido. Para el tratamiento con ácido diluido, se encontraron rendimientos entre 5-9.9% (p/p) de azúcares reductores para el bagazo proveniente de la piña (Mz) y para una combinación de bagazo de piña y hojas (Mt), respectivamente, en contraste con el tratamiento alcalino, en el cual el rendimiento fue de 12-58%. Para ambos procedimientos se utilizaron tanto hojas como piña del agave.

Se obtuvo más contenido de glucosa para Mz que para Mt, tanto para el tratamiento con ácido como con el tratamiento alcalino-enzimático, aunque el que presentó mejor contenido de glucosa fue para Mz con tratamiento alcalino-enzimático (48 g/L aproximadamente).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por Hernández Salas et al., 2009:

Tabla 6. Azúcares reductores obtenidos mediante hidrólisis ácida y alcalina.

	Azúcares reductores (g/L)	
	Hidrólisis ácida	Hidrólisis alcalino-enzimática
Agave metzal (Mz)	24.82	56.37
Agave mezontete (Mt)	19.45	28.44

Elaboración propia con datos de Hernández Salas et al, 2009.

En otro estudio llevado a cabo por Saucedo Luna et al., (2011), en el que uso el bagazo de la piña de *A. Tequilana* mediante tratamiento ácido (1-3% H₂SO₄ w/w) y tratamiento enzimático subsecuente, se obtuvieron 41 g/L de azúcares reductores (73.6% w/w de material sacarificable teórico). Entiéndase como material sacarificable a contenido en celulosa y hemicelulosa.

Previo a cualquier tratamiento, el bagazo (BAT, Bagazo de *Agave tequilana*) fue secado en un horno a una temperatura de 40°C, para que así se tuvieran muestras homogeneizadas para cualquier proceso posterior y además fue lavado con agua destilada para remover azúcares residuales del proceso de elaboración del tequila. También, el material fue pulverizado y cribado a un tamaño de partícula de 0.5 mm de diámetro.

El tratamiento ácido se llevó a cabo a 147°C con 2% w/w H₂SO₄ por 15 min. Durante esta etapa se produjeron 25.8 g/L de azúcares fermentables correspondiente al 36.1% del material sacarificable. Posteriormente los residuos fueron filtrados y tamponados para la hidrólisis enzimática. El tratamiento enzimático, se incubó por 72 h a 40°C, con una mezcla de enzimas comercial, Celluclast 1.5 L derivado de *Trichoderma reesei* (celulasa) y Novozyme 188 b-glucosidasa derivado de *Aspergillus niger* (celobiasa).

El material lignocelulósico se suspendió en Acetato de sodio 50 mM con pH=5, celulosa (100 unidades / 1g de total de sólidos (TS) y celobiosa (80 unidades / 1g de TS) fueron añadidos a 10 ml de la solución tampón recomendada. El BAT pretratado restante, se suspendió en acetato de sodio 50 mM pH 5, y la reacción se llevó a cabo en un matraz incubado a 40°C y 100 rpm. Después de la incubación, las reacciones fueron hervidas por 10 min. Cada muestra fue centrifugada y el sobrenadante se recogió, se filtró a través de una membrana (marca Millipore) de 0.2 µm y sometido a análisis por HPLC (High Performance Liquid Chromatography, por sus siglas en inglés, o Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia).

En otro estudio llevado a cabo por Caspeta, Caro Bermúdez, Ponce Noyola, y Martínez, (2014), se hizo uso de un método conocido como Etanosolv modificado (agua, etanol y H₂SO₄ al 10% w/v, este último como catalizador) en el cual se obtuvo

la recuperación teórica de 91% de azúcares fermentables (0.51 g/g) después de la sacarificación con celulasa y beta-glucosidasa, así como la recuperación de 69% del total de lignina (0.11 g/g).

El método etanosolv permite obtener azúcares con altos rendimientos en fracciones líquidas ricas en xilosa y fracciones sólidas con altos porcentajes de celulosa, así como para recuperar fracciones de lignina de pureza suficientemente alta para ser utilizada como biopolímero. Productos como la xilosa y arabinosa se encuentran en fracciones líquidas, mientras que la glucosa y celulosa se encuentra en fracciones sólidas.

Tal parece que en este estudio se utilizaron combinaciones de bagazo provenientes de distintas especies de agave, (aunque también parece que se utilizó *Agave tequilana Weber*, la cual fue caracterizada). Se encontró que 56.3% (w/w) son azúcares fermentables (69%, 24%, y 6% son glucanos, xilanos y arabinanos, respectivamente). Lignina Klason (lignina ácida insoluble) representa el 16% w/w y hemicelulosa 4.2% w/w

A continuación (Tabla 7) se presentan las condiciones y resultados de algunos de los experimentos reportados por Caspeta et al., 2014.

Tabla 7. Balance de materia, condiciones del tratamiento y porcentaje de conversión de celulosa a glucosa mediante el método etanosolv aplicado a BAT.

Experimento no.	1	5
Azúcares fermentables (gDWM*)	52.8	45.1
Condiciones etanosolv		
Temperatura (°C)	160	160
H ₂ SO ₄ (%)	0.5	0.5
Etanol (%)	25	50
Tiempo de reacción (min)	10	10
Composición sólida (g/100g DWM)*		
Lignina Klason	24.1	12.2
Glucano	71.8	79.8
Xilano	2.1	5.5
Arabinano	2.1	2.4
Composición líquida (g)		
Xilosa	12.2	7.3
Arabinosa	0.7	0.6
Glucosa	1.3	0.4
Lignina etanosolv	3.3	11.1
Lignina acida soluble	0.0	0.1
Inhibidores		
Acetato	3.5	3.7
Furfural	0.5	0.5
Hidroxi-metil-furfural	0.1	0.3
Acido fórmico	0.0	0.0
Ácido levulinico	0.0	0.0
Conversión (%) 10h	78	84
Conversión (%) 24h	91	98

*gDWM (dry weight matter, gramos de peso de materia seca por sus siglas en inglés).

Elaboración propia con datos de Caspeta et al., 2014.

Aunque en el experimento 5 se muestran mejores conversiones, se recomiendan las condiciones del experimento 1 debido a que, en este, la cantidad de inhibidores que se general son mínimas. Las cantidades de furanos menores a 1g/L por lo general no presentan un problema para la actividad de microorganismos de tipo etanologénicos, los cuales metabolizan pentosas y hexosas. Con las condiciones del experimento 1, se obtiene tasas más altas en la fracción líquida en cuanto a xilosa y arabinosa. Con el experimento 5 se obtienen mayor cantidad de glucano y casi una completa sacarificación, aunque se obtiene una mayor cantidad de inhibidores.

También largos tiempos de calentamiento promueve la formación de ácido fórmico y levulínico y la reducción de monómeros de azúcar en las fracciones sólidas solubles.

Para el tratamiento enzimático, se usaron preparaciones de celulasa y beta-glucosidasas, proveídas por Novozymes (preparaciones enzimáticas NS50013 y NS50010, respectivamente). Se tuvieron que hacer ensayos para determinar las actividades de dichas preparaciones, siendo estas de 44.6 FPU/mL (unidades de papel filtro/mL) para NS50013 y 430.7 CBU/mL (unidades de celobiasa por mL) para NS50010.

La celulosa de la fracción sólida fue hidrolizada al 2, 5 y 10% de consistencias (gramos de sólidos por 100mL) con 15 FPU de celulasa y 30 BTU de beta-glucosidasa por gramo de sólidos.

Las condiciones de proceso fueron: 150 rpm a 50°C en disoluciones de 50mM de un buffer de citrato con pH de 4.8, con carga de sólidos de 20 y 15% w/w. Aunque los experimentos se realizaron en frascos agitados, se presentaron problemas de transferencia de masa, por lo que se llevó a cabo en una bioreactor agitado con un mezclador de clavijas y con circulación de agua, con 20 y 30% w/w de consistencias bajo las mismas condiciones de proceso.

Algo importante que hay que destacar de este artículo es la obtención de una cantidad considerable de glucosa, así como la conversión de celulosa a la misma,

pero teniendo en cuenta la experimentación con diferentes cantidades de cepas. A continuación, se presentan algunos de los experimentos reportados:

Tabla 8. Conversión y producción de glucosa con diferentes cargas de sólidos y diferentes cepas.

Carga sólida (w/w)	FPU/g	CBU/g	Glucosa (g/L)	Tiempo (h)	Conversión celulosa-glucosa (%)
20	15	30	120	24	80
			135	64	90
30	10	20	175	24	70
			225	72	91

Elaboración propia con datos de Caspeta et al., (2014) bajo las condiciones del experimento 5 del artículo citado.

Como se puede apreciar en el experimento llevado a cabo con una carga de sólidos de 30%w/w, se hace un menor uso en cuanto a la cantidad de FPU y CBU obteniéndose así 225 g/L de glucosa y con un rendimiento de 91% aproximadamente, sin embargo, Caspeta et al., 2014, hace la aclaración que esta cantidad, no puede ser fermentada por *S. cerevisiae* para producción de etanol por la limitada cantidad de nutrientes para esta cepa y alta presión osmótica (debido a las sales residuales de los químicos utilizados para amortiguamiento del pH), aunque para esta investigación no es el caso, ni la finalidad.

A pesar de esta conclusión, se obtiene una cantidad considerable de glucosa a un alto porcentaje de rendimiento. Con los estudios pertinentes, se puede determinar de qué manera dicha glucosa puede ser aprovechable para la obtención de otros productos.

Además, otras observaciones que hace el autor y comparando con otros artículos, es que aumentando las rpm se obtiene una mejora en el incremento del nivel de glucosa generado.

Otro método llevado a cabo por Perez Pimienta et al., (2013), fue con el líquido iónico acetato de 1-etil-3-metilimidazolio ([C2mim][OAc]). El bagazo pretratado con líquido iónico [C2mim] [OAc] a 160 °C por 3h con una carga sólida del 15% p/p resultó en una deslignificación del 45.5% y una mejora significativa en la recuperación de azúcar, liberando 6-17 mg/mL, en comparación con el material no tratado. También se le aplicó un tratamiento enzimático posterior con Cellic®CTec2 (complejo de celulasa para la degradación de celulosa) y HTec2 (endoxilanasas con alta especificidad hacia hemicelulosa soluble). Se obtuvo además la reducción en la cristalinidad de la celulosa, así como la eliminación del contenido de lignina y hemicelulosa.

En un estudio realizado por Pérez Pimienta et al., (2019), se hace uso de pretratamiento mediante la técnica de IL, utilizando acetato de 1-etil-3-metilimidazolio ([Emim][OAc]) y tratamiento enzimático con Cellic®CTec2

Para esta investigación, se estudiaron tiempo de reacción, temperatura y carga de sólidos.

El líquido iónico (IL) utilizado se mezcló con la carga de sólidos de BAT para generar 15g y subsecuentemente fue disuelto generando una suspensión para ser calentado a una temperatura y tiempo específicos en un horno de convección marca Binder. Después de esto se hizo un lavado con agua destilada seguido de etanol para eliminar la IL para recuperar los sólidos. Este último procedimiento es descrito en Perez Pimienta et al., (2013).

Posteriormente se aplicó un tratamiento enzimático. Para esto se utilizaron 4% de carga de sólidos (para una mejor optimización en la transferencia de masa) utilizando bagazo tratado y no tratado, en un buffer de citratos a 50mM con pH=4.8. Se hizo uso de coctel comercial: CTec2 con una actividad de 161 FPU/mL de Novozymes®, de las cuales para el experimento se utilizaron de 2-40 FPU/g. Las condiciones de

reacción fueron 50°C a 150rpm durante 72h en una incubadora. Las reacciones fueron seguidas tomando muestra de 1mL a distintos intervalos de tiempo y se filtró utilizando filtros de 0.45 µm para el análisis de contenido de azúcares.

Tomando en cuenta todos los resultados se determinó que lo más óptimo es un tratamiento a 119°C, 142 min y 30% w/w de carga de sólidos. Haciendo uso de estos datos se encontró que se producen 32.2 g/L de azúcares, lo cual se encuentra cerca del valor predicho para estos datos, los cuales corresponden a 12.5g de glucosa/L, 6.8g de xilosa/L y 7.5g de celobiosa/L.

El autor concluye que estos datos son de suma importancia ya que, puede aplicarse a un esquema de biorrefinería para disminuir el total de costos y es un contraste a las condiciones típicamente aplicada a otras materias primas (por ejemplo: 160°C, 3h y 10% de carga de sólidos).

Haciendo un escalamiento de los datos de optimización mediante balance de materia, los rendimientos de glucosa y xilosa podrían ser de 41.3 y 13 kg por cada 100 kg de BAT no tratado como base que es equivalente a conversiones de glucano y xilano de 75.9% y 82.9% respectivamente

4.4.3. Producción de xilitol.

El xilitol es un polialcohol de cinco carbonos, es un sólido de color blanco, que, por lo general, se puede encontrar en forma cristalina o en polvo. Es usado en una gran gama de industrias como la alimentaria en la cual se usa como edulcorante en gomas, dulces, bebidas azucaradas, helados, etc. Además, al ser un edulcorante que no necesita de la insulina para ser metabolizado es usado como sustituto de la sacarosa de productos para diabéticos, proporcionando el mismo poder edulcorante de la sacarosa y un contenido calórico menor a este, y por si fuera poco es dos veces más dulce que el sorbitol y casi tres veces más dulce que el manitol, los cuáles también son usados en productos para diabéticos. En la industria farmacéutica, es utilizado para prevenir caries inhibiendo el metabolismo de las bacterias que forman la placa bacteriana.

A escala industrial el xilitol es obtenido vía química del xilano (el cual representa unos de los compuestos más abundantes, después de la celulosa), o a partir de la

hidrogenación catalítica de la xilosa presente en hidrolizados hemicelulósicos. Este último método está basado en la separación de la D-xilosa y reducción a xilitol por medio de hidrogenación a alta presión (31-40 atm) y a altas temperaturas (100-130°C) y usando metales como catalizadores, sin embargo, durante el proceso se requiere la purificación sucesiva de la xilosa. Además de que la síntesis química es cara, se obtienen rendimientos máximos de 50-60% de la xilosa. Lo que hace de este método poco rentable, ya que el precio del producto obtenido es diez veces mayor en comparación al precio de la sacarosa o el sorbitol (Ledezma Orozco & Rodríguez Castillejos, 2016). Pero estudios recientes demuestran que también puede ser obtenido vía fermentativa. En la composición de la hemicelulosa el xilano es uno de los compuestos que se hallan en mayor proporción, por lo mismo el xilitol puede ser obtenido hidrolizando el xilano por acción de xilanasas para obtener xilosa y este es fermentado para producir el xilitol (Arrizon et al, 2012; CIATEJ, 2017). Este método requiere condiciones de presión y temperatura más bajas que el método de obtención vía química y además no necesita de soluciones de xilosa pura para su obtención, ya que la utilización de microorganismos en el proceso, permite la producción de xilitol a partir del hidrolizado hemicelulosico, lo que haría de este proceso más viable económicamente.

Los microorganismos que hasta a la fecha se pueden emplear en dicho proceso son, levaduras modificadas genéticamente tales como *Saccharomyces cerevisiae* o *Candida sp.* Las especies que han reportado mayores productividades y rendimiento son: *Candida boidinii*, *Candida guilliermondii*, *Candida intermedia*, *Candida maltosa*, *Candida mogii*, *Candida parapsilosis*, *C. tropicalis HXP*, *C. tropicalis*; *Candida athensensis*, *Candida magnolia*; en lo referente a otros géneros de levaduras, se encuentran *Pachysolen tannophilus*, *Pichia stipitis* y *Debaryomyces hansenii* como los principales productores (Ledezma Orozco y Rodríguez Castillejos, 2016; Tiwari y Baghela, 2020).

“En estos microorganismos el xilitol se acumula como un producto intermedio de la conversión de xilosa en xilulosa. En el primer paso, la xilosa se reduce a xilitol por medio de la enzima aldosa reductasa (EC 1.1.1.21): el xilitol producido se oxida para producir xilulosa, con la participación de la enzima xilitol deshidrogenasa (EC 1.1.1.9)” (CIATEJ, 2017).

La producción de xilitol mediante desechos lignocelulósicos vía fermentación, se ha llevado a cabo con diferentes sistemas de fermentación utilizando hidrolizados de distintas fuentes agrícolas, mediante la realización de hidrólisis térmica o química. Sin embargo, al final de los procesos reportados, es necesario la eliminación de inhibidores de la fermentación como son ácido acético, furfural y fenólicos.

Métodos llevados a cabo por Arrizon et al, (2012), demostraron que es posible llevar a cabo el proceso sin tener que eliminar los inhibidores, utilizando microorganismos más resistentes al furfural y al ácido acético, disminuyendo así el costo en la producción de xilitol.

Para esto se llevo a cabo un proceso de fermentación secuencial con ácido acético y cepas de levadura tolerantes al furfural y utilizando materiales lignocelulosicos como bagazo de caña de azúcar y bagazo de Tequila. Esto permitió la producción simultánea de bioetanol y xilitol. Para tal fin se hizo uso de pretratamiento de explosión a vapor (autohidrólisis) seguida de una hidrolisis enzimática (Arrizon et al., 2012). También puede llevarse a cabo con explosión a vapor AFEX para obtener altos rendimientos en la producción de bioetanol.

Para la producción de etanol se debe primero someter el material lignocelulósico a una proceso de deslignificación, para liberar la celulosa y hemicelulosa de sus complejos con lignina y subsecuentemente la despolimerización de la celulosa y hemicelulosa para producir azúcares libres, conformados por hexosas y pentosas para su posterior fermentación para producir etanol, para este último paso se hizo uso de una cepa modificada genéticamente de *Saccharomyces cerevisiae* (levadura utilizada en la fermentación de la cerveza) tolerante al furfural, ácido acético y compuestos fenólicos.

En el método utilizado por Arrizon et al, (2012) primero se realiza la hidrólisis del material lignocelulosico (para este artículo se utilizaron residuos de bagazo de caña, Tequila y café). Se lavó el material con agua para eliminar impurezas y después fue secado a 60°C en un horno, aunque en algunos casos el material puede ser secado a temperatura ambiente, sobre todo para disminuir el contenido de humedad, sin embargo, este método representaría un tiempo largo de exposición. Posteriormente fue pulverizado a un tamaño de partícula de 55 mm, después 500 g de cada material

impregnado con H_2SO_4 al 1% peso fue sometido a explosión a vapor (autohidrólisis) a 170°C con rápida despresurización por cinco minutos. Cada residuo industrial tratado fue luego hidrolizado con un cóctel enzimático comercial (Celluzyme) de la siguiente manera: se agregaron 9 mL de una solución buffer de CH_3COOH (0.05 mol/l, pH 5) por gramo de desecho industrial tratado, luego se agregó un mililitro de solución enzimática (0.32 mg de celluzyme por ml de solución buffer de CH_3COOH). La mezcla se incubó a 50°C y 200 rpm durante 348 h.

Posteriormente se filtraron las soluciones y se separó el precipitado para ser lavado con agua destilada y nuevamente fue agregado al sobrenadante hasta que se generaron soluciones con 30 g de glucosa/L. Además, a estas mismas soluciones se les agregó una mezcla de sales conformadas por KH_2PO_4 (5 g/L), $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.1530 g/L) y $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (3 g/L).

Dichas soluciones fueron esterilizadas a 121°C durante 15 min para prepararlas para su posterior fermentación (pH=5.5). Solo se tomaron 75 mL de c/u de las soluciones, a las cuales se le agregaron una cepa modificada de *Saccharomydes cerevisiae*, resistente a ácido acético, furfural y compuestos fenólicos y fue propagada en el medio a 30°C y 200 rpm. 6×10^6 células/mL fueron inoculadas por cada 75 mL de solución. Posteriormente se fermentaron sin agitación a temperatura ambiente ($30\text{-}34^\circ\text{C}$) por 24 horas.

Después de que la fermentación con etanol concluye, utilizando el contenido ya fermentado se agregó la misma mezcla de sales mencionadas anteriormente y 1 g/L de extracto de levadura y adicionalmente se le agregó 0.25 y 1.65 g de xilosa pura al bagazo de caña (BCA) y al de Tequila (BAT) respectivamente. El pH fue ajustado a 5.5 y las soluciones fueron esterilizadas a 121°C por 15 minutos.

Posterior a la esterilización se hicieron dos distintos tipos de cultivo, uno con una cepa de *Candida tropicalis* y otra con una cepa de *Candida magnoliae*, ambas inoculadas con 6×10^6 células/mL y el medio fue fermentado a 30°C a 100 rpm por 96 horas.

Con este método fue posible obtener una conversión de 85.4% y 85.5% para BCA y BAT respectivamente para producción de etanol y más del 95% de la glucosa fue consumida.

Para la elaboración de xilitol fue posible obtener eficiencias de xilitol por cantidad de xilosa de 31.6% y 22.9% para BCA y BAT respectivamente utilizando la cepa de *Candida tropicalis*; sin embargo, utilizando la cepa de *Candida magnoliae* se obtiene una eficiencia por cantidad de xilosa de 24% para BAT, con un consumo de xilosa de 66%.

En general, en este estudio realizado se encontró que la producción de xilitol es más exitosa utilizando la cepa de *Candida tropicalis* con la cual es posible obtener 7.5 y 5.2 g/L de xilitol utilizando los hidrolizados de BCA y BAT respectivamente.

En el Anexo B se encuentra resumido el diagrama del proceso seguido por Arrizon et al., (2012).

4.4.4. Producción de ácido succínico.

El ácido succínico es una materia esencial para la producción de una amplia gama de productos. Es materia prima esencial para industria del plástico, farmacéutica, alimenticia; misma por lo cual se le conoce como químico de plataforma, ya que sirve como intermediario de variados productos. En 2004, el Departamento de Energía de los Estados Unidos estableció que el ácido succínico es uno de los 12 principales químicos que pueden ser producidos de fuentes renovables (BASF y Corbion, s.f.).

Algunos productos derivados del ácido succínico, solo por mencionar algunos, se encuentran: antisépticos, colorantes, cosméticos, medicinas, solventes, resinas, plásticos, herbicidas fungicidas, aditivos alimentarios, etc.

Dentro de los plásticos con un interés comercial de suma importancia encontramos el succinato de polibutileno (PBS, por sus siglas en inglés), el cuál puede ser utilizado como empaques en la industria alimenticia, acolchados en agricultura, compositos en la industria automotriz y del plástico, puesto que el PBS tiene propiedades similares al polipropileno (PP), aunque dentro de las ventajas se encuentra que es compostable, dado que se trata de un poliéster.

Un caso de éxito es la empresa Succinity para producción de PBS utilizando como precursor ácido succínico de origen biobasado (BBSA o Biobased Succinic acid) a partir de la fermentación de dextrosa obtenida de fuentes como glucosa, sucrosa y

glicerol biobasado, el cuál al reaccionar con 1,4-butanodiol (BDO) obtenido de fuentes renovables como la dextrosa, da origen a este bioplástico (Succinity, 2016). Actualmente el ácido succínico es obtenido vía química mediante anhídrido maléico derivado del butano, el cual, al ser de origen fósil, representa un método más caro que el que se encuentra actualmente en investigación. Además, una de las ventajas por la cual se está tomando en consideración, es que durante el proceso biobasado el ácido succínico tiene la capacidad de capturar CO₂. Datos muestran que por cada tonelada de ácido succinico producido se capturan alrededor de 4.5-5 toneladas de CO₂, esto es gracias a la fermentación llevada a cabo en la producción de ácido succínico. De este modo, la reducción de emisiones de gases invernadero se ven reducidos de 50-80% (Succinity, 2016). Recientemente con el auge de los plásticos biodegradables, se ha buscado la manera de obtener dicho acido de fuentes biológicas como los desechos agroindustriales, (como ejemplo el bagazo de caña), ya que estos representan una fuente de mucho más fácil acceso, además de mayoritario y remediando así de cierta manera la contaminación causada por los mismos. Además, el proceso convencional presenta un inconveniente económico al ser más caro, lo que podría ser una oportunidad para un método mucho más económico y amigable ecológicamente al obtener la materia prima de materiales lignocelulósicos. Debido a que el bagazo de *Agave tequilana* es un residuo abundante, representa una fuente barata para obtención de esta lignocelulosa.

Se puede obtener acido succínico vía hidrólisis ácida y vía biológica utilizando medios de cultivo, tales como *Anaerobiospirillum succiniciproducens*, *Mannheimia succiniciproducens* y *A. succinogenes*, los cuales permiten obtener altas tasas de conversión para ácido succínico (Corona González et al, 2016).

Sin embargo, la generación de subproductos tóxicos tales como el furfural y el hidroximetilfurfural hacen de la hidrólisis ácida un proceso más costoso. Pero microorganismos como *A. succinogenes* pueden soportar dichas condiciones, tal como se muestra en la investigación llevada por Corona González et al, (2016).

En la investigación mencionada se acondiciono el bagazo (mediante lavado, secado y reducción de particula a 0.5 mm) y posteriormente se llevaron cabo hidrólisis de

tipo ácido y otra de tipo enzimático, para determinar cuál de las dos es la mejor opción.

4.4.5. Producción de enzimas.

Si bien, el uso de enzimas es vital dentro de todos los procesos explicados, también es posible obtener enzimas del bagazo del Tequila, los cuales pueden ser aprovechados dentro de otros procesos de interés comercial, como en la producción de xilitol, bioetanol, etc. (CIATEJ, 2017). A continuación, en la Tabla 9 se muestran las enzimas obtenidas del bagazo de Tequila y los microorganismos utilizados para obtenerlas, así como su posible uso.

Tabla 9. Enzimas que se pueden obtener del bagazo de *Agave tequilana* Weber var. azul (CIATEJ, 2017).

ENZIMA	SUSTRATO	MICROORGANISMO	APLICACIÓN
Inulinasa	Piña y pencas de <i>A. tequilana</i>	<i>Aspergillus</i> <i>Kluyveromyces</i>	Producción de fructosa
Fructanasa	<i>A. tequilana</i>	<i>Kluyveromyces</i>	Producción de bioetanol
Pectinasa	Piña de <i>A. tequilana</i>	<i>Aspergillus niger</i>	Jugos de frutas y textiles

Dada la composición del bagazo de agave para producción de Tequila, lo hace potencial para obtener enzimas como celulasas, inulinasas, xilanasas, lacasas y pectinasas.

Se han hecho estudios para obtener lacasas a partir de la lignina usando hongos del género *Pleurotus* (hongo de pudrición blanca). Dichas enzimas pueden facilitar el ataque enzimático de otros tipos de enzimas cuya finalidad sea el de transformar la materia vegetal en azúcares fermentables.

Dado el alto contenido de celulosa contenido del bagazo, lo hace útil en la obtención de celulasas y/o para obtención de azúcares fermentables los cuales pueden ser

usados en la obtención de otras materias como el bioetanol, bioturbosina, polímeros biodegradables, etc.

4.4.6. Polímeros biodegradables.

Para iniciar este tema hay que definir biodegradable y degradable, ya que, aunque los dos términos tienen parecido, no son iguales.

Se le conoce como polímero biodegradable a todo aquel polímero que bajo condiciones naturales se degradan en un periodo corto de tiempo, como por ejemplo al estar sometido a condiciones tales como microorganismos, hongos, etc.; para generar subproductos como gases (CO_2 , N_2), sales inorgánicas, nueva biomasa; y así reincorporarse al medio ambiente.

En palabras de Aradilla Zapata, Oliver Pujol y Estrany Coda, (2012), definen degradación y biodegradación de la siguiente manera:

“Por degradación de un polímero se entiende aquel cambio en su estructura química que conlleve una modificación apreciable de sus propiedades. Lo que se pretende con los polímeros degradables es que se mantengan las propiedades durante el periodo de utilización del polímero y un posterior cambio de su estructura química para descomponerse en componentes compatibles con el medio ambiente.

En el caso de la biodegradación, se trata de un proceso de degradación química llevado a cabo por agentes biológicos (enzimas, bacterias y microorganismos). En concreto, la biodegradación producto de la exposición ambiental implica la acción de microorganismos y tiene como consecuencia una reducción del grado de polimerización, así como la degradación del polímero en fragmentos orgánicos simples.” (Aradilla Zapata et al., 2012).

En palabras resumidas: la biodegradación es una reacción enzimática.

Para que un polímero sea biodegradable debe tener como principal característica que en su composición química se encuentren grupos funcionales de tipo éster, amida y/o éter.

Lo que se busca con los plásticos biodegradables, es generar un menor impacto ecológico, comparado con los plásticos ya convencionalmente usados actualmente.

La organización European bioplastics define a los bioplásticos como plásticos que son biobasados, biodegradables, o que reúnen ambas características (European Bioplastics, 2018). Según la European bioplastics, define estos materiales de la siguiente manera:

- **Biobasado:** material o producto es derivado parcialmente o totalmente de biomasa (plantas). Algunos de los actualmente usados por ejemplo son los provenientes de residuos de caña de azúcar, maíz o celulosa.
- **Biodegradable:** Biodegradación es un proceso químico durante el cual los microorganismos disponibles en el ambiente convierten los materiales en sustancias naturales como agua, dióxido de carbono y composta (no son necesarios aditivos artificiales). El proceso de biodegradación depende de las condiciones ambientales presentes en el medio (por ejemplo, localización o temperatura, etc.), del material y de su aplicación.

La familia de los bioplásticos se divide en tres grupos según European bioplastics y de acuerdo al método de producción (Murali M. et al., 2013):

- **Plásticos bio-basados y biodegradables:** estos bioplásticos se sintetizan naturalmente a partir de plantas o animales, tal como es el caso de celulosa, almidón, proteínas, lignina, quitosano (chitosán), o enteramente sintetizados a partir de fuentes renovables tal como PLA (ácido poliláctico), PHA (polihidroxicanoatos), PHB (polihidroxibutiratos) y PBS (succinato de polibutileno).
- **Plásticos basados en fuentes fósiles y son biodegradables:** Estos polímeros son sintetizados a partir de fuentes de petróleo, pero son biodegradables al final de su vida útil, tal como es el caso de PBAT (Poli(Butilén Adipato-co-Tereftalato)), PCL (policaprolactona) y PVOH (polivinilalcohol o alcohol polivinílico).
- **Plásticos no biodegradables de base biológica (bio-basado) o parcialmente biológica:** estos polímeros están fabricados a partir de la combinación de plásticos biobasados y monómeros del petróleo, ejemplo de

ello podemos encontrar polímeros de Polietileno (PE), Polipropileno (PP) o Polientilentereftalato (*polyethylene terephthalate*, PET por sus siglas en inglés) de base biológica. Polímeros de rendimiento técnico como son PTT (poli(tereftalato de trimetileno)) o TPC-ET (copoliéster termoplástico).

Por ejemplo el PTT es fabricado a partir del ácido tereftálico derivado del petróleo y del 1,3-propanodiol de base biológica (maíz).

La biodegradabilidad de este tipo de plásticos depende de su naturaleza química y no de la fuente.

Así los plásticos se pueden acomodar en un sistema coordinado (Figura 18) de acuerdo en su origen y biodegradabilidad.

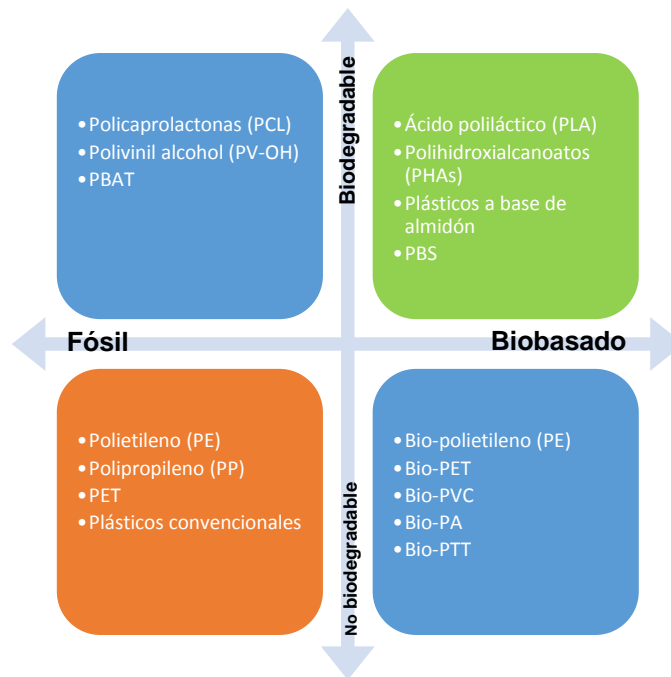


Figura 18. Ejemplos de polímeros acomodados de acuerdo a origen y biodegradabilidad (Vázquez Morillas et al., 2018; European Bioplastics, 2018).

“Es importante señalar que el origen biobasado de un plástico no implica que éste sea biodegradable. Aunque hay casos como el del PLA y PHA que trataremos más adelante, en el que se reúnen ambas condiciones en un solo material, la biodegradabilidad de un plástico depende de su estructura química, y no del proceso o la materia prima mediante la cual se haya producido” (Vázquez Morillas et al., 2018).

Todos los plásticos biobasados son sintetizados por producción dentro de bacterias o por polimerización química (Murali M. et al., 2013).

Aunque los plásticos biodegradables ultimamente han despertado un interés importante como una opción para reducir la permanencia de los residuos plásticos a través de su bioasimilación, sobre todo para los plásticos de vida útil corta.

Debido a que el bagazo de Tequila cuya composición es lignocelulosa mayoritariamente, abre la posibilidad de utilizar el mismo como precursor de algunos polímeros biodegradables, tal como es el caso de PHAs y PLA.

Además, otro de los residuos en la producción del Tequila que podría aprovecharse para la producción de bioplásticos son las hojas obtenidas del corte de la piña, las cuales representan el 46% del total del peso de la planta *Agave tequilana* Weber variedad azul. Actualmente estas hojas se usan para generar composta o simplemente se almacenan quedándose sin usar, lo cual quiere decir, que casi la mitad de la planta es desperdiciada (Alemán-Nava et al., 2018). La composición de dichas hojas es casi similar al bagazo obtenido después de la extracción del jugo. Para el caso de dichas hojas 37% w/w representa celulosa, 19% w/w corresponde a hemicelulosa y 14.5% w/w lignina (Rijala et al., 2016). Actualmente dichas hojas son aprovechadas para uso textil, ya que de estas se obtienen fibras de mejor calidad y de mayor tamaño para dicho uso, además de que, al no representar un producto de importancia para la elaboración del Tequila, estas solo son recolectadas y quemadas. La humedad máxima de la fibra de las pencas es 14% en temporada seca (octubre-mayo) y de 18% para la temporada húmeda (junio-septiembre) (Sol y Agave de Arandas S.A. de C.V., 2017).

4.4.6.1. Ácido poliláctico (PLA).

El ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés) es un polímero que es tanto biobasado, renovable, como biodegradable y compostable, como ya se mencionó anteriormente, además de ser actualmente uno de los más utilizados, si es que de bioplásticos se trata.

Actualmente el ácido poliláctico de origen biobasado se obtiene de la glucosa obtenida de cosechas como el maíz, cassava y caña de azúcar (NatureWorks LLC, 2019). De esta última existen patentes en las cuales obtienen PLA a partir de los residuos de la caña de azúcar.

El PLA puede ser producido mediante tres procesos (Figura 19):

- 1) Policondensación directa del ácido láctico (Direct Polymerization o DP por sus siglas en inglés);
- 2) Polimerización por apertura de anillo de lactida (Ring Opening Polymerization, ROP por sus siglas en inglés);
- 3) Condensación azeotrópica deshidratante.

Aunque las dos primeras rutas son las más usadas y conocidas, la ruta más simple es por DP. Además, mediante el método ROP, se obtiene un polímero de bajo peso molecular, por lo que es importante adicionar agentes de acoplamiento para generar un polímero con un alto peso molecular, mejorando así sus propiedades.

La lactida es un precursor intermedio del método ROP, el cual se presenta en forma de dímero cíclico de ácido láctico. El PLA obtenido puede recibir dos nombres de acuerdo al precursor del cual provienen. Por lo general al bioplástico obtenido mediante su intermediario, la lactida, es conocido mediante el nombre de poliláctida, mientras que el obtenido mediante el método DP se le conoce como ácido poliláctico, aunque en esencia el producto final es el mismo, con sus respectivas propiedades.

Para producción de PLA es importante obtener primero ácido láctico (LA, por sus siglas en inglés), el cual puede ser obtenido a partir de la fermentación de azúcares.

El ácido láctico, conocido químicamente como 2-hidroxi-propanoico (nombre IUPAC), se obtiene ya sea biológicamente o químicamente y exclusivamente de la

fermentación de los azúcares y el bioplástico obtenido mediante este método se le conoce como ácido poliláctico.

Aunque en ocasiones el ácido láctico es obtenido para formar lactida y consecuentemente PLA.

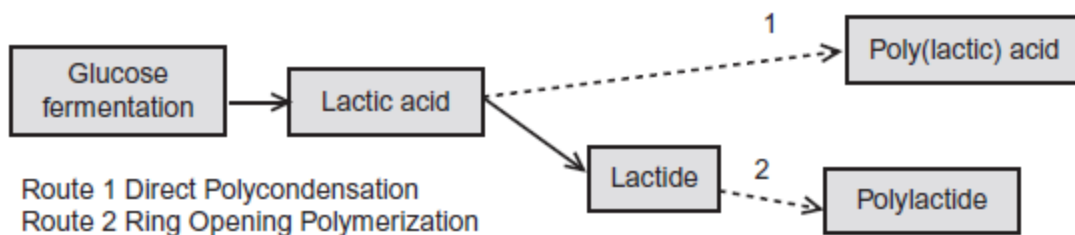


Figura 19. Ruta simplificada para la producción de ácido poliláctico a partir de la fermentación de glucosa (Tin Sin et al., 2013).

El ácido láctico, es una molécula quiral, presentando dos estereoisómeros: L-(-) y D-(+). Naturalmente se encuentra mayormente en su forma L, químicamente sintetizado se encuentra mixto. Es soluble en agua y biológicamente estable. Algunas propiedades para la producción del PLA pueden verse afectadas por la manipulación de la composición estereoquímica de los monómeros de PL, teniendo un efecto significativo en el punto de fusión, velocidad de cristalización, entre otras propiedades.

El peso molecular y rendimiento obtenido para el ácido poliláctico depende mucho de la pureza del monómero, haciendo que en la producción de este mismo se realice con una alta purificación, para obtener PLA con las mejores propiedades.

4.4.6.1.1. Obtención de ácido láctico a partir de glucosa.

De acuerdo a investigaciones es posible obtener ácido láctico como precursor de PLA a partir de los azúcares reductores obtenidos del bagazo. Dichos azúcares pueden ser obtenidos del bagazo mediante la fermentación de la glucosa.

De acuerdo a la estequiometría de la reacción de hidrólisis, por cada gramo de celulosa se producen 1.11g de glucosa, esto teniendo en cuenta una hidrólisis completa.

En las investigaciones realizadas por Montipó et al. (2016), para producción de ácido láctico, se produjeron 15.1 g de glucosa/L de los cuales se obtuvieron 15 g/L de ácido láctico después de 20 h usando como cepa *Lactobacillus rhamnosus* (7.1×10^7 CFU/mL).

Se utilizó el método de hidrólisis ácida presurizada a 175°C, 58.8 bar por 46 min usando HCl 0.8% o H₂SO₄ 2.2% (v/v). Bajo estas condiciones (Tabla 10), se obtuvieron 90.9 mg de glucosa/g de bagazo para la hidrólisis con HCl y 71.3 mg de glucosa/g de bagazo para la hidrólisis con H₂SO₄. Para los hidrolizados de HCl se obtuvieron 90.1 mg de ácido láctico/g mientras que para los hidrolizados de H₂SO₄ se obtuvieron 67.9 mg de ácido láctico /g después de aproximadamente 20 h de fermentación. (Montipó et al., 2016).

Tabla 10. Condiciones experimentales para la producción de glucosa y ácido láctico.

Hidrólisis ácida (% v/v)	mg Glucosa/g de bagazo t≈46 min p=58.8 bar T=175°C	Concentración de glucosa (g/L)	mg Ácido láctico/g t≈20 h
HCl 0.8%	90.95	15.16	90.1
H ₂ SO ₄ 2.2%	71.35	11.89	67.9

Elaboración propia con datos de Montipó et al., 2016, de acuerdo al experimento 5 de dicho artículo.

En el experimento 8 de la investigación realizada por Montipó et al. (2016), reúne las posibles condiciones requeridas en las que se puede obtener una degradación total de la glucosa, las cuales son: HCl 2.1% o H₂SO₄ 5.8% (v/v), T=175°C, t=94 min. En el experimento 14 se obtiene igualmente una degradación completa, a T=185. Por encima de estos parámetros (temperatura, medio ácido, tiempo) la eficiencia disminuye, resultado en la degradación de los azúcares, así como la formación de inhibidores. Tiempos menores a 30 min es ineficaz.

Para la fermentación a ácido láctico, se utilizaron condiciones a 37°C por t=168h. Para el caso del bagazo de Tequila, primero se hicieron estudios en residuos de cáscara de arroz (RH, Rice Husks por sus siglas en inglés), ya que para ambos se obtuvieron datos similares para obtención de glucosa; así que, para la producción y optimización de producción de ácido láctico se tomaron en cuenta las condiciones del experimento 4 aplicado a RH para los hidrolizados de bagazo de Tequila (15.32 g/L de sustrato y 1.62 g/L de polisorbato 80) (Montipó et al., 2016).

Para el caso de los hidrolizados de HCl y después de 20h se obtuvo una concentración máxima de 15 ± 0.1 g/L y un rendimiento de 90.1 mg LA / g de AB.

Para los hidrolizados de H₂SO₄ después de aproximadamente 20h de fermentación, se obtuvieron 11.3 ± 0.5 g/L y un rendimiento de 67.9 mg LA / g de AB.

De acuerdo a las pruebas realizadas con RH sugieren que para obtener la más alta concentración de LA es mejor un tiempo de 90h de fermentación.

4.4.6.2. Polihidroxialcanoatos (PHA's).

Otro tipo de polímeros biodegradable y biobasado son los polihidroxialcanoatos (PHA's), los cuales pertenecen a los poliésteres. Son actualmente objeto de estudio dado la amplia gama que hay, comprendiendo una gran familia.

Estos se obtienen mediante microorganismos los cuales, al ser sometidos a condiciones de estrés, esto es en condiciones nutricionales limitadas, por ejemplo, en nitrógeno, fosfatos y/o exceso de carbono; acumulan en su interior PHA a manera de gránulos para reserva energética como respuesta.

A continuación, se muestran los principales miembros de la familia de los PHA (Tabla 11), que de acuerdo a la Figura 20, donde x puede ser 1 o mayor y R representa hidrógeno o cadenas de hasta 16 carbonos.

Tabla 11. Principales estructuras de la familia de los PHA, basadas en la estructura química general de la Figura 20 (Alemán-Nava et al., 2018).

Nombre	Abreviación	Valor de x	Grupo R
Poli(3-hidroxipropianato)	P(3HP)	1	Hidrógeno
Poli(3-hidroxibutirato)	P(3HB)	1	Metil
Poli(3-hidroxivalerato)	P(3HV)	1	Etil
Poli(3-hidroxihexanoato)	P(3HHx)	1	Propil
Poli(3-hidroxiheptanoato)	P(3HHp)	1	Butil
Poli(3-hidroxiocetanoato)	P(3HO)	1	Pentil
Poli(3-hidroxinonanoato)	P(3HN)	-	Hexil
Poli(3-hidroxidecanoato)	P(3HD)	1	Heptil
Poli(3-hidroxoundecanoato)	P(3HUD)	1	Octil
Poli(3-hidroxidodecanoato)	P(3HDD)	1	Nonil
Poli(3-hidroxioctadecanoato)	P(3HOD)	1	Pentadecanoil
Poli(4-hidroxibutirato)	P(4HB)	2	Hidrogeno
Poli(5-hidroxibutirato)	P(5HB)	2	Metil
Poli(5-hidroxivalerato)	P(5HV)	3	Hidrogeno

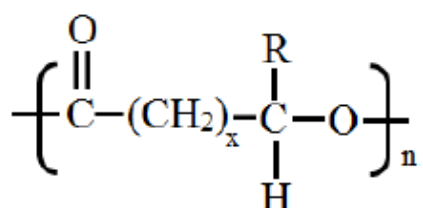


Figura 20. Estructura química general de los polihidroxicanoatos (PHAs) (Iqbal, 2015).

Dada la amplia cantidad de polímeros en la familia de los PHA, se clasifican de acuerdo al número de carbonos de la unidad monomérica del cual provienen. De esta manera quedan clasificados como:

- PHA de cadena corta, 3-5 carbonos (scl-PHA o short chain length);
- PHA de cadena media que contiene de 6-14 átomos de carbono (mcl-PHA o medium chain length);
- PHA de cadena larga, que contienen de 14 o más átomos de carbono (lcl-PHA o Long chain length).

Otra manera de clasificar es mediante la unidad estructural principal, la cual puede ser un homopolímero (formado por un solo monómero) o copolímero (más de un tipo de monómero).

Además, las propiedades físicas y mecánicas cambian de acuerdo al número de carbonos. De acuerdo a eso, los scl-PHAs son semicristalinos (60-80%), frágiles, rígidos, con baja permeabilidad a los gases y con buena resistencia a la humedad. Los mcl-PHAs al ser ramificados poseen una baja cristalinidad, temperatura de fusión (T_m) y transición vítrea. Debido a lo antes mencionado, le proporciona propiedades elastoméricas.

Por lo general los scl-PHAs pueden ser obtenidos mediante la fermentación de glucosa, dióxido de carbono y/o metanol, mientras que los scl-PHAs y mcl-PHAs se obtienen de la fermentación de ácidos grasos y/o aceites. (Abu Thabit et al., 2022).

Dentro de esta gran familia el PHB es el más caracterizado (scl-PHA).

Sin embargo, aunque es uno de los polímeros más comercializados presenta algunos cuellos de botella como es el costo de producción, el cual es más elevado considerando los plásticos provenientes de origen fósil. De acuerdo a Mostafa et al (2020) citado por Martínez Herrera et al. (2021), la capacidad de manufactura para PHB es de 30 000 toneladas por año (menos del 0.1% que representa la producción de PP), además el precio de la producción de PHB es de \$2.25-2.75 USD por libra, mientras que el costo de producción para PE y PP es de \$0.60-0.87 USD por libra. Otro punto a considerar son las características del PHB, ya que este es rígido y frágil, por lo que sus aplicaciones son limitadas al momento.

Una de las formas de reducir los costos de producción es usando la biomasa de lignocelulosa, dada su gran abundancia y bajo costo al representarse de un desecho. Haciendo uso de este material, se estima que se obtiene un ahorro del costo de producción de alrededor de 25-40%. Otra de las ventajas es que dicho proceso estaría dentro de las normativas de producción de cero basura, además de ser un proceso de economía circular y de carbono verde.

Algunos de los artículos que contiene información sobre la producción de PHA utilizando bagazo y otros residuos de la industria tequilera se muestran a continuación:

Tabla 12. Microorganismos utilizados en la producción de PHAs (Martínez Herrera et al., 2021).

Derivado de agave	Pretratamiento	Microorganismo	Tipo de PHA	Biomasa (g/L)	PHB (g/L)	% PHB	Referencia
Bagazo	No	<i>Saccharophagus degradans</i>	PHA		1.5		Alva y Riley, (2008)
	Hidrólisis ácida y carbón activado	<i>Burkholderia sacchari</i>	PHB	11.03	2.67	24.2	González García et al., (2019)
		<i>Achromobacter mucicolens</i>		2.6	0.23	20.4	Clifton García et al., (2019)
Jarabe y agavinas	No	<i>Bacillus cereus</i>		5.25	2.96	56.39	Martínez Herrera et al., (2020)
Vinazas		<i>Rhodopseudomonas pseudopalustris</i>		0.31		Franco León et al., (2021)	

En las investigaciones realizadas por González García et al. (2017) y por Clifton García et al. (2019), se utilizan hidrolizados de bagazo tequilero (TABH, por sus siglas en inglés), que han pasado por un tratamiento de tipo ácido. Dado a lo mismo y por la naturaleza del proceso se usó carbón activado para la eliminación de inhibidores y su posterior procesamiento para producción de PHA, en la investigación de Gonzalez Garcia et al. (2017), además se investigaron otras maneras de eliminar dichos inhibidores haciendo uso de lacasas y resinas, aunque el carbón activado fue el más efectivo de los métodos para eliminar inhibidores, reportando un 90% de efectividad de eliminación. Para la eliminación por carbón activado influyen factores como el pH de los hidrolizados (siendo más efectivo un pH ácido de alrededor de 2), puesto que a un pH más bajo ($\text{pH} < 4$) los ácidos

orgánicos (furfural, hidroximetilfurfural, ácido acético, ácido levulínico) y los compuestos fenólicos (vainillina, ácido cumárico, ácido ferúlico), no se encuentran en estado ionizado y ende a esto, pueden ser más fácilmente absorbidos por el carbón activado.

En esta investigación sobre todo se obtuvo xilosa como principal producto en la hidrólisis de la lignocelulosa (se obtuvieron 20.61 g/L de azúcares reductores), el cual es producto de la degradación de la hemicelulosa, dado que la celulosa es más difícil de descomponer en sus principales monómeros como lo es la glucosa. Es así que se obtuvo una relación 7:3 de xilosa (72%) y glucosa (28%) después de la hidrólisis acida. Sin embargo, la xilosa no es fácilmente metabolizable por microorganismos para producción de PHA, pero la bacteria utilizada en esta investigación (*Burkholderia sacchari*) tiene la capacidad para metabolizar la xilosa en la producción de PHB.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante esta investigación y de acuerdo con Palomo Briones et al (2018), se pueden visualizar los pasos fundamentales para obtener diversos productos de interés, los cuales incluyen:

- **Acondicionamiento del material lignoceluloso.**

Incluye lavar el bagazo para eliminar compuestos solubles formados durante la cocción de las piñas, el secado del material, así como la reducción del tamaño de partícula de las fibras mediante pulverizado mecánico (0.5-15 mm), ya que un tamaño de partícula menor aumenta la eficiencia de las hidrólisis consecuentes. Además, se necesita tamizar el material pulverizado para permitir un tamaño de partícula uniforme.

- **Deslignificación.**

Un tratamiento inicial para la eliminación de lignina, ya que esta representa una de las principales barreras, al mismo tiempo, la lignina puede incluso ser aprovechada para la obtención de otros productos.

Es así, que dentro de los tratamientos que remueven y eliminan lignina se encuentran procesos de tipo: alcalino, organosolv, alcalino oxidativo (NaOH-H₂O₂) y enzimático (lacasas). De este se obtienen una fracción soluble, correspondiente a la lignina y una fracción insoluble (celulosa y hemicelulosa). El fin de estos tratamientos es obtener lignina como subproducto y mientras que la celulosa y hemicelulosa se utilizan como fuente para biocombustibles y otros productos.

Otros métodos permiten remover hemicelulosa, dentro de los que se encuentran: hidrólisis acida, autohidrólisis (explosión al vapor), ILs, ozonólisis. La finalidad de estos es obtener una fibra rica en celulosa, utilizada en la obtención de bioetanol y además, se obtiene xilooligosacaridos como subproducto, para obtención de xilosa y a su vez esta pueda ser convertida en xilitol, mediante los tratamientos ya explicados.

- **Sacarificación y/o hidrólisis.**

La obtención de polisacáridos a partir de la celulosa y la hemicelulosa obtenidas de la fracción insoluble, y con una hidrólisis enzimática posterior (tratamientos de tipo biológico). De esta manera se obtiene una fracción líquida soluble rica en azúcares fermentables (hidrolizados), la cual es aprovechada para la obtención de los productos de interés, como es PLA, PHAs, ácido succínico y xilitol. La fracción sólida obtenida (fibras) se encuentra conformada por nanocristales y microcristales de celulosa, cuya parte puede ser aprovechada como fibra para la elaboración de composites de PLA y PHAs.

Sin embargo, en cada etapa se presentan algunos retos a vencer los cuales tienen repercusión en cuanto a tiempo y costos, como son:

- **Energía y tiempo implementado en el acondicionamiento.**

A menor tamaño de partícula deseada se requerirá más tiempo y energía.

Aunque es un paso crucial, se busca la manera de amortiguar dicho proceso encontrando maneras en la que el bagazo pueda ser bioconvertido sin un tratamiento previo, sin embargo, al momento es un paso crucial para obtener como ya se mencionó homogeneidad y altos rendimientos.

- **Generación de inhibidores.**

Estos podrían ser recuperados, sin embargo, esto aumentaría el costo de los procesos, pero si dichas fracciones pueden ser vendidas a industrias que se dediquen a procesarlas, quizás este costo pueda ser amortiguado, además, esto obedecería a los principios de la economía circular, en la que los desechos o subproductos de una industria puedan servir en beneficio de otra. Tal es el caso, por ejemplo, la producción de inhibidores como el furfural (considerado un químico de plataforma de acuerdo con la USDOE), en la obtención de productos como el ácido succínico o el xilitol, para el cual se pueden buscar alternativas que permitan separar este compuesto y, de ser posible, aprovecharlo como precursor en la producción de otros productos como los bioplásticos.

Dentro de los pretratamientos que producen mayor cantidad de inhibidores se encuentran los de tipo ácido, aunque es el tipo de tratamiento más utilizado, se

recomienda no someter el material lignocelulósico a temperaturas demasiado altas o por largos tiempos de reacción, para evitar que se generen dichos inhibidores.

Una de las maneras más utilizadas para eliminación de los inhibidores es mediante la utilización de carbón activado, puesto que tiene la capacidad de eliminar alrededor del 90% de los inhibidores.

- **Desarrollo de microorganismos y/o enzimas resistentes a los medios.**

Realizar estudios para el diseño de enzimas y microorganismos genéticamente modificados resistentes a los cambios en el medio y que sean capaces de resistir condiciones drásticas (pH, temperatura, presión, formación de compuestos tóxicos y concentración de sales), para optimizar y obtener los mayores rendimientos y conversiones a pesar de los inhibidores formados durante los procesos, al mismo tiempo evitando que la actividad de los microorganismos y enzimas sea fácilmente inhibida.

Sin embargo, la problemática aun presente con los inhibidores es que resulta más costosa la separación de éstos, que incluir microorganismos más resistentes al medio o simplemente eliminarlos mediante técnicas como la utilización de carbón activado. Una opción para amortiguar el impacto económico, en caso de separación de los inhibidores, es venderlos para ser utilizados para otros procesos en diversas industrias, aunque claro está, es necesaria la purificación de los mismos.

- **Tiempos de reacción largos.**

Hay procesos que aunque se pueden llevar horas, hay otros en los que dada la velocidad de la reacción se pueden llevar a cabo en días en incluso meses, tal es el caso de los tratamientos biológicos, dado el metabolismo de los organismos y algunas enzimas, aunque de estos tratamientos es posible obtener altos rendimientos, aunque no existan pretratamiento previos de la biomasa.

- **Purificación de los productos y optimización de materia prima.**

Lo más óptimo sería obtener productos cuya pureza sea máxima, sin embargo, esto representaría una inversión muy grande. Además, para permitir procesos menos contaminantes y óptimos se recomienda la recirculación, tal es el caso por ejemplo de hidrólisis ácida, en el que para aprovechar el ácido implementado en el proceso se recomienda la recuperación y reutilización del mismo.

- **Alto costo de equipos.**

Dado que algunos procesos de hidrólisis necesitan de equipo especial que soporte condiciones drásticas como son acidez y presión, esto aumentaría el costo de los equipos.

En la gran mayoría de pretratamientos se obtienen altos rendimientos para la producción de azúcares reductores, así como en la hidrólisis de la lignocelulosa, además la obtención de estos azúcares es de vital importancia para la producción de los ejemplos mencionados en este trabajo. Es así que se obtienen rendimientos que van desde 50% hasta 91% w/w en los que se refiere a la hidrólisis de la lignocelulosa. Además, se obtienen cantidades considerables de azúcares reductores, tal es el caso de la investigación de Caspeta et al. (2014), en donde se obtienen 225 g/L de glucosa con un rendimiento de 91% w/w.

En el estudio de Pérez Pimienta et al. (2019) y haciendo el escalamiento de los datos de optimización con la idea de un concepto de biorefinería, se determinó que, los rendimientos de glucosa y xilosa podrían ser de 41.3 y 13 kg por cada 100 kg de BAT no tratado, lo cual es equivalente a conversiones de glucano y xilano de 75.9% y 82.9% respectivamente. Esto significaría que más de la mitad del bagazo pueda ser aprovechado en la obtención de estos azúcares y a su vez, la xilosa obtenida puede ser aprovechada en la obtención de xilitol, así como la glucosa pueda ser aprovechada en la obtención de ácido láctico, aunque claro está, se necesita de purificaciones para la obtención de dichas fracciones.

En el Anexo C se resumen los tratamientos citados en esta tesis, en los que se pueden apreciar el porcentaje de rendimiento, así como la cantidad de azúcares reductores obtenidos de los mismos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta investigación abre el panorama para encontrar una serie de soluciones viables y sobre todo económicamente atractivas para tratar el bagazo originado por la elaboración del Tequila, pero sobre todo generando productos en especial aquellos que son materia prima de otros químicos (químicos de plataforma), esto es, aprovechar, como ejemplo, los inhibidores, resultado de ciertos procesos de tratamiento, mediante la idea de implementación de un esquema de biorrefinería.

A partir de la información generada de fuentes confiables se puede tomar una mejor decisión para saber qué hacer en torno al bagazo de Tequila, teniendo además el apoyo de ejemplos en el tratamiento del bagazo de caña y otros tipos de residuos, así como de especies parecidas al *Agave tequilana* weber var. azul, tal es el caso de la especie *Agave atrovirens*.

Se concluye que, no existe un pretratamiento definitivo, dada la complejidad de la lignocelulosa, pero dependiendo de lo que se desee obtener será el pretratamiento recomendado, ya que todos presentan diferentes finalidades. En cualquiera de los pretratamientos reportados se muestran altas tasas de rendimiento y conversión para los productos de interés.

Esta investigación enfocará de mejor manera el utilizar el bagazo de Tequila en la elaboración de productos de química verde como son el xilitol y el ácido succínico y cuya importancia tiene un impacto significativo al tratarse de precursores de base para otros procesos en auge como los biopolímeros, productos de la industria farmacéutica, alimenticia, solo por mencionar algunos potenciales usos.

Sin embargo, dada la enorme cantidad de residuos producidos por la industria tequilera, así como su tendencia al crecimiento de los mismos, la mejor opción sería no solo enfocarse en un único tratamiento para generación de un solo producto, sino en una mezcla de procesos para darle un enfoque de biorefinería para la obtención de diversos productos de química verde.

Una idea podría ser, obtener polímeros como PLA mediante la fracción líquida obtenida de los procesos de tratamiento y utilizar una parte de la porción sólida como carga para generar un composito 100% obtenido del bagazo. Por lo mismo

se necesitaría realizar una investigación para saber si esto es posible, tanto económica como experimentalmente hablando.

Los bioplásticos obtenidos mediante la bioconversión del bagazo pueden ser utilizados como material de envase o embalaje de la misma industria tequilera o para fines de otras industrias, así como su respectiva reutilización hasta que su vida útil haya finalizado, reincorporado estos a manera de composta.

Una manera más congruente con la idea de economía circular, es mediante la utilización del bagazo en los bioplásticos, puesto que, al alcanzar su término de vida útil pueden ser reincorporados como composta y mediante el tratamiento especial del mismo, en los campos de cultivo, para ser nuevamente reincorporado al ciclo; aprovechando la misma en los campos donde se cultiva el agave para producción de Tequila, reduciendo a su vez el uso de agroquímicos.

Además, obedeciendo a los principios de economía circular, al utilizar el bagazo en la obtención de productos hace de este material aprovechable en un ciclo circular, y en donde los subproductos obtenidos durante y después del tratamiento de la lignocelulosa son aprovechados para la elaboración de otros productos en diversas industrias.

Por otro lado, en el caso de los inhibidores, obtenidos posterior a las hidrolisis de la biomasa, en vez de ser desechados y/o inactivados, puedan ser reintroducidos a otros procesos industriales. En estos casos se necesitarían analizar estudios más a fondo para aprovechar dichos compuestos, en vez de ser tratados como productos indeseables.

Además otra idea sería obtener carbón activado del mismo bagazo tequilero para eliminación de los inhibidores obtenidos en los distintos procesos de deslignificación o para aplicación en otros tipos de procesos en diversas industrias.

Asimismo, se recomienda realizar un estudio más detallado que permita el escalamiento de los respectivos procesos, así como la viabilidad económica de los mismos y estudios sobre el impacto ecológico que puedan tener, puesto que al tratarse de procesos cuya finalidad es generar el mínimo impacto ambiental, no significa que no lo causen, por ende, debe de ser menor al impacto que el ocasionado por fuentes convencionales.

Para este escalamiento se necesitaría encontrar tratamientos que permitan una alta conversión y que sean poco costosos y amables con el ambiente, y cumpliendo con las normas respectivas.

Además, se necesita también incentivar a micro, pequeñas, medianas y grandes empresas en el tratamiento del bagazo producido, buscando un beneficio tanto económico, como social y ambiental.

Aunque muchas de las ideas presentadas en la presente tesina son importantes y prometedoras, no es viable a corto plazo, debido a los bajos costos de los procesos convencionales y actualmente usados, y a problemáticas presentadas durante la conversión de la biomasa, sin embargo, con el tiempo estas ideas tomarán relevancia conforme se busquen maneras alternativas y mejora en los procesos de bioconversión, cumpliendo con los ideales de una economía circular, así como lo estipulado en los acuerdos internacionales.

Se recomienda realizar estudios cuantitativos, para determinar qué tan económica y ambientalmente son factibles las ideas recopiladas en el presente trabajo, puesto que solo se cumple con un objetivo cualitativo.

Al mismo tiempo también se plantean algunas ideas para tratar otros residuos en la producción del Tequila, como son las vinazas (etanol, biocombustible) y hojas (producción de enzimas)

7. REFERENCIAS

- Abu Thabit , N., Pérez Rivero, C., Uwaezuokec, O., & Ngwuluka, N. (2022). From waste to wealth: upcycling of plastic and lignocellulosic wastes to PHAs. *J Chem Technol Biotechnol*.
- Alemán-Nava , G., Gatti, I., Parra-Saldivar, R., Dallemand, J.-F., Rittmann, B., & Iqbal, H. (2018). Biotechnological revalorization of Tequila waste and by-product streams for cleaner production – A review from bio-refinery perspective. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3713-3720.
- Aradilla Zapata, D., Oliver Pujol, R., & Estrany Coda, F. (marzo de 2012). Polímeros biodegradables: una alternativa de futuro a la sostenibilidad del medio ambiente. *Técnica Industrial*(297), 76-80. Recuperado el 22 de sep de 2019
- Arrizon, J., Mateos, J., Sandoval, G., Aguilar, B., Solis, J., & Aguilar, M. (2012). Bioethanol and xylitol production from different lignocellulosic hydrolysates by sequential fermentation. *Journal of Food Process Engineering*, 35, 437-454. Recuperado el 4 de oct. de 2018
- BASF and Corbion. (s.f.). *Succinity*. Recuperado el 22 de sep de 2018, de <http://www.succinity.com/>
- Bautista Justo, M., García Oropeza, L., Barboza Corona, J., & Parra Negrete, L. (Agosto de 2001). El Agave tequilana Weber y la producción de Tequila. *ACTA UNIVERSITARIA*, 11(2), 26-34.
- Caballero Martínez, K. S. (2010). Evaluación de la producción de bioetanol a partir de residuos de malta.
- Cámara Nacional de la Industria del Tequila. (Julio de 2018). *El Tequila*. Obtenido de http://www.tequileros.org/main_es.php#.
- Caspeta, L., Caro Bermúdez, M., Ponce Noyola, T., & Martinez, A. (2014). Enzymatic hydrolysis at high-solids loadings for the conversion of agave bagasse to fuel ethanol. *Applied Energy*(113), 277-286. Recuperado el 12 de feb de 2020

- Caza Sauza. (9 de junio de 2021). *Cómo se hace el Tequila* . Obtenido de Caza Sauza: <https://www.casasauza.com/fabricacion-tequila>
- Chandel, A., Garlapati, V., Singh, A., & Antunes . (2018). The path forward for lignocellulose biorefineries: Bottlenecks, solutions, and perspective on commercialization. *Bioresource Technology*, 264, 370-381. Recuperado el 15 de oct. de 2018
- CIATEJ. (2017). *Panorama del aprovechamiento de los Agaves en México*. Guadalajara, Jalisco, México: AGARED.
- Consejo Regulador del Tequila. (2019). *Proceso de elaboración de Tequila*. Recuperado el 7 de julio de 2021, de Consejo Regulador del Tequila (CRT): <https://www.crt.org.mx/index.php/es/el-tequila-3/elaboracion-normativa/63-proceso-de-elaboracion-de-tequila>
- Consejo Regulador del Tequila. (05 de julio de 2022). *Información estadística*. Obtenido de <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/>
- Consejo Regulador del Tequila y Centro Mario Molina. (2016). *Estrategia de sustentabilidad de la Cadena Agave-Tequila*. Recuperado el 21 de diciembre de 2022, de https://www.crt.org.mx/images/Documentos/Estrategia_Sustentabilidad.pdf
- Cornejo Trujillo, R. (21 de junio de 2017). *¿Que hace un técnico destilador de Tequila?* Recuperado el 12 de julio de 2021, de Tequila Sauza: <https://www.casasauza.com/procesos-tequila-sauza/maestro-destilador-tequila>
- Corona-González, R. I., Varela Almanza, K. M., Arriola Guevara, E., Martínez Gómez, Á., Pelayo Ortiz, C., & Toriz, G. (2016). Bagasse hydrolyzates from Agave tequilana as substrates for succinic acid production by *Actinobacillus succinogenes* in batch and repeated batch reactor. *Bioresource Technology*(205), 15-23.

- Cortínez Villalobos, V. (Enero de 2010). Comparación de pretratamientos en residuos forestales para la producción de bioetanol de segunda generación: hidrólisis ácida y líquidos iónicos. Santiago de Chile, Chile.
- CRT. (2018). *Elaboración y normativa. Proceso de elaboración del Tequila*. Recuperado el 18 de sep de 2018, de https://www.crt.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=317
- DOF. (2012). *Norma Oficial Mexicana NOM-006-SCFI-2012, Bebidas alcohólicas-Tequila-Especificaciones*. Recuperado el 10 de sep de 2018, de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5282165&fecha=13/12/2012
- Echeverría Arjonilla, L. (noviembre de 2013). Materiales biocompuestos para el diseño ecológico. Caso de estudio: Fibras de Bagazo de Agave tequilana como agente de refuerzo para el biopolímero PLA. Tesis de Maestría en Diseño Industrial. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *Economía circular*. Recuperado el 18 de enero de 2023, de Ellen MacArthur Foundation: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto>
- Escalera Martínez, A. M. (septiembre de 2015). Aprovechamiento del bagazo de agave tequilero en la elaboración de precursores de vainilla. *Tesis de maestría*. Jiquilpan, Michoacán, México: Instituto Politécnico Nacional.
- European Bioplastics. (2018). *What are bioplastics?* Obtenido de European Bioplastics: <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>
- Gallardo Valdez, J. (2019). *Industria del Tequila y generación de residuos*. (CONACYT, Editor) Recuperado el 25 de sep de 2020, de Ciencia y Desarrollo: <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=287>
- González Abrego, D. O., Carpio Granillo, M., Zuno Cruz, F. J., & Sánchez Cabrera, G. (s.f.). *Líquidos iónicos: sales cuaternarias de amonio, compuestos que no pasan de moda*. Recuperado el 21 de septiembre de 2021, de

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo:

<https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icbi/n5/e1.html>

González García, Y., González Reynoso, O., & Nungaray Arellano, J. (08 de dic. de 2005). Potencial del bagazo de agave tequilero para la producción de biopolímeros y carbohidrasas por bacterias celulolíticas y para la obtención de compuestos fenólicos. *e-Gnosis [online]*, Vol. 3(Art.14). Recuperado el 01 de octubre de 2018, de <http://www.e-gnosis.udg.mx/index.php/e-gnosis/article/view/48/46>

Hernández Salas, J. M., Villa Ramírez, M. S., Veloz Rendón, J. S., Rivera Hernández, K. N., González César, R. A., Plascencia Espinosa, M. A., & Trejo Estrada, S. R. (2009). Comparative hydrolysis and fermentation of sugarcane and agave bagasse. *Bioresource Technology*(100), 1238–1245. Recuperado el 21 de dic de 2019

Howard, R., Abotsi, E., Jansen van Rensburg, E., & Howard, S. (Dec. de 2003). Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *African Journal of Biotechnology*, 2(12), 602-619. Recuperado el 11 de Oct. de 2018, de <http://www.academicjournals.org/AJB>

Instituto de Información Estadística y Geográfica. (23 de julio de 2021). *El Tequila, su paisaje y su valor económico*. Recuperado el 07 de julio de 2022, de STRATEGOS Revista Digital del Instituto de Información Estadística y Geográfica: <https://iieg.gob.mx/strategos/el-tequila-su-paisaje-y-su-valor-economico/>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (agosto de 2022). Economía circular y cambio climático. Curso introductorio. *Unidad 1. Marco conceptual*.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). *Conociendo la Industria del Tequila y Mezcal*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Recuperado el 07 de julio de 2022

- Iqbal, H. M. (2015). *Development of bio-composites with novel characteristics through enzymatic grafting. PhD Thesis*. London, United Kingdom: University of Westminster.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*(127), 221-232.
- Ledezma Orozco, E., & Rodríguez Castillejos, G. (mayo-jun de 2016). Usos y producción de xilitol: un dulce polialcohol. *CienciAcierta. Revista de divulgación Científica UAdeC*(46). Recuperado el 13 de nov de 2018, de <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2016/06/29/usos-y-produccion-de-xilitol-un-dulce-polialcohol/>
- Martínez Herrera, R. E., Rutiaga Quiñones, O. M., & Alemán Huerta, M. E. (2021). Integration of Agave plants into the polyhydroxybutyrate (PHB) production: A gift of the ancient Aztecs to the current bioworld. *Industrial Crops & Products*(174).
- Masahide, S., & Kurumi, O. (27 de may de 2021). Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass in Hot-Compressed Water with Supercritical Carbon Dioxide. *ACS Omega*, 6(22), 14252-14259. Recuperado el 16 de oct de 2021
- Michelena Álvarez, G. (15 de Oct. de 2018). Alternativas en el tratamiento de vinazas de destilerías de alcohol. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)*. Facultad de Química, UNAM.
- Montipó, S., Pedroso, G. B., Bevilaqua, D. B., Prestes, O. D., Corona González, R. I., & Martins, A. F. (2016). Building Block Lactic Acid from Rice Husks and Agave Bagasse. *Waste Biomass Valor*(7), 1495–1507. Recuperado el 5 de junio de 2020
- Murali M., R., Singaravelu, V., Manjusri, M., Sujata K., B., & Amar K., M. (2013). Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities. *Progress in Polymer Science*(38), 1653– 1689.

- Nájar, R. (29 de mar de 2017). *¿Cuál es la mejor manera de extraer el azúcar del agave?* Recuperado el 16 de julio de 2021, de Tequila Sauza: <https://www.casasauza.com/procesos-tequila-sauza/mejor-manera-extraerl-azucar-del-agave>
- Nájar, R. (28 de marzo de 2017). *Procesos de extracción de azúcar del agave.* Recuperado el 17 de ago de 2018, de Procesos del Tequila Casa Sauza: <http://www.casasauza.com/procesos-tequila-sauza/procesos-extraccion-azucar-agave>
- Nájar, R. (30 de marzo de 2017). *Ventajas del proceso de extracción suave de azúcares en el agave.* Recuperado el 16 de julio de 2021, de Tequila Sauza: <https://www.casasauza.com/procesos-tequila-sauza/proceso-extraccion-suave-azucars-agave>
- National Center for Biotechnology Information. (7 de Junio de 2021). *Inulin.* Obtenido de PubChem Compound Summary for CID 24763: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24763>
- NatureWorks LLC. (2019). *NatureWorks.* Recuperado el 4 de diciembre de 2019, de How Ingeo is made?: <https://www.natureworkslc.com/What-is-Ingeo/How-Ingeo-is-Made>
- Okorie, O., Salonitis, K., Charnley, F., Moreno, M., Turner, C., & Tiwari, A. (2018). Digitisation and the circular economy: A review of current research and future trends. *Energies*, 11(11).
- Palomo Briones, R., López Gutiérrez, I., Islas Lugo, F., Galindo Hernández, K. L., Munguía Aguilar, D., Rincón Pérez, J. A., . . . Razo Flores, E. (2018). Agave bagasse biorefinery: processing and perspectives. *Clean Techn Environ Policy*(20), 1423–1441.
- Pérez Pimienta, J. A., Icaza Herrera, J. P., Méndez Pérez, J. A., González Álvarez, V., Méndez Acosta, H. O., & Arreola Vargas, J. (2019). Mild reaction conditions induce high sugar yields during the pretreatment of Agave tequilana bagasse with 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate. *Bioresource Technology*(275), 78–85. Recuperado el 20 de feb de 2019

- Pérez Pimienta, J. A., López Ortega, M. G., & Sanchez, A. (2017). Recent developments in Agave performance as a drought-tolerant biofuel feedstock: agronomics, characterization, and biorefining. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*(11), 732–748. Recuperado el 8 de mayo de 2020
- Perez Pimienta, J. A., Lopez Ortega, M. G., Varanasi, P., Stavila, V., Cheng, G., Singh, S., & Simmons, B. A. (2013). Comparison of the impact of ionic liquid pretreatment on recalcitrance of agave bagasse and switchgrass. *Bioresource Technology*(127), 18-24.
- Quintana Vega, M. A. (diciembre de 2012). Aprovechamiento integral del bagazo de la piña de Agave tequilana Weber: caracterización de fracciones lignocelulósicas obtenidas por un proceso organosolv. *Tesis de Maestría*. Yautepec, Morelos, México: Instituto Politécnico Nacional.
- Rijala, D., Vancovb, T., McIntoshb, S., Ashwatha, N., & Stanley, G. (2016). Process options for conversion of Agave tequilana leaves into bioethanol. *Industrial Crops and Products*(84), 263-272.
- SAGARPA. (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030: Agave tequilero y mezcalero mexicano*. México. Recuperado el 03 de oct. de 2018
- Saucedo Luna, J., Castro Montoya , A. J., Martinez Pacheco, M. M., Sosa Aguirre, C. R., & Campos García, J. (2011). Efficient chemical and enzymatic saccharification of the lignocellulosic residue from Agave tequilana bagasse to produce ethanol by *Pichia caribbica*. *J Ind Microbiol Biotechnol*(38), 725–732. Recuperado el 28 de dic de 2019
- Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*(17), 48-56.
- Shuang Qi , T., Ren Yong, Z., & Zhi Cheng, C. (2018). Review of the pretreatment and bioconversion of lignocellulosic biomass from wheat straw materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 483-489. Recuperado el 23 de Oct. de 2018

- Sol y Agave de Arandas S.A. de C.V. (2017). *Fibra de Agave de bola. Especificaciones*. Recuperado el 4 de diciembre de 2019, de Sol y Agave Textiles: <http://fibrasdeagave.com/especificaciones-de-la-fibra-de-agave-de-bola/>
- Succinity. (octubre de 2016). *Biobased Polybutylene Succinate (PBS) – An attractive polymer for biopolymer compounds*. Recuperado el 11 de octubre de 2022, de nova-Institut GmbH: <http://bio-based.eu/downloads/biobased-polybutylene-succinate-pbs-an-attractive-polymer-for-biopolymer-compounds/>
- Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*(83), 1-11.
- Tin Sin, L., Razak Rahmat, A., & Wan Abdul Rahman, W. A. (2013). Synthesis and Production of Poly(lactic Acid). En *Poly(lactic Acid)* (págs. 71-107). ELSEVIER.
- Tiwari, S., & Baghela, A. (2020). Challenges and prospects of xylitol production by conventional and non-conventional yeasts. En *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering: Recent advances in application of fungi and fungal metabolites: Environmental and industrial aspects* (págs. 211-222).
- Vázquez Bolaños, T. R. (2012). Evaluación de la hidrólisis enzimática de bagazo de sorgo para la obtención de azúcares fermentables a etanol y efecto de diferentes pretratamientos. *Tesis de licenciatura*. Ciudad Universitaria Facultad de Química, Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vázquez Morillas, A., Espinosa Valdemar, R. M., Beltrán Villavicencio, M., & Velasco Pérez, M. (sep de 2018). *Bioplásticos y plásticos degradables*. (U. A. Metropolitana, Ed.) Recuperado el 28 de sep de 2019, de Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C.: <https://anipac.com/wp-content/uploads/2018/09/bioplasticos.pdf>

- Vidal, P. F., & Molinier, J. (1988). Ozonolysis of Lignin - Improvement of in vitro digestibility of Poplar Sawdust. *Biomass*, 1-17.
- Vyas, P., Kumar, A., & Suren, S. (1 de Enero de 2018). Biomass breakdown: A review on pretreatment, instrumentations and methods. *Frontiers In Bioscience-Elite*, 10, 155-174. Recuperado el 17 de Oct. de 2018
- Zavalza Navarrete, L. (2013). *Evaluación de la hidrólisis enzimática sobre el bagazo de la piña de Agave tequilana weber var. azul para la obtención de azúcares reductores*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zheng, Y., Lin, H., & T. Tsao, G. (1998). Pretreatment for Cellulose Hydrolysis by Carbon Dioxide Explosion. *Biotechnol. Prog.*(14), 890-896.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO A. Pretratamientos para materiales lignocelulósicos.

Tipo de pretratamiento	Efectos	Condiciones y/o características	Ventajas	Desventajas	
Físico	Pulverizado mecánico ¹	Reduce el tamaño de partícula y cristalinidad de lignocelulosa. Aumento del área de reacción.	Tamaños de partícula obtenidos: 0.2-2mm, 3-6mm	No se forman productos tóxicos, aumenta el área accesible a la lignocelulosa.	Alto consumo de energía, generando un alto costo de producción.
	Pirólisis ^{1,2}	Descompone la celulosa	T≤300°C; T>400°C p=1mmHg (a p de vacío), t≈20 min ZnCl ₂ o Na ₂ CO ₃ como cat.	Con hidrólisis ácida posterior se obtiene 80-85% conversión de celulosa a azúcares reductores y más de 50% de glucosa.	En la Pirólisis hay formación de residuos y productos volátiles.
Químico	Hidrólisis ácida (diluido) ^{1,2,3}	Hidrólisis de celulosa y hemicelulosa. No solubiliza lignina	T: 160-200°C y Cargas de sólidos: 5-10% sustrato/peso mezcla; a T=120-160°C y Cargas de sólidos: 10-40% sust/peso mezcla, Ac. H ₂ SO ₄ , HCl, HNO ₃ , acético al 1-5%	Rendimientos para hemicelulosa ≈80% a T _{alta} , económicamente favorable en la producción de xilosa	Alto costo de equipos. Químicos tóxicos y corrosivos. Formación de inhibidores. Neutralización del medio para t. enzimático posterior. Recomendación: recuperar el ácido y/o recircularlo al proceso.
	Hidrólisis ácida (concentrado) ^{1,3}		Ac. H ₂ SO ₄ o HCl a concentraciones entre 10-30% T: 170-190°C.	Rendimientos de glucosa ≈90%	

Químico	Hidrólisis alcalina ^{1,3}	Disminución de la cristalinidad de lignina y aumenta la disponibilidad de hemicelulosa y celulosa	Soluciones de NaOH o Carbonato de sodio al 2-5% p/v, T: 120°C, t: 90 min.	Degradación de azúcares menor al t. ácido	Formación de sales e inhibidores
	Ozonólisis ⁴	Degrada lignina y hemicelulosa parcialmente	T y p ambiente 4-6% de ozono/peso de material seco	No se producen residuos tóxicos	Alto costo debido al ozono, celulosa es parcialmente degradada Recomendación: 30% H ₂ O aguas arriba y el porcentaje de ozono recomendado para un proceso rentable.
	Deslignificación oxidativa ^{1,2}	Degrada la lignina. Solubilización de hemicelulosa Permite la conversión de celulosa en glucosa	Peroxidasa y H ₂ O ₂ al 2%, T: 20°C t: 8 horas.	Alta conversión para bagazo de caña: 50% lignina degradada y 85% de celulosa a glucosa. Conversión celulosa a glucosa de 95% @ T=95°C y t:24h	Alto costo
	Organosolv ^{1,2}	Eliminación de lignina y fraccionamiento de hemicelulosa	Metanol, glicerol, acetona, etileno, etilenglicol, trietilenglicol y alcohol tetrahidrofurfuril mezclado con ácidos	Rendimientos altos para producción de xilosa agregando ácido. Reciclado y reuso de ácidos. Producción de pocos sustratos	Formación de inhibidores. Remoción de solventes utilizados. Alto costo de inversión. Recomendación: reciclar ácidos,

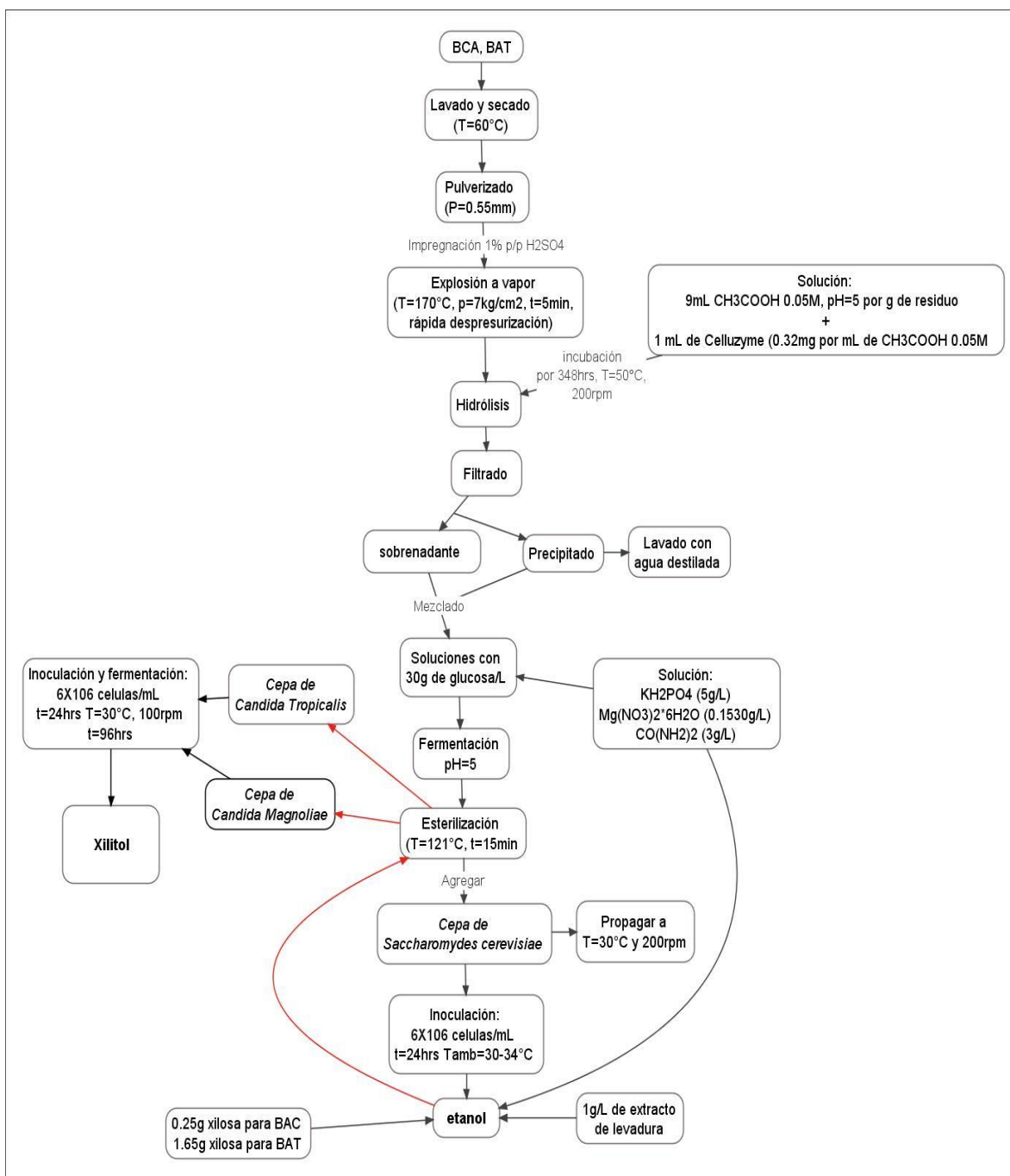
			<p>inorgánicos como HCl o H₂SO₄;</p> <p>T>185°C (cat. no necesario).</p> <p>A T_{baja} se pueden usar ácidos orgánicos (oxálico, acetilsalicílico, salicílico).</p>	de lignina residual	condensación y/o evaporación de solventes.
Químico	Líquidos Iónicos (IL) ¹	<p>Reducción de cristalinidad de celulosa y eliminación parcial de hemicelulosa y lignina.</p> <p>Extracción de la celulosa sin disolverla.</p> <p>Recuperación de lignina</p>	<p>Dependiendo del IL seleccionado para lo que se requiere.</p> <p>Disminución de cristalinidad de celulosa: IL con iones imidazolio, piridinio, fosfonio.</p> <p>Aniones de Br⁻ y sulfocionato (SCN⁻)</p>	<p>Baja presión de vapor por parte de los solventes utilizados, condiciones de reacción suave.</p> <p>Uso de mayores cargas de sólidos.</p> <p>Utilización de menores cargas de enzimas para t. enzimático posterior.</p>	<p>Alta toxicidad hacia la celulosa, costoso, complejidad de síntesis y purificación, escasa biodegradabilidad, inhibición de actividad enzimática.</p> <p>Regeneración de la celulosa con antisolventes.</p> <p>Recomendación: Recuperación de enzimas y reciclaje de las misma en t. enzimático posterior.</p>
Fisicoquímico	Explosión a vapor (autohidrólisis) ^{1,2,3}	Degradación de hemicelulosa y lignina, hidroliza celulosa	<p>V_{sat} a altas p</p> <p>T=160-260°C a p=0.69-4.83MPa</p> <p>Despresurización posterior a presión atmosférica.</p> <p>Optimo: T≈190°C y t=10min</p>	Bajo requerimiento de energía, bajo costo, bajo condiciones ácidas se evita la formación de inhibidores.	Destrucción de la xilosa obtenida, generación de compuestos inhibidores

Fisicoquímico	Explosión AFEX ^{1,2,3}	Eliminación de lignina. Aumento de la digestión de celulosa.	1-2 kg de amoniaco/ kg de biomasa seca t=30 min T=90°C.	No se producen inhibidores, recuperación del amoniaco utilizado, menos costoso, alta eficiencia y selectividad de reacciones con lignina. Conversión de 90% de celulosa de caña	No es eficiente para materiales con contenido mayor de lignina, Costo de amoniaco alto.
	Explosión con CO ₂ ^{1,2,5,6}	Eliminación de lignina	4kg CO ₂ /kg de biomasa	Sin inhibidores. Forma Acido carbónico incrementando así la tasa de hidrolisis	Rendimientos menor que AFEX y vapor
Biológico	Hidrólisis enzimática ^{1,2}	Específico de cada compuesto de lignocelulosa. Eliminación de lignina y hemicelulosas	Generalmente pH=4.8, T=45-50°C	Casi no se forman inhibidores, poco uso de energía, selectivo, ambientalmente amigable.	Largo tiempo de tratamiento, alto costo, se requiere de un tratamiento previo
	Hongos de pudrición blanca ²	Degradan lignina y parcialmente celulosa y hemicelulosa.	Condiciones ambientales	Se requiere de poca energía, altos rendimientos, ambientalmente amigable.	Largo tiempo del tratamiento.
	Hongos de pudrición parda ²	Degradación de celulosa y hemicelulosa y modificador de lignina			

Elaboración propia (2018), con información de:

1) (Cortínez Villalobos, 2010); **2)** (Sun y Cheng, 2002); **3)** (Zavalza Navarrete, 2013); **4)** (Vidal y Molinier, 1988); **5)** (Zheng, Lin, y T. Tsao, 1998) y **6)** (Caballero Martínez, 2010).

8.2. ANEXO B. Diagrama de proceso en la bioconversión de bagazo de Tequila y bagazo de caña de azúcar a etanol y xilitol.



Elaboración propia 2018, con información obtenida de Arrizon et al., (2012).

8.3. ANEXO C. Tabla resumen de pretratamientos para obtención de azúcares reductores y glucosa.

Origen de bagazo	Tratamiento	Condiciones y/o reactivos químicos	Rendimiento (%w/w)*	Azúcares reductores (g/L)	Glucosa	Fuente
<i>A. atrovirens</i> : Metzal (Mz) y Mezontete (Mt)	Explosión al vapor	T=121°C P=1.1kg/cm ² t=4h	5-9.9	19.45- 24.82	48 g/L	Hernández Salas y otros, 2009
	Ácido con explosión al vapor	HCl 1.2-2% v/v T=121°C P=1.1kg/cm ² t=4h				
	Alcalino	NaOH 2% w/v	12-58			
	Enzimático	Viscozyme, Celluclast, Novozyme, Cellubrix y Pulpzyme				
<i>A. Tequilana</i>	Ácido	2% H ₂ SO ₄ T=147°C t=15 min	73.6	41		Saucedo Luna et al., 2011
	Enzimático	rpm=100 t=72 h T=40°C Celluclast 1.5L derivado de <i>Trichoderma reesei</i> (celulasa) Novozyme 188 b-glucosidasa derivado de <i>Aspergillus niger</i> (celobiasa)				
<i>A. Tequilana</i> (en teoría)	Etanosolv	H ₂ O, Etanol y H ₂ SO ₄ al 10% w/v	91		225 g/L	Caspeta et al., 2014
	Enzimático	T=50°C, rpm=150 10 FPU/g 20 CBU/g t=72h				
<i>A. Tequilana</i>	Líquido iónico	1-ethyl-3-methylimidazolium acetate [C2mim][OAc]	45.5		6-17mg/mL	Perez Pimienta et al., 2013
	Líquido iónico	1-ethyl-3-methylimidazolium acetate ([Emim][OAc])			41.3kg/100k g ATB	Pérez Pimienta et al., 2019

*Entiéndase por rendimiento por cantidad de azúcares reductores obtenidos por bagazo en base seca (material sacarificable).