

Del laboratorio a la simulación: Evaluación de pretratamientos para la obtención de bioetanol a partir de residuos de brócoli.

From laboratory to simulation: Evaluation of pretreatments to obtain bioethanol from broccoli agrowaste.

Tomás Emiliano Soto Romo^{1,5}, Lourdes Arely Gerónimo Zavala^{2,5}, Yareli Romero González^{2,5}, Norma Alejandra Arias Camacho^{4,5}, María Fernanda Xochihua Naranjo^{4,5}, Cecilia Gabriela Falcón García^{3,5}, Carlos Eduardo Molina Guerrero^{1,5*}

¹Universidad de Guanajuato, División de Ciencias e Ingenierías. Lomas del Bosque 103, Col. Lomas del Campestre, León, C. P. 37150, Guanajuato, México.

²Universidad de Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Ingeniería Química, Noria Alta S/N, C. P.:36050, Guanajuato, México.

³Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Avenida Juárez No.77. Col. Centro. C.P 36000, Guanajuato, México.

⁴Universidad de Guanajuato, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Mutualismo S/N, C.P. 38060, Guanajuato, México.

⁵Bioprocess and Bioeconomy Research Group, División de Ciencias e Ingenierías. Lomas del Bosque 103, Col. Lomas del Campestre, León 37150, Guanajuato, México.
ce.molina@ugto.mx*

Resumen

El brócoli (*Brassica oleracea var. Italica*) es una de las hortalizas con mayor valor nutricional y es gracias a esto, que se encuentra entre los vegetales más consumidos a nivel mundial. Sin embargo, solamente se aprovecha alrededor del 30% de su peso total, dejando entonces una cantidad considerable de residuos agrícolas, los cuales pueden ser transformados en productos de alto valor agregado, aplicando así conceptos de la economía circular. El etanol, un biocombustible producido a partir de fuentes renovables como biomasa vegetal y residuos lignocelulósicos, ha surgido como una opción prometedora para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y así mitigar los efectos del cambio climático en nuestro planeta. El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de una simulación para tres biorrefinerías con alimentaciones de 50 Ton/día en el software SuperPro Designer v.12.0 para la producción de bioetanol utilizando residuos de brócoli. La simulación llevada a cabo permite modelar las diferentes etapas involucradas para la obtención de este biocombustible; como lo son el acondicionamiento de la biomasa que abarca la molienda y tamizado de esta, el pretratamiento que modifica la estructura de la materia prima para así obtener un mayor rendimiento en los siguientes pasos, la etapa de sacarificación y fermentación simultánea (SSF) que es donde los polisacáridos complejos se convierten en azúcares más simples con ayuda de la enzima Cellic CTec 2, que luego con la levadura se metabolizan y dan como producto etanol y CO₂ principalmente, para así llevar este último producto a la etapa final de destilación y recuperación del etanol. Se diseñaron 3 biorrefinerías que difieren en el pretratamiento teniendo un pretratamiento ácido (H₂SO₄), alcalino (NaOH) e hidrotermal. Como resultado de estas simulaciones se obtuvo que la biorrefinería propuesta con el pretratamiento hidrotermal fue aquella que presentó un mejor análisis ambiental y siendo, a su vez, capaz de producir 15.29 toneladas de bioetanol por día con una pureza del 99.68%. Los resultados de los indicadores ambientales para esta biorrefinería son $M_{CO_2} = 32.48$, $M_{Agua} = 1.435$ y $M_{RS} = 0.071$.

Palabras clave: Simulación; biocombustible; pretratamiento; brócoli; economía circular.

1. Introducción

La producción de brócoli se inició en México a consecuencia de la popularidad que gozaba en otros países, principalmente EUA, y como una oportunidad comercial ante la capacidad de producirlo a menor costo. La producción de vegetales en el centro del país está en crecimiento, siendo los estados con mayor participación en la región compuesta por Zacatecas, Michoacán, Aguascalientes, Querétaro, San Luis Potosí y Guanajuato; estos conforman una zona agroindustrial importante y tienen en el brócoli uno de sus principales productos.

En general, la evolución que ha tenido el cultivo del brócoli en México es positiva, ya que su producción se incrementó de manera gradual y sostenida durante el período 1990-2012, pasando de 155,485 ton a 334,550.99 ton cultivadas [1]. El estado de Guanajuato es el líder en la producción de brócoli en el país, se ubica por encima de Puebla con 46 mil 126 toneladas; Sonora, 32 mil 962 toneladas; Michoacán 29 mil 44 toneladas y Jalisco, con 22 mil 967. En 2022 se reportaron 24 mil 215 hectáreas establecidas en el estado de Guanajuato, con un rendimiento de 16.6 toneladas por hectárea. El mercado de este cultivo es para exportación, principalmente a Estados Unidos, por lo que genera una derrama económica muy importante para nuestra entidad [2]. Se estima que, de cada planta de brócoli en campo, solamente se aprovecha la inflorescencia que constituye alrededor del 30% de su peso total, por lo tanto, el 70% de la planta son residuos agrícolas que consisten en tallos de gran peso y hojas verdes (fig. 1), con posibilidad de ser aprovechadas para beneficio de diversas industrias como la alimentaria o farmacéutica [3].

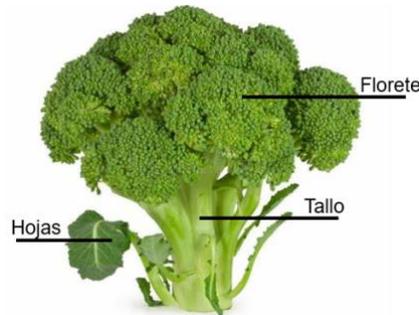


Figura 1. Partes del brócoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*).

Las crisis energética y ambiental son dos temas importantes para el desarrollo sustentable de las naciones. En los últimos años se ha aceptado que la dependencia del 80% de consumo de combustibles fósiles contribuyen al cambio climático global y agotamiento de sus fuentes naturales [4]. La convergencia en el tiempo de estos dos fenómenos: escasez de petróleo y cambio climático, es la causa principal por la que se necesita desarrollar combustibles alternativos para el transporte que no sólo no dependan del petróleo, sino tampoco del carbón ni del gas natural. Una de las opciones, que se está poniendo en práctica desde hace ya algunos años en diversos países, es la utilización de combustibles obtenidos a partir de la biomasa, denominados biocombustibles, con el objetivo de sustituir con ellos, de manera progresiva, los combustibles obtenidos de fuentes fósiles y, muy en particular, los carburantes líquidos. En la práctica, esos dos biocombustibles son el bioetanol, obtenido de cultivos como el maíz o la caña de azúcar, y el denominado biodiesel, obtenido a partir de aceites vegetales que provienen de cultivos como la soya, la colza o la palma aceitera. El argumento más extendido a favor del uso de los biocombustibles, desde el punto de vista ambiental, es que su consumo no produce emisiones de dióxido de carbono, porque la cantidad de éste, que se emite durante su combustión, es la misma que la planta utiliza durante su crecimiento. Es decir, se llega a un balance cero de emisiones [5].

En particular los residuos lignocelulósicos son considerados como una fuente de materia prima muy adecuado. La producción anual de materiales lignocelulósicos se estima que exceden 220 mil millones de toneladas en todo el mundo, equivalentes a 60-80 mil millones de toneladas de petróleo crudo. Por lo tanto, los materiales lignocelulósicos por su abundancia y bajos costos son atractivos para producir bioetanol [6]. Sin embargo, estos materiales necesitan de pretratamientos y/o tratamientos enzimáticos para hidrolizar la celulosa y hemicelulosa, obteniendo de esta manera monosacáridos u otros compuestos de menor peso molecular antes del proceso de fermentación anaerobia. La producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósicas implica cuatro etapas principales: pretratamiento, hidrólisis enzimática, fermentación y destilación. El pretratamiento es una etapa esencial porque modifica la estructura del material, para la obtención de bioetanol a partir de la biomasa lignocelulósica es necesario tener en cuenta el tipo de biomasa y del proceso de fermentación que se utiliza posteriormente para poder establecer el pretratamiento más adecuado. Se estima que el pretratamiento representa hasta un 30% del costo total de producción de bioetanol [7]. El pretratamiento hidrotérmico (HT), también conocido como auto hidrólisis, es un método de pretratamiento ecológico que consiste en someter la materia prima a alta temperatura y presión en un medio acuoso, lo que provoca la solubilización de la hemicelulosa y favorece la digestibilidad de la celulosa [8]. Por otra parte, es posible utilizar un pretratamiento alcalino, consiste en aplicar una solución de hidróxido de sodio, potasio o calcio a la biomasa lignocelulósica para remover la lignina y aumentar la accesibilidad de la celulosa y la hemicelulosa a las enzimas hidrolíticas [9][10]. El pretratamiento alcalino se puede realizar a temperatura elevada o ambiente, con o sin catalizador, a diferentes concentraciones y tiempos de reacción

[11]. Otro pretratamiento recurrente en las biorrefinerías es el que involucra soluciones diluidas de ácidos minerales (e.g., HCl o H₂SO₄); en especial, el pretratamiento con ácido sulfúrico es muy estudiado debido a su costo, disponibilidad en el mercado, y a su facilidad para hidrolizar la hemicelulosa y aflojar la estructura lignina-hemicelulosa que salvaguarda la celulosa [12]. Sin embargo, diferentes tipos de biomasa responden de maneras diferentes al pretratamiento ácido y por eso se deben llevar a cabo estudios para optimizar las condiciones de operación según la biomasa con la que se trabaje.

2. Metodología

2.1 Materia prima

El tallo de brócoli se utilizó como materia prima en esta investigación. La composición química del tallo de brócoli se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición del tallo de brócoli.

Componente	% base seca
Ceniza	10.24
Celulosa	35.238
Lignina	14.584
Agua	4.70
Hemicelulosa	35.238

2.2 Diseño del proceso

La simulación del proceso se realizó en el software SuperPro Designer v.12.0® (Intelligen, Inc., Scotch Plains, NJ, USA). Para lo cual se tomó como base un artículo en el que se evalúa una biorrefinería para la producción de bioetanol [13]. Se estudiaron, desarrollaron y evaluaron tres biorrefinerías para la obtención de etanol a partir del tallo de brócoli. El proceso consta de 4 etapas:

- i) Acondicionamiento (molienda)
- ii) Pretratamiento
- iii) Sacarificación y fermentación simultánea (SSF)
- iv) Recuperación de etanol

Siendo la etapa de pretratamiento la única etapa diferente en cada una de ellas. Para la primera biorrefinería se utilizó un pretratamiento hidrotermal; por su parte la segunda planta contó con un pretratamiento con una solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄), en la tercera y última se empleó una solución de hidróxido de sodio (NaOH). El diagrama de bloques del proceso de las plantas se puede observar en la figura 2, siendo este un diagrama de bloques del proceso de manera general recordando que solo difiere la solución empleada en el pretratamiento.

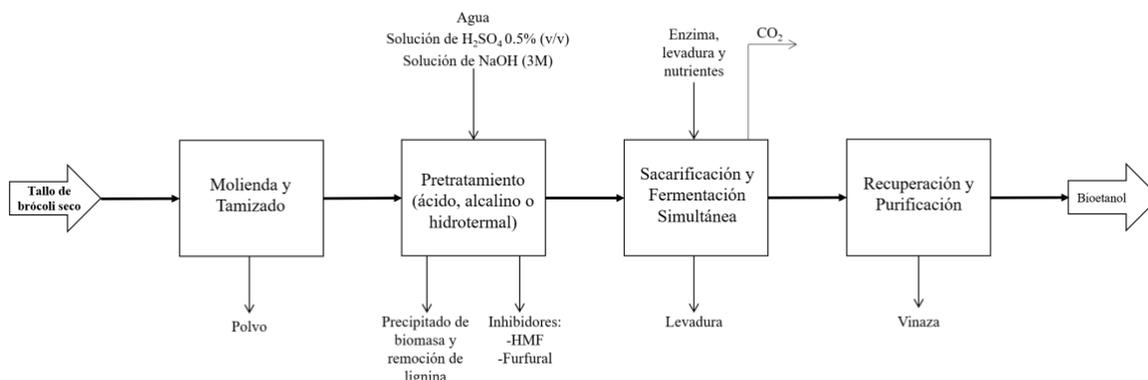


Figura 2. Diagrama de bloques de las biorrefinerías para la obtención de bioetanol a partir de residuos de brócoli.

2.3 Alimentación y Tiempo de Operación

Las plantas operarán en estado continuo 330 días por año y los 35 días restantes se dedicarán a funciones de mantenimiento. Se alimentan 50 toneladas métricas por día de tallo de brócoli.

2.4 Acondicionamiento de la materia prima

El tallo de brócoli se introdujo a un sistema de molienda en el que se redujo el tamaño de partícula a 0.5mm (unidad P-1/GR-101). Posteriormente se lleva un proceso de tamizado para clasificar los sólidos (unidad P-2/VSCR-101), se cuenta con un sistema de recirculación que permite recircular la materia prima que no logro reducirse (corriente S-106) con la ayuda de un transportador neumático (unidad P-3/PC-101). A continuación, la materia prima que alcanzó el tamaño de partícula deseado (corriente S-105) pasa a una cinta transportadora de tornillo (unidad P-5/SC-101) hacia el reactor de pretratamiento.

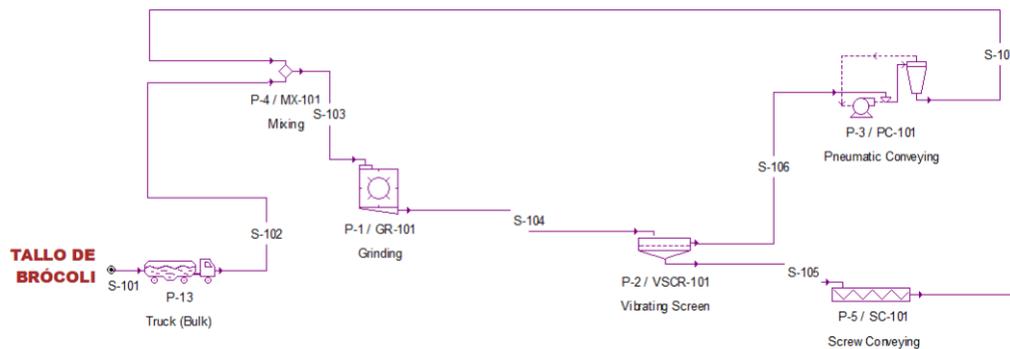


Figura 3. Diagrama de flujo de la sección de acondicionamiento en SuperPro Designer v.12.0.

2.5 Pretratamiento

Se consideraron tres configuraciones distintas en el pretratamiento de las biorrefinerías para evaluar el impacto ambiental. La primera configuración de biorrefinería (con pretratamiento hidrotérmico) consistió en la implementación de un reactor de pretratamiento (unidad P-6/R-101) en el cual entra la corriente S-108 que contiene nuestra materia prima seca junto con agua destilada en una relación 1:13, es decir, con una proporción de 1 gramo de materia prima seca por 13 mililitros de agua. La temperatura inicial fue de 68°C, pero con calentamiento se alcanzó la temperatura de operación de 195°C, el calentamiento tomó 24 minutos y se mantuvo el sistema en la temperatura por 30 minutos. Una aclaración importante debe hacerse con respecto a la etapa de enfriamiento puesto que a nivel experimental tomó 4 horas para que se alcanzará la temperatura ambiente mediante convección forzada, sin embargo, para la simulación se realizó la suposición de que la planta contará con un equipo que permitirá el enfriamiento de la biomasa en 20 minutos, por lo tanto, el tiempo de total es de 74 minutos.

En la segunda configuración de biorrefinería se lleva a cabo un pretratamiento ácido. Se hizo uso de un reactor de pretratamiento (unidad P-6/R-101) en el cual entra nuestra corriente S-108 que contiene la materia prima seca, además de una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 0.5% v/v con una relación de 1:13, es decir, con una proporción 0.01Kg de materia seca por 0.13 litros de solución, teniendo una temperatura de operación de 121°C por un tiempo de retención de 60 minutos a presión de 15 psi, de acuerdo con los datos experimentales obtenidos en laboratorio. Terminado el pretratamiento la materia prima pasa por un equipo de lavado (unidad P-11/WSH-101) teniendo una relación de lavado 1:39, este equipo se encarga de eliminar el ácido, de igual manera se elimina el 90% de lignina, así como un poco de celulosa y hemicelulosa debido a un precipitado de biomasa que se pudo observar en el laboratorio. La consideración anterior se aplicó a las tres simulaciones.

Como última configuración, se cuenta con el pretratamiento alcalino que implica el uso de bases, en este caso se hizo uso del reactivo Hidróxido de Sodio (NaOH). Los pretratamientos alcalinos aumentan la digestibilidad de la celulosa y son más efectivos para la solubilización de la lignina, exhibiendo menor solubilidad la celulosa y hemicelulosa en comparación con los pretratamientos ácidos [14]. La corriente S-109

que contiene nuestra materia prima entra a un reactor de pretratamiento (unidad P-6/R-101) junto con una solución de NaOH al 3M con una relación 1:13, teniendo una temperatura de operación de 121°C por un tiempo de 60 minutos a presión de 15 psi, de acuerdo con datos experimentales obtenidos en nuestro laboratorio. Una vez terminado el tiempo de residencia la materia prima pretratada pasa por la unidad P-11/WSH-101 teniendo una relación de lavado 1:39, aplicando la consideración antes mencionada.

Tabla 2. Parámetros de operación para el reactor de pretratamiento hidrotermal, ácido y alcalino.

	Temperatura [°C]	Presión [psia]	Tiempo [min]	Relación del tallo de brócoli y solución [v/v]
Hidrotermal	190	182	74	1:13
Ácido	121	15	60	1:13
Alcalino	121	15	60	1:13

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la etapa con los equipos utilizados y las corrientes descritas anteriormente.

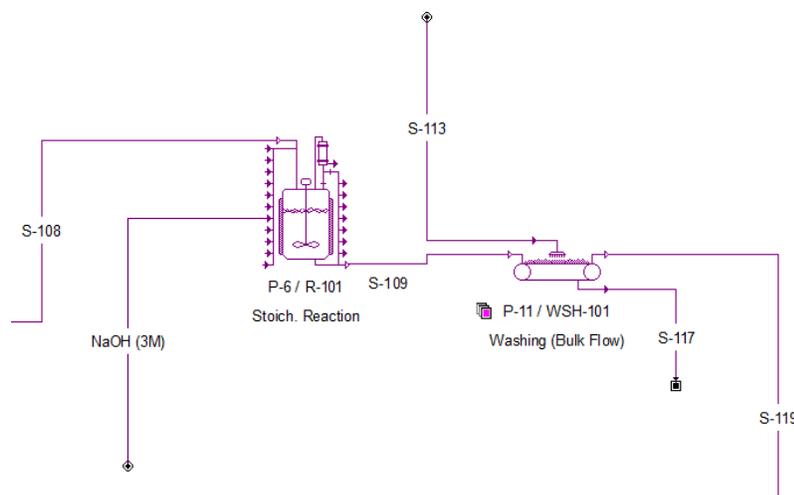
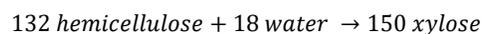
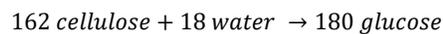


Figura 4. Diagrama de flujo de la sección de pretratamiento en SuperPro Designer v.12.0.

En el reactor de pretratamiento R-101 (unidad P-6) se llevan a cabo las siguientes reacciones:



La primera reacción tiene una conversión del 79% y la segunda de 80%.

2.6 Sacarificación y Fermentación

Posteriormente, a la etapa de filtrado y lavado se conduce a la etapa de sacarificación y fermentación simultánea (SSF por sus siglas en inglés: Simultaneous Saccharification and Fermentation), se utiliza un solo reactor para la sacarificación y fermentación (unidad P-9/FR-101), a pesar de ser procesos interdependientes se llevan de manera simultánea en la SSF. Las condiciones de operación que se utilizó son: Temperatura 50°C con un tiempo de residencia de 48 horas, pH hidrotermal 4.62, pH ácido 2.96, pH alcalino 10.19, concentración de levadura 1 g/L, concentración de enzima: la concentración Cellic Ctec2 es de 10 a 30 FPU por g de sustrato, Seguidamente, la corriente S-111 es introducida a un equipo de filtración al vacío (unidad P-7/RVF-

101), nuestro contenido es lavado con agua con el fin de separar la levadura por la corriente S-116 para su posterior reutilización. La corriente S-114 pasa a la etapa de recuperación de etanol producido.

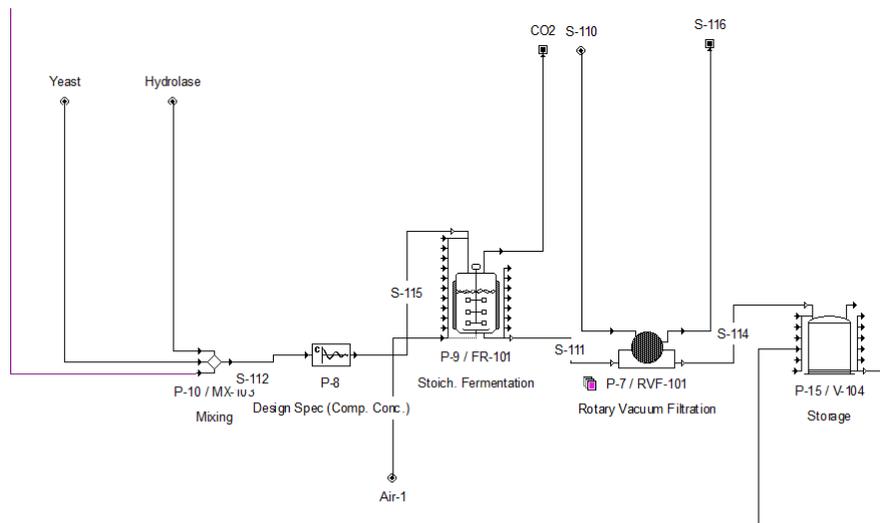
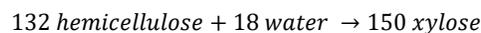
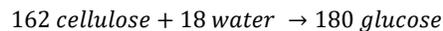
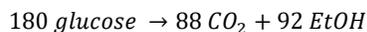
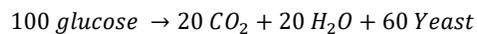
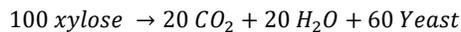


Figura 5. Diagrama de flujo de la sección deSSF en SuperPro Designer v.12.0.

En el bloque FR-101 (unidad P-9) se llevan a cabo las siguientes reacciones de manera paralela. Se muestran los coeficientes estequiométricos en base másica.



Esta etapa del proceso se simuló introduciendo la concentración de azúcares que se debía alcanzar como especificación de diseño, tomando como base las concentraciones obtenidas en el laboratorio. De acuerdo con los datos experimentales obtenidos en laboratorio, la concentración de azúcares reductores (mg/mL) mediante el pretratamiento hidrotérmico fue de 3.6219, en el pretratamiento con H_2SO_4 fue de 1.7968 y, por último, en el pretratamiento con NaOH fue de 3.4718. Además, se realiza la suposición de que los azúcares son fermentados de forma completa, ignorando el efecto de los inhibidores como el HMF o el Furfural, los cuales se forman en la etapa del pretratamiento debido a la deshidratación de la celulosa y hemicelulosa.

2.7 Recuperación del etanol

Enseguida de la etapa de SSF se conduce a la última etapa, etapa de recuperación. El caldo obtenido se conduce hacia un intercambiador de calor con múltiples entradas y salidas (unidad P-16/HX-102). A posteriori se envía el caldo a la columna de cerveza (unidad P-14/C-101) esta columna nos ayuda a separar el bioetanol del caldo. El bioetanol obtenido posee una gran cantidad de agua, por lo tanto, se rectifica la corriente S-121 para reducir la cantidad de agua en una columna de rectificación (unidad P-12/C-102) regresa a nuestra unidad P-16 para posterior salir por la corriente S-126 que se introdujo por un cooler (unidad P-17/HX-1001) saliendo por la corriente S-118. La corriente S-118 pasa por un absorbedor (unidad P-23/GAC-101) donde se aumenta la concentración del bioetanol. La corriente S-128 contiene el producto final. En la sección de resultados se analiza la concentración y la producción de cada una de las tres plantas propuestas.

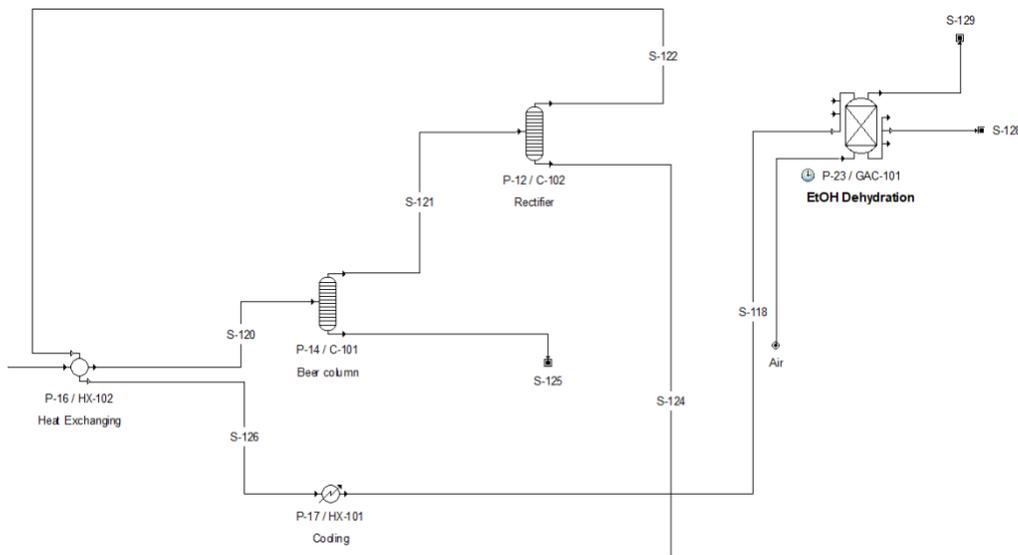


Figura 6. Diagrama de flujo de la sección de recuperación del etanol en SuperPro Designer v.12.0.

2.8 Método de análisis bidimensional

El método de análisis bidimensional implementado en este trabajo se basó en lo reportado en la tabla 4. El Análisis se realizó en cada una de las biorrefinerías con una capacidad de 50 Toneladas métricas por día. Brevemente, el método de análisis bidimensional se compone de cuatro elementos: (i) un diseño de planta conceptual, (ii) aplicación del método de análisis de procesos (PAM), (iii) un análisis de indicadores, y (iv) un proceso de pesaje. Sin embargo, nuestro análisis solo abarca como indicadores el Dominio ambiental; los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos, consumo de agua y cantidad de residuos sólidos producidos.

Tabla 3. Valores Métricos para esquemas de biorrefinería adaptados a partir de [15].

Indicador	Métrica	Generación de impacto interno	Receptores de impacto externo	Cuestiones
Dominio Ambiental				
Emissiones GEI	$M_{CO_2} = \frac{gCO_2 eq}{MJ_{salida}}$	SSF	Población mundial	Calentamiento global por GEI
Consumo de agua	$M_{Agua} = \frac{L_{agua}}{MJ_{salida}}$	Proceso de producción (operación de la planta)	Población local	Consumo De agua
Cantidad de residuos sólidos producidos	$M_{Rs} = \frac{kg_{residuos sólidos}}{MJ_{salida}}$	Proceso de producción (operación de la planta)	Población local	Depósito de basura

El contenido energético de una sustancia, como el etanol, puede calcularse utilizando su calor de combustión. El calor específico de combustión representa la cantidad de energía liberada cuando una sustancia sufre una combustión completa. En el caso del etanol (C_2H_5OH), el calor específico de combustión es de aproximadamente 29.78 MJ/kg [16].

$$\left(29.78 \frac{MJ}{kg}\right) \left(1000 \frac{kg}{Ton}\right) = 29780 \frac{MJ}{Ton EtOH}$$

Es decir, que 1 tonelada métrica de etanol produce aproximadamente 29780 MJ.

3. Resultados y Discusión

3.1 Análisis ambiental

Un análisis ambiental exhaustivo proporciona información valiosa sobre los posibles efectos negativos que una biorrefinería podría tener en el medio ambiente local y global. Los indicadores utilizados nos proporcionan información sobre la evaluación de aspectos como la calidad de aire (emisiones GEI), el agua y los residuos sólidos que nuestras biorrefinerías producen. La Tabla 4, nos muestra los valores numéricos obtenidos en nuestra simulación para el próximo cálculo de los indicadores ambientales.

Tabla 4. Datos extraídos de las simulaciones (50 Ton/día) para el cálculo de los indicadores ambientales.

Pretratamiento	% pureza másica	Ton/día	MJ _{salida} /día	g CO ₂ eq/día	L _{agua fresca} /día	kg _{residuos sólidos} /día
Hidrotermal	99.68	15.29	455282.89	14786121.98	653460.51	32476.29
Ácido	99.62	12.68	377606.23	13294349.09	2576402.52	34478.47
Alcalino	99.71	15.26	454334.40	14753871.06	2539026.27	29454.03

Se demuestra en la Tabla 4 que el pretratamiento que produce mayor cantidad de bioetanol es en base al pretratamiento hidrotermal, seguido del alcalino (NaOH 3M) y el pretratamiento que genera menor producción es el ácido (H_2SO_4 al 0.5% v/v). La Tabla 5 presenta las métricas y los resultados para el dominio ambiental seleccionado en esta investigación. La figura 7 presenta la comparación de las distintas biorrefinerías simuladas en base a los indicadores ambientales, el M_{RS} representa la cantidad de residuos sólidos que produce la biorrefinería, el M_{Agua} nos habla sobre cuanto consumo de agua dulce procesa nuestra planta y el M_{CO_2} sobre las emisiones de gases de efecto invernadero que se emiten.

Tabla 5. Valores métricos y resultados para esquemas de biorrefinería.

Indicador	Métrica	Hidrotermal	Ácido	Alcalino
Dominio ambiental				
Emisiones GEI	$M_{CO_2} = \frac{gCO_2 eq}{MJ_{salida}}$	32.48	35.21	32.47
Consumo de agua	$M_{Agua} = \frac{L_{agua}}{MJ_{salida}}$	1.435	6.823	5.588
Cantidad de residuos sólidos producidos	$M_{RS} = \frac{kg_{residuos sólidos}}{MJ_{salida}}$	0.071	0.091	0.065

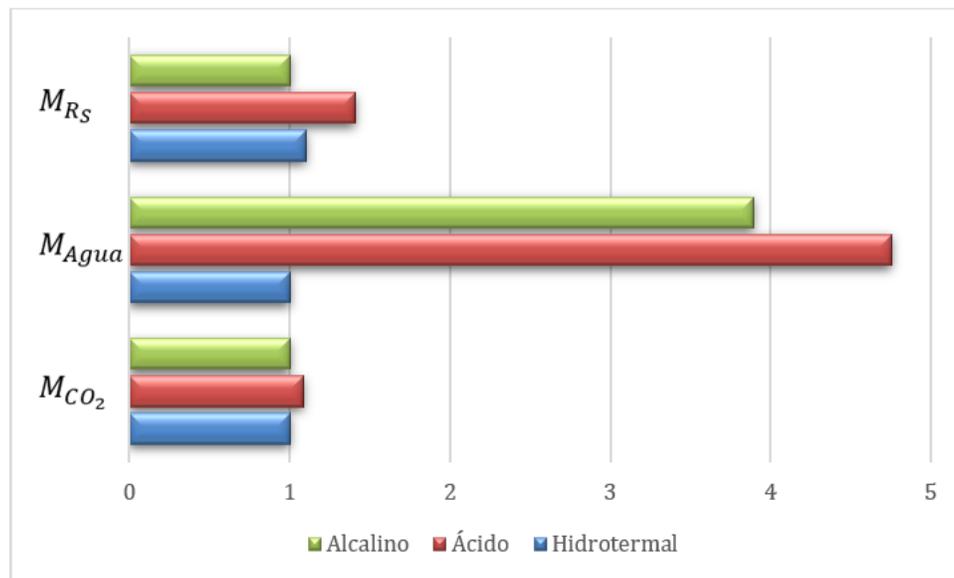


Figura 7. Análisis de indicadores para el dominio ambiental.

Se observa en la Tabla 4 que el pretratamiento alcalino es menor respecto a los otros dos pretratamientos (hidrotermal y ácido) en dos de las tres métricas empleadas. El pretratamiento ácido genera mayor cantidad de CO_2 esto se le puede atribuir a la alta generación de electricidad en la etapa de sacarificación y fermentación simultánea. A su vez, el pretratamiento ácido presenta un mayor consumo de agua dulce, además de ser el pretratamiento que genera mayor cantidad de residuos sólidos. También se observa que es mínima la diferencia, sin embargo, es considerable las emisiones de CO_2 que presentan los pretratamientos hidrotermal y alcalino. Por su parte, el pretratamiento hidrotermal presenta un menor consumo de agua dulce lo cual es favorable para la población local pero este pretratamiento genera mayor cantidad de residuos sólidos respecto al pretratamiento alcalino. Desde un punto de vista general en base al análisis ambiental el pretratamiento alcalino mostró un mejor resultado, seguido por el hidrotermal y finalizando con el pretratamiento ácido. Sin embargo, el que genera mayor producción de bioetanol es la biorrefinería con pretratamiento hidrotermal. Un punto clave que se debe tomar en cuenta es el hecho de que, tanto en el pretratamiento ácido como en el alcalino el manejo de residuos debe ser adecuado y seguir las normas correspondientes, lo que sin lugar a duda representa un costo extra en el proceso, pero sobre todo representa un contaminante más. Además, con pretratamientos químicos como lo son el ácido y el alcalino se debe introducir una etapa de lavado para disminuir el pH y así poder llevar a cabo las siguientes etapas del proceso, esto involucra una gran cantidad de agua, lo cual se puede ver reflejado en el indicador ambiental, siendo casi 4 o 5 veces más grande el correspondiente a las biorrefinerías con este tipo de pretratamiento. Ahora bien, también se debe indicar que el pretratamiento hidrotermal se lleva a cabo en condiciones de temperatura y presión altas como se pudo observar en la Tabla 2; esto implica dos cuestiones importantes, la primera es que alcanzar y mantener estas condiciones de operación es implica un costo muy elevado debido principalmente a los servicios puesto que el vapor de calentamiento debe alcanzar temperaturas altas y posteriormente la biomasa se debe enfriar para poder entrar a la etapa de sacarificación y fermentación simultánea, la segunda es que dichas condiciones de operación altas pueden propiciar una mayor formación de inhibidores como el furfural o el HMF.

4. Conclusiones

Este trabajo evaluó tres biorrefinerías, cada una de ellas con un método de pretratamiento diferente. A pesar de que el pretratamiento alcalino fue mejor a los otros dos pretratamientos estudiados en dos de las tres métricas para los indicadores ambientales, este sigue teniendo inconvenientes ambientales como su gran consumo de agua y el manejo de los residuos de hidróxido de sodio (mismos inconvenientes que presenta el pretratamiento ácido). Por su parte, el pretratamiento hidrotermal no cuenta con estas dificultades; además, tiene el mejor rendimiento y una pureza muy cercana a la obtenida para el pretratamiento alcalino. La biorrefinería de tallo de brócoli representa una prometedora iniciativa que aprovecha los residuos agrícolas

para la producción de bioetanol. Después de realizar un exhaustivo análisis ambiental, se puede concluir que esta biorrefinería tiene el potencial de presentar una solución y formar parte del fenómeno emergente de la economía circular, esto al aprovechar los tallos de brócoli, que a menudo se descartan como desechos. Esta conversión de biomasa en bioetanol puede ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a combatir la gran problemática del cambio climático que se vive actualmente. Además de tener un gran potencial de general beneficios en la población local al crear una nueva fuente de ingresos y empleo a partir de los residuos agrícolas, fomentando el desarrollo local y mejorar la economía regional. Sin duda, la biorrefinería de tallo de brócoli es un ejemplo destacado de cómo la investigación y la tecnología pueden converger para enfrentar futuros desafíos ambientales y energéticos. Su implementación podría abrir nuevos caminos para nuevas soluciones sostenibles y seguir avanzando con el fin de un mundo más verde. Se espera que este trabajo represente un área de oportunidades para futuras investigaciones.

Bibliografía/Referencias

- [1] Rocha Ibarra, Jesús Ernesto, & Cisneros-Reyes, Y. D. (2019). La producción de brócoli en la actividad agroindustrial en México y su competitividad en el mercado internacional. *Acta universitaria*, 29, e2156. Epub 11 de septiembre de 2020.
- [2] Permanece Guanajuato como el "rey del brócoli." (2023, February 10). Boletines Dependencias. <https://boletines.guanajuato.gob.mx/2023/02/10/permanece-guanajuato-como-el-rey-del-brocoli/>
- [3] Domínguez-Perles, R., Martínez-Ballesta, M. C., Carvajal, M., García-Viguera, C. & Moreno, D.A. 2010. Broccoli-derived by-products-a promising source of bioactive ingredients. *Journal of Food Science*. 75(4):C383-C392.
- [4] Xin M. G, Trably E, Latrille E, Carrere H, Steyer J. P. 2010. Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* (35) 10660-10673.
- [5] Pariente, J. P. (2016). Biocombustibles. Fondo de Cultura Económica.
- [6] Nanqi R, Aijie W, Guangli C, Jifei X, Lingfang G. 2009. Bioconversion of lignocellulosic biomass to hydrogen: Potential and challenges. *Biotechnology Advances* (27) 1051-1060.
- [7] Privada, U., Chacín, R. B., Nuñez, V., Luis, J., Belloso, R., Maracaibo, C., & Completo, N. (s/f). Microplanta para la producción de bioetanol combustible a partir de lignocelulosa. *Telematique, Volumen 16, edición 01*. Redalyc.org. Recuperado el 7 de julio de 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/784/78455666002.pdf>
- [8] Pino, M. S., Rodríguez-Jasso, R. M., Michelin, M., & Ruiz, H. A. (2019). Enhancement and modeling of enzymatic hydrolysis on cellulose from agave bagasse hydrothermally pretreated in a horizontal bioreactor. *Carbohydrate Polymers*, 211, 349-359.
- [9] Gracida Rodríguez, J. N., & Pérez-Díaz, B. (2014). Factores previos involucrados en la producción de bioetanol, aspectos a considerar. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(2), 213-227. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000200008
- [10] Constanza, Á., & Espinel, F. (s/f). REVISIÓN DE LOS PRETRATAMIENTOS ÁCIDO DILUIDO, ALCALINO Y AFEX APLICADOS A DIFERENTES TIPOS DE BIOMASAS. Edu.co. Recuperado el 7 de julio de 2023, de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69398/1075653148.2018.pdf?sequence=1>
- [11] Andrea, V., & Villalobos, C. (s/f). COMPARACIÓN DE PRETRATAMIENTOS EN RESIDUOS FORESTALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN: HIDRÓLISIS ÁCIDA Y LÍQUIDOS IÓNICOS. Uchile.cl. Recuperado el 7 de julio de 2023, de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102377/cf-cortinez_vv.pdf?sequence=3
- [12] Jung YH, Kim KH. Chapter 3 - acidic pretreatment. In: Pandey A, Negi S, Binod P, Larroche C, editors. *Pretreatment of Biomass*. Amsterdam: Elsevier; 2015. p. 27-50. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800080-9.00003-7>.
- [13] Achinas, S., Leenders, N., Krooneman, J., & Euverink, G. (2019). Feasibility assessment of a bioethanol plant in the Northern Netherlands. *Applied Sciences*, 9(21), 4586. <https://doi.org/10.3390/app9214586>

- [14] M. J. Taherzadeh and K. Karimi, " Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review", *Int. J. Mol. Sci.* vol. 9, no. 9. pp. 1621- 1651, 2008.
- [15] Sanchez, A., Sevilla-Güitrón, V., Magaña, G. & Gutierrez, L. Parametric analysis of total costs and energy efficiency of 2G enzymatic ethanol production. *Fuel* **113**, 165–179 (2013).
- [16] Dunlap, R. A. (2018). *Sustainable Energy*, 2nd. Cengage Learning.