

**Evaluación del Desempeño de Pretratamientos Químicos sobre Bagazo de Caña de
Azúcar para la Producción de Bioetanol**

Ing. Esp. Pablo Suarez Posada

**Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ciencias y Tecnologías
Ambientales**

Directora

Olga Lucia Bayona Ayala

Química y Magíster en Ingeniería Química

Codirección

Lizeth Johanna Alvarado Rueda

Química y Magíster en Química

Claudia Marcela Valderrama Ríos

Ingeniera Química y Magister en Ingeniería Química

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Facultad de Química Ambiental

2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado de maestría primeramente a Dios por su gran apoyo en todo este proceso, él ha sido el motor y la motivación para terminar.

Dedico este trabajo a mi esposa Gloria Isabel Maldonado Quiroga y a mi hija Eileen Dayana Suárez Maldonado.

Dedico este trabajo a mis padres Julio Suárez Campo (Q.E.P.D), Doris Posada Vargas y a mis hermanos Leonardo Suárez Posada, Karen Sharine Suárez posada.

Dedico este trabajo a Graciela Quiroga, Jaime Maldonado, Gilbert Maldonado, Ana Maldonado y Diana Carolina Maldonado mi segunda familia.

Dedico este trabajo de grado a mis padres espirituales Orlando Mendoza Álvarez y Yolanda Mendoza quienes me apoyaron emocionalmente, espiritualmente y económicamente en el proceso de estudio.

Dedico este trabajo a mi gran amigo de mexicano José Luis Montiel Rivas quien me ayudo grandemente e incondicionalmente en la segunda fase del proyecto, él ha sido un gran apoyo en este proceso.

Agradecimientos

Agradezco enormemente a mi directora (Olga Lucia Bayona) y codirectores (Claudia Valderrama y Lizeth Johana Alvarado) del proyecto, quienes me ayudaron en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a mis Padres espirituales Pastor Orlando Mendoza Alvares y Yolanda Vargas quienes me apoyaron emocionalmente, espiritualmente y económicamente, los aprecio mucho.

Agradezco a mi gran amigo el mexicano José Luis Rivas quien me guio en la etapa de la simulación de procesos.

Gracias a la Doctora Claudia Valderrama una gran persona y profesional que me guio en cada fase de este proyecto.

Contenido

	Pág.
Introducción	19
1 Evaluación del Desempeño de Pretratamientos Químicos sobre Bagazo de Caña de Azúcar para la Producción de Bioetanol	22
1.1 Planteamiento del Problema	22
1.2 Justificación.....	22
1.3 Objetivo	24
1.2.1 Objetivo General	24
1.2.2 Objetivos Específicos.....	24
2 Marco Referencial.....	25
2.1 Marco Conceptual	25
2.1.1 Biomasa Lignocelulósica	25
2.1.2 Producción de Etanol de Segunda Generación	26
2.1.3 Pretratamientos de la Biomasa Lignocelulósica	28
2.1.4 Pretratamiento con Ultrasonido	29
2.1.5 Pretratamiento con Ácidos	30
2.1.6 Pretratamiento con Peróxido de Hidrógeno	30
2.1.7 Pretratamiento con Líquidos Iónicos	31
2.1.8 Vigilancia Tecnológica	32
2.1.9 Herramientas de Simulación (ASPEN PLUS)	32
2.1.10 Reactor de Pretratamiento	33
2.1.11 Simulación de Procesos.....	34

2.1.12	Análisis de Ciclo de Vida (Life Cycle Assesment – LCA).....	36
2.2	Marco de Antecedentes	36
2.2.1	Pretratamientos.....	36
2.2.2	Cienciometría	38
2.2.3	Simulador	38
2.2.4	Diseño de Reactores	39
2.2.5	Análisis Ambiental.....	39
3	Metodología.....	41
4	Resultados y discusión.....	44
4.1	Evaluación a Través de un Estudio Cienciométrico de los Cuatro Pretratamientos Químicos de Bagazo de Caña de Azúcar; Identificando los Dos con Mayor Potencial de ser Llevado a Escala Industrial	44
4.1.1	Indicadores Básicos.....	45
4.1.2	Índices de Relación	51
4.1.3	Análisis Cienciométrico Costos de Reactivos.....	60
4.1.4	Análisis Cienciométrico por Análisis Ambiental.....	63
4.2	Condiciones de Operación, Requerimientos Másicos y Energéticos de Cuatro Tecnologías de Pretratamientos, Seleccionando dos Esquemas con Mayor Rendimiento a Partir de Simulación de Procesos.....	67
4.2.1	Composición del Bagazo de Caña.....	71
4.2.2	Simulación de Pretratamientos.....	71
4.2.3	Simulación de Pretratamiento con Peróxido de Hidrógeno e hidróxido de Sodio.....	79

4.3	Evaluar Impactos Ambientales de los Dos Tipos de Pretratamientos con Mayor Potencial Mediante la Metodología Análisis Ciclo de Vida.....	87
4.3.1	Fase I: Definición de Objetivos y Alcance de Estudio	88
4.4	Fase II: Análisis de Inventario y Aplicación NTC ISO 14064:2006.....	90
4.4.1	Análisis de Inventario del Pretratamiento de Bagazo de Caña de Azúcar con Ácido Fosfórico y Peróxido de Hidrógeno Alcalino.	90
4.4.2	Fase III y IV Evaluación e Interpretación del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)	95
5	Conclusiones.....	120
6	Recomendaciones	121
	Referencias Bibliográficas	122
	Apéndices.....	134

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Tipos de pretratamientos ventajas y desventaja</i>	28
Tabla 2. <i>Ecuación de búsqueda general</i>	45
Tabla 3. <i>Análisis técnico-económico de varios pretratamientos de biomasa</i>	62
Tabla 4. <i>Condiciones de operación de los reactores de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar</i>	68
Tabla 5. <i>Composición del Bagazo y flujo de entrada</i>	71
Tabla 6. <i>Reacciones en el reactor de pretratamiento H_3PO_4</i>	73
Tabla 7. <i>Reacciones involucradas en el reactor de hidrólisis enzimática</i>	74
Tabla 8. <i>Reacciones involucradas en el reactor de fermentación</i>	75
Tabla 9. <i>Notación y definición de corrientes de la simulación de pretratamiento por ácido fosfórico</i>	77
Tabla 10. <i>Resultados Simulación de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar a partir de ácido fosfórico Aspen Plus</i>	78
Tabla 11. <i>Resultados Simulación de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar a partir de ácido fosfórico Apen Plus (continuación)</i>	78
Tabla 12. <i>Reacciones en el reactor de pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino</i>	80
Tabla 13. <i>Reacciones involucradas en el reactor de hidrólisis enzimático del pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino</i>	81
Tabla 14. <i>Reacciones involucradas en el reactor de fermentación del pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino</i>	83

Tabla 15. <i>Notación y definición de corrientes de la simulación de pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino</i>	85
Tabla 16. <i>Resultados Simulación de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar a partir de peróxido de hidrógeno alcalino con Aspen Plus</i>	86
Tabla 17. <i>Resultados Simulación de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar a partir de peróxido de hidrógeno alcalino con Aspen (Continuación)</i>	86
Tabla 18. <i>Inventario del pretratamiento de bagazo de caña con ácido fosfórico</i>	92
Tabla 19. <i>Inventario del pretratamiento de bagazo de caña con peróxido de hidrógeno alcalino</i>	93
Tabla 20. <i>Caracterización Fisicoquímica y microbiológica del río Cali</i>	94
Tabla 21. <i>Caracterización Fisicoquímica y microbiológica de agua Potable</i>	94

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Estructura de la biomasa lignocelulósica.</i>	26
Figura 2. <i>Tipos de Biombustibles según la materia prima</i>	27
Figura 3. <i>Producción de Bioetanol</i>	27
Figura 4. <i>Estructura Celulosa</i>	31
Figura 5. <i>Metodología de evaluación de los pretratamientos</i>	41
Figura 6. <i>Publicaciones por año o dinámica científica.</i>	46
Figura 7. <i>Top 24 participación de países según el número de Publicaciones.</i>	47
Figura 8. <i>Producción por Latinoamérica</i>	48
Figura 9. <i>Densidad de publicación por países.</i>	49
Figura 10. <i>Top 10 participación de instituciones según el número de publicaciones (2012-2022)</i>	49
Figura 11. <i>Top 10 Participación por autores</i>	50
Figura 12. <i>Relación entre palabras claves</i>	51
Figura 13. <i>Relación entre países.</i>	52
Figura 14. <i>Relación entre países.</i>	53
Figura 15. <i>Colaboración entre autores con cinco o más publicaciones</i>	54
Figura 16. <i>Colaboración entre 22 autores principales.</i>	54
Figura 17. <i>Eficiencia de deslignificación</i>	66
Figura 18. <i>Conversión de celulosa</i>	66
Figura 19. <i>Conversión de Hemicelulosa</i>	67

Figura 20. Diagrama del proceso de producción de bioetanol a partir del pretratamiento por Ácido Fosfórico	69
Figura 21. <i>Diagrama del proceso de producción de bioetanol a partir del pretratamiento por peróxido de hidrógeno diluido.....</i>	70
Figura 22. <i>Resultados simulación del pretratamiento ácido fosfórico</i>	76
Figura 23. <i>Resultados simulación del pretratamiento peróxido de hidrógeno</i>	84
Figura 24. <i>Fases de un análisis de ciclo de vida según norma ISO 14040</i>	87
Figura 25. <i>Diagrama de procesos de pretratamiento por Ácido Fosfórico</i>	89
Figura 26. <i>Diagrama de procesos de pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino.....</i>	89
Figura 27. <i>Evaluación de impacto por puntuación única de 6,420 kg de mezcla pretratada del pretratamiento por ácido fosfórico</i>	96
Figura 28. <i>Evaluación de impacto por puntuación única de 7,003 kg de mezcla hidrolizada del pretratamiento por ácido fosfórico</i>	96
Figura 29. <i>Evaluación de impacto por puntuación única de 4,977 kg de mezcla fermentada del pretratamiento por ácido fosfórico</i>	97
Figura 30. <i>Evaluación de impacto por puntuación única de 0,84918392 kg de mezcla purificada ó Bioetanol del pretratamiento por ácido fosfórico.</i>	98
Figura 31. <i>Evaluación de impacto por puntuación única de 13,569 kg de mezcla pretratada del pretratamiento por peróxido de hidrógeno.....</i>	99
Figura 32. <i>Evaluación de impacto por puntuación única de 14,149 Kg de mezcla hidrolizada del pretratamiento por peróxido de hidrógeno.....</i>	100
Figura 33. <i>Evaluación de impacto por puntuación única de 11,803 Kg de mezcla fermentada del pretratamiento por peróxido de hidrógeno.....</i>	100

Figura 34. <i>Evaluación de impacto por puntuación única de 0,827964617 Kg de mezcla purificada del pretratamiento por peróxido de hidrógeno.</i>	101
Figura 35. <i>Análisis comparativo de la producción de bioetanol con ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno</i>	101
Figura 36. <i>Evaluación por categoría de impacto del pretratamiento por ácido fosfórico.</i>	103
Figura 37. <i>Evaluación del daño del pretratamiento por ácido fosfórico.</i>	103
Figura 38. <i>Contribución del proceso ácido fosfórico</i>	104
Figura 39. <i>Evaluación por categoría de impacto-puntuación única del pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino</i>	104
Figura 40. <i>Evaluación del daño del pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino</i>	105
Figura 41. <i>Contribución del proceso pretratamiento peróxido de hidrógeno</i>	105
Figura 42. <i>Análisis comparativo evaluación por categoría de impacto de los dos pretratamientos</i>	106
Figura 43. <i>Análisis comparativo evaluación del daño de los dos pretratamientos</i>	107
Figura 44. <i>Comparativo emisiones al agua de los dos pretratamientos</i>	107
Figura 45. <i>Comparativo emisiones al aire de los dos pretratamientos</i>	108
Figura 46. <i>Comparativo emisiones al suelo de los dos pretratamientos</i>	108
Figura 47. <i>Análisis comparativo de contribución del proceso de los dos pretratamientos.</i>	109
Figura 48. <i>Perfil medioambiental categoría cancerígenos</i>	110
Figura 49. <i>Perfil medioambiental categoría No-cancerígenos</i>	111
Figura 50. <i>Perfil medioambiental categoría Inorgánicos respiratorios</i>	111
Figura 51. <i>Perfil medioambiental categoría Ecotoxicidad terrestre</i>	112
Figura 52. <i>Perfil medioambiental categoría calentamiento global</i>	113

Figura 53. <i>Perfil medioambiental categoría energía no-renovable</i>	113
Figura 54. <i>Análisis comparativo de la demanda energética en los dos pretratamientos por categoría de impacto</i>	114
Figura 55. <i>Análisis comparativo de demanda energética por contribución el proceso</i>	115
Figura 56. <i>Huella de carbono a 20 años de los dos pretratamientos (IPCC 2021 GWP20 V1.00)</i>	116
Figura 57. <i>Huella de carbono a 100 años de los dos pretratamientos (IPCC 2021 GWP100 V1.00)</i>	116
Figura 58. <i>Huella de carbono a 500 años de los dos pretratamientos (IPCC 2021 GWP500 V1.00)</i>	117
Figura 59. <i>Análisis de red para el pretratamiento por ácido fosfórico puntuación única</i>	118
Figura 60. <i>Análisis de red para el pretratamiento por peróxido de hidrógeno puntuación única</i>	119

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Hojas de procesos creadas en SIMAPRO para los pretratamientos; ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno</i>	134

Resumen

La biomasa lignocelulósica por su gran contenido de azúcares fermentables es una fuente importante para la obtención de etanol y otros subproductos de valor agregado, sin embargo, tiene una estructura molecular compleja que impide la obtención de dichos azúcares. Debido a este inconveniente, se han utilizado diferentes métodos de pretratamiento que se categorizan como físicos, químicos, biológicos, fisicoquímicos y combinados.

En este proyecto se estudió el proceso de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña de azúcar; para lo cual, se establecieron tres fases: primero se realizó un análisis cuantitativo que permitió identificar cuatro de los principales métodos de pretratamiento para el bagazo de caña: ácido fosfórico, peróxido de hidrógeno, líquidos iónicos y ultrasonido. En la segunda fase se cuantificaron los consumos de agua, masa, energía y rendimientos en los procesos de producción de bioetanol usando el software de simulación ASPEN PLUS (R). Las referencias bibliográficas obtenidas del análisis cuantitativo permitieron definir las variables de diseño en los reactores de pretratamiento, hidrólisis y fermentación. Finalmente, se realizó un análisis de ciclo de vida de los pretratamientos con mayor potencial utilizando los métodos de evaluación de impacto IMPAC 2002, Cumulative Energy Demand V1.11 y IPCC 2021 GWP20 V1.00.

Palabras Claves: Biomasa lignocelulósica, pretratamiento, ultrasonido, ácidos fosfóricos, bagazo de caña, bioetanol.

Abstract

Lignocellulosic biomass, due to its high content of fermentable sugars, is an important source for obtaining ethanol and other value-added by-products; however, it has a complex molecular structure that prevents obtaining these sugars. Due to this drawback, different pretreatment methods have been used, categorized as physical, chemical, biological, physicochemical, and combined.

In this project, the bioethanol production process from sugarcane bagasse was studied in three phases: first, a scientometric analysis was carried out to identify four of the main pretreatment methods for sugarcane bagasse: phosphoric acid, hydrogen peroxide, ionic liquids and ultrasound. In the second phase, the consumption of water, mass, energy and yields in the bioethanol production processes were quantified using ASPEN PLUS (R) simulation software. The bibliographic references obtained from the scientometric analysis allowed defining the optimum design variables in the pretreatment, hydrolysis and fermentation reactors. Finally, a life cycle analysis of the pretreatments with the greatest potential was carried out using the IMPAC 2002, Cumulative Energy Demand V1.11 and IPCC 2021 GWP20 V1.00 impact assessment methods.

Keywords: Lignocellulosic biomass, pretreatment, ultrasound, phosphoric acids, sugarcane bagasse, bioethanol.

Glosario

Ácido diluido. Proceso que consiste en sumergir el material lignocelulósico en ácido. Se puede utilizar ácido sulfúrico (H_2SO_4) o ácido clorhídrico (HCl) en concentraciones altas o diluidas para así romper las cadenas poliméricas. (Morales, 2014)

Bagazo de caña de azúcar. Residuo más importante derivado del procesamiento de la caña de azúcar y representa el 30% de la caña molida. (Becerra. Ana, 2016)

Biocombustibles de primera generación. Biocombustibles producidos a partir de materias primas que también son utilizadas para alimentación (principalmente caña de azúcar y palma de aceite). (Morales, 2014)

Biocombustibles de segunda generación. Biocombustibles producidos a partir de biomasa no alimentaria o residual. (Morales, 2014)

Bioetanol. Combustible obtenido a partir de la fermentación de los azúcares contenidos en la biomasa.

Biomasa lignocelulosa. Material compuesto principalmente por tres polímeros; celulosa, hemicelulosa y lignina junto con pequeñas cantidades de otros componentes, como grupos acetilo, minerales y sustituyentes fenólicos. (Furkan H. Isikgora, 2015)

Biomasa. Materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, macadamia), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas negras, basura orgánica y otros). (Fortalecimiento de la capacidad en Energía Renovable para América Central., 2002)

Fermentación alcohólica. Bioreacción que permite degradar azúcares en etanol y dióxido de carbono. (Morales, 2014)

Líquidos iónicos. Sales que se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente y que están compuestos únicamente por iones. Muchos de ellos están formados por un gran catión orgánico y un anión pequeño, que puede ser orgánico o inorgánico. (ORIANA & ZIOMARA, 2013)

Pretratamiento de la biomasa lignocelulosa. Fraccionamiento de la lignocelulosa en sus tres componentes principales; celulosa, hemicelulosas y lignina para extraer los azúcares fermentables. (Furkan H. Isikgora, 2015)

Puntuación Única. Obtención de un resultado único y proporciona un valor numérico calculado a través de una ecuación de ecopunto, cuyo resultado expresa la severidad de un impacto ambiental (Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, 2014, p. 22).

ScienceDirect. Base de datos de Elsevier con textos completos, revisados por pares, con más de 26,000 títulos de libros y más de 2,500 títulos de revistas. Además de contar con herramientas de búsqueda y recuperación sofisticadas, ScienceDirect ofrece contenidos de una gran variedad de fuentes externas en forma de audio, video y conjuntos de datos. (ScienceDirect, 2014)

Scopus. Base de datos más amplia de resúmenes y citas sobre literatura revisada por pares, cuenta con herramientas bibliométricas para rastrear, analizar y visualizar investigaciones. Contiene más de 21,900 títulos de más de 5,000 editoriales de todo el mundo, en el campo de la ciencia, tecnología, medicina, ciencias sociales y artes y humanidades. Scopus cuenta con 54 millones de registros que datan de 1823, 84% de estos hacen referencias desde 1996. (Scopus)

Ultrasonido. método de pretratamiento físico de la biomasa residual que provoca alteración de la estructura de la superficie y la producción de radicales oxidantes que atacan químicamente la matriz lignocelulosa (Shady, Gwilym, & Amit, 2018).

Vigilancia Tecnológica (VT). Proceso sistemático y organizado de búsqueda, captación y análisis de información de carácter tecnológico, comercial, competitivo y normativo a nivel nacional e internacional, que permite anticiparse para esclarecer las acciones a través de las decisiones, pasando antes por la apropiación y llegando a un aprendizaje colectivo. (Andrade Juan Manuel, 2017)

Introducción

El agotamiento de los combustibles fósiles y su impacto ambiental conlleva a la etapa de la transición energética o búsqueda de sustituir parcialmente o completamente los combustibles fósiles por los biocombustibles que generan menor impacto ambiental sobre el medio.

Los dos tipos de biocombustibles existentes son el bioetanol que es un alcohol obtenido de los azúcares fermentables de la materia orgánica y el biodiesel es obtenido a partir de aceites vegetales que para su producción se utiliza generalmente aceites de palma

Los biocombustibles también se clasifican de acuerdo al tipo de materia o biomasa que son obtenidos. Los biocombustibles de primera generación son los producidos a partir de aceites o azúcares comestibles como el maíz, girasol y caña de azúcar. los de segunda generación con materiales no comestibles o aprovechables como lo son; residuos agrícolas, forestales, aceite de cocina, lodos de depuración, entre otros. Los de tercera generación se obtienen a partir de algas y los biocombustibles de cuarta generación a partir de bacterias genéticamente modificadas.

En este trabajo se estudió el biocombustible (bioetanol) de segunda generación, obtenido del bagazo de caña de azúcar. La caña de azúcar está compuesta de 12-15 % de fibra y un 85-88% de jugo. El jugo está constituido por: 12-20% de sacarosa (azúcar), sustancia distinta al azúcar 2-3% y agua 76-84% y es a partir de este esquema que se realiza la producción convencional de etanol a través de la fermentación de sus azúcares, sin embargo, es probable también aprovechar el azúcar contenido en las fibras del bagazo de la caña (12-15%) (Costa, 2018).

El bagazo de caña de azúcar ha sido aprovechado desde los inicios del sector azucarero colombiano como combustible natural para sus diferentes procesos. En los trapiches se ha aprovechado el calor generado por la quema del bagazo para la evaporación del jugo de caña, y para la obtención de mieles ricas en azúcar que luego son solidificadas para la obtención de pan

de azúcar. La quema tanto de la caña como el bagazo libera a la atmósfera monóxido de carbono CO, dióxido de azufre SO₂, óxidos de nitrógeno NO, NO₂, NO_x, metano CH₄, hidrocarburos no metálicos NMHC y partículas menores de 10 micras PM₁₀, sustancias que alteran el funcionamiento normal de los sistemas respiratorio, cardiovascular, reproductivo y neurológico (Quiroz, 2016, pág. 34)

(Castillo, 2016) Colombia desarrolló un programa de investigación en producción de biocombustible de segunda generación con materiales disponibles en el entorno colombiano, pasando por su centro de investigación ICP (instituto colombiano del petróleo).

El principal propósito del programa de investigación liderado por el ICP a escalas de laboratorio, es buscar la combinación tecnológica y el tipo de biomasa lignocelulósica colombiana que favorecen la producción de etanol y su factibilidad económica. Este estudio concluye la viabilidad de realizar escalado del proceso desde laboratorio, bench y piloto usando bagazo de caña, raquis de palma y mezclas de biomasa.

El reto principal para la obtención de este biocombustible a partir del bagazo de caña es la dificultad de acceder a los azúcares fermentables contenidos en la celulosa y hemicelulosa o la remoción de la lignina debido a la complejidad de su estructura. Por lo cual se hace necesario definir el tipo de pretratamiento con mayor eficiencia y que tenga las condiciones óptimas del reactor de pretratamiento para este tipo de biomasa, el escalamiento a nivel industrial del pretratamiento y la evaluación del impacto ambiental.

Producir biocombustible a partir del bagazo de caña, proponer las variables de diseño de un reactor de pretratamiento considerado un desafío ingenieril y escoger el pretratamiento adecuado para obtener los azúcares fermentables del bagazo de caña representaría para el país un reto y una contribución a la investigación y a la industria energética.

El propósito de esta investigación es la evaluación de desempeño de pretratamientos químicos sobre el bagazo de caña de azúcar para la producción de bioetanol, estableciendo el pretratamiento más adecuado para la obtención de los azúcares fermentables. Para cumplir con este objetivo se llevaron a cabo las siguientes etapas:

(1) Análisis cuantitativo utilizando el software Vantage Point, consultando bases de datos como Scopus y Science direct de los pretratamientos de manera general.

(2) Establecer condiciones de operación, requerimientos básicos de cuatro tecnologías de pretratamientos, seleccionando dos esquemas con mayor rendimiento a partir de simulación de procesos. Estas condiciones de diseño de los reactores son obtenidas de la literatura obtenida del análisis cuantitativo.

(3) Evaluar impactos ambientales de los dos tipos de pretratamientos con mayor potencial mediante la metodología análisis ciclo de vida.

De la literatura obtenida se logró definir las variables de diseño de los reactores de pretratamiento, hidrólisis enzimática y fermentación. De la simulación de procesos se obtuvo los rendimientos de bioetanol, consumos de masa y emisiones al agua, aire y suelo. Finalmente se logró definir mediante el análisis de ciclo de vida el pretratamiento con mayor y menor impacto ambiental al medio. El pretratamiento por ácido fosfórico genera menor impacto ambiental al medio, mientras que el pretratamiento por peróxido de hidrógeno genera mayor impacto ambiental pero mayor rendimiento en producción de bioetanol y azúcares fermentables. Sin embargo, la diferencia de producción de bioetanol comparado con el del ácido fosfórico no es muy alta. Por lo tanto, se seleccionó la técnica por ácido fosfórico como el pretratamiento ideal para la producción de bioetanol a escala industrial.

1 Evaluación del Desempeño de Pretratamientos Químicos sobre Bagazo de Caña de Azúcar para la Producción de Bioetanol

1.1 Planteamiento del Problema

El uso de los biocombustibles surge como una alternativa a la grave crisis ambiental que atraviesa nuestro mundo, generada principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero causados por el uso de combustibles fósiles como la gasolina y el diésel. Sumado al acelerado crecimiento de la población y el agotamiento de los recursos, han ocasionado no solo daños al medio ambiente sino también se ha visto reflejado en la salud de la población. Esta problemática nos lleva a pensar en la importancia de avanzar en la implementación de nuevas alternativas que puedan mitigar estos daños.

El bioetanol de segunda generación obtenido a partir del bagazo de caña de azúcar es una alternativa para reemplazar parcialmente o totalmente combustibles como la gasolina, sin embargo, este tipo de biomasa presenta una compleja estructura que limita su biodegradación y posterior acceso a los azúcares fermentables contenidos en la celulosa y hemicelulosa. Por tanto, se hace necesario escoger el pretratamiento con mayor eficiencia en la separación de celulosa, hemicelulosa y lignina, que además pueda generar el menor impacto ambiental para ser llevado a escala industrial. Con lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cual tecnología de pretratamiento químico de biomasa existente permite obtener el mayor rendimiento de producción de bioetanol con bajo impacto ambiental?

1.2 Justificación

La UPME proyecta un potencial nacional teórico de biomasa para el 2030 entre 1300 y 1400 PJ/año (UPME, 2018), donde la participación de la biomasa residual agrícola se contabiliza en 73,7% de los cuales un 26,36% pertenece al bagazo de caña de azúcar (UPME, 2014-2016). En

contraste, se ha establecido que los potenciales bioenergéticos ambientalmente sostenibles en países como Francia, Alemania y España oscilan entre 350 y 300 PJ anuales por país (UPME, 2018); lo cual evidencia el papel importante que puede llegar a representar Colombia para la generación de biocombustibles a partir de biomasa.

No obstante, de acuerdo con Asocaña (2020) la producción de bioetanol ha venido disminuyendo desde el 2017, aun cuando a nivel nacional las ventas y las importaciones han venido aumentando. Un ejemplo de ello se presentó en el 2019, donde la producción de bioetanol fue de 444 millones de litros, representando una caída de 4,9% frente a la producción registrada en el 2018; así mismo, se importaron 269 millones de litros (2019), aumentando un 37, 2 % frente al 2018. Sumado a que las ventas de bioetanol son superiores a las nominaciones (anuncios de compras de bioetanol), se requiere para el país aumentos de producción de bioetanol para uso como carburante.

El incremento en el uso de bioetanol trae dos beneficios principales a los consumidores y no consumidores colombianos: primero, mejora la calidad del combustible al incrementar el octanaje de la gasolina (3 octanos más en la corriente y 2 más en la extra), lo cual permite que los vehículos trabajen mejor y que el consumidor pueda ahorrar combustible y segundo, contribuye a mejorar la calidad del aire, debido a la menor cantidad de emisiones de material particulado a la atmósfera. (Asocaña, 2018, p. 39). Al entender que Colombia posee grandes reservas de biomasa residual agrícola y demandas considerables de producción de bioetanol, se justifica realizar estudios que caractericen, desde un punto de vista ambiental, el desempeño de pretratamientos químicos existentes al tratar bagazo de caña colombiano.

Como el principal desafío ingenieril es acceder a los azúcares fermentables, se han desarrollado diversas tecnologías que rompen la pared celular de la planta y garantizan un fácil

acceso a los polímeros (celulosa, hemicelulosa y lignina) que contiene; sin embargo, la selección adecuada de alguno de ellos dependerá de factores como la clase de biomasa, consumos máxicos y energéticos, así como, impactos ambientales generados.

Dentro de las metodologías para la selección de tecnologías, desde un punto de vista académico, el análisis cuenciométrico evalúa el estado del arte de un área específica, estableciendo tendencias de investigación y redes científicas, entre otros. De esta forma con la adecuada combinación de palabras claves es posible identificar condiciones de operación de los equipos usados en lo pretratamientos, rendimientos e impactos generados. A su vez, la simulación de procesos químicos permite evaluar consumos de masa y energía; sin necesidad de llevar a cabo un proceso en el laboratorio o el empleo de una planta piloto. De igual forma, la evaluación de impactos ambientales se realiza a través del análisis de ciclo de vida del proceso.

Por tanto, el empleo de cuencimetría, simulación de procesos y análisis de ciclo de vida permiten tener un estimativo del desempeño de pretratamientos químicos para la producción de bioetanol a partir de bagazo de caña y de esta manera, escoger la técnica con menor afectación ambiental al medio.

1.3 Objetivo

1.2.1 Objetivo General

Determinar las condiciones de condiciones de operación de un reactor de pretratamiento químico de biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol a escala de laboratorio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Evaluar a través de un estudio cuenciométrico cuatro pretratamientos químicos de bagazo de caña de azúcar; identificando los dos con mayor potencial de ser llevado a escala industrial.

- ✓ Establecer condiciones de operación, requerimientos másicos y energéticos de cuatro tecnologías de pretratamientos, seleccionando dos esquemas con mayor rendimiento a partir de simulación de procesos.
- ✓ Evaluar impactos ambientales de los dos tipos de pretratamientos con mayor potencial mediante la metodología análisis ciclo de vida.

2 Marco Referencial

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 *Biomasa Lignocelulósica*

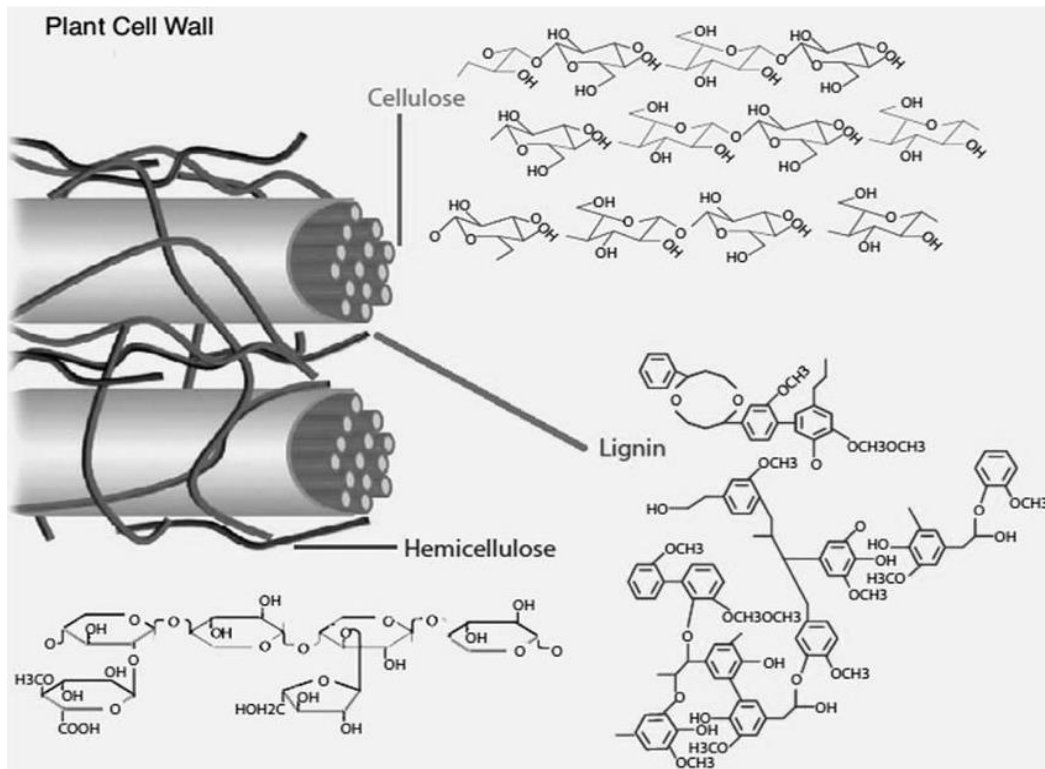
La biomasa lignocelulósica es la fuente de carbono más abundante en la naturaleza; esta contiene cantidades variables de celulosa, hemicelulosa y lignina dependiendo del tipo de biomasa. La biomasa en general consiste entre 40 - 50% de celulosa, 25 - 30% de hemicelulosa; y 15 - 20% de lignina y otros componentes extraíbles. En conjunto, la celulosa y la hemicelulosa constituyen aproximadamente dos tercios del peso seco total de la biomasa, siendo los principales sustratos para el etanol. (Barahona, 2018, p. 6)

La hemicelulosa es una estructura compleja de carbohidratos que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa y arabinosa (pentosas), manosa, glucosa y galactosa (hexosas) y ácidos de azúcar. La lignina es, después de la celulosa y la hemicelulosa uno de los polímeros más abundantes en la naturaleza; y está presente en la pared celular. El objetivo principal de la lignina es dar a la planta el soporte estructural, impermeabilidad, y la resistencia contra el ataque microbiano y el estrés oxidativo. Es insoluble en agua y se considera ópticamente inactiva, todo esto hace que la degradación de la lignina sea muy difícil. (Cortes, 2011, p. 43)

La celulosa es un polisacárido lineal de elevado peso molecular y un grado alto de polimerización (GP), además de ser el componente principal en las paredes celulares de los

vegetales. El grado de polimerización de la celulosa se define como el número a repetir de unidades de anhidro glucosa (β -D-glucopiranosas) unidas entre sí mediante un enlace glicosídico entre el carbono 1 y 4 en la cadena polimérica. (Morales S., 2015, p. 21)

Figura 1. Estructura de la biomasa lignocelulósica.



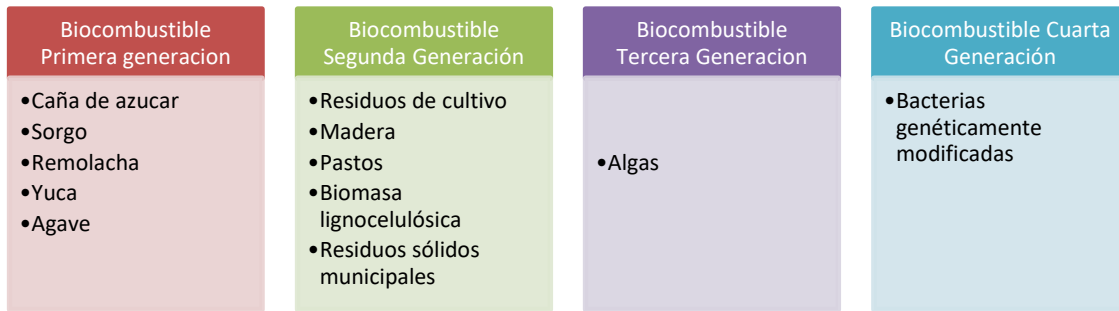
Nota. Adaptado de (Barahona, 2018, p. 39)

2.1.2 Producción de Etanol de Segunda Generación

La producción de bioetanol se puede clasificar de acuerdo a la materia prima de la cual proviene. Bioetanol de primera generación es obtenido a partir de cereales como maíz, cebada, caña de azúcar, remolacha y sorgo. Mientras que el bioetanol de segunda generación es obtenido de materia prima que proviene de residuos forestales, residuos agrícolas, cultivos de forraje, bagazos, madera etc. Los cuales se abordaron en este proyecto

De acuerdo al tipo de materia prima utilizada y la tecnología esgrimida para obtenerlos, los biocombustibles se pueden clasificar como se muestra en la figura 2.

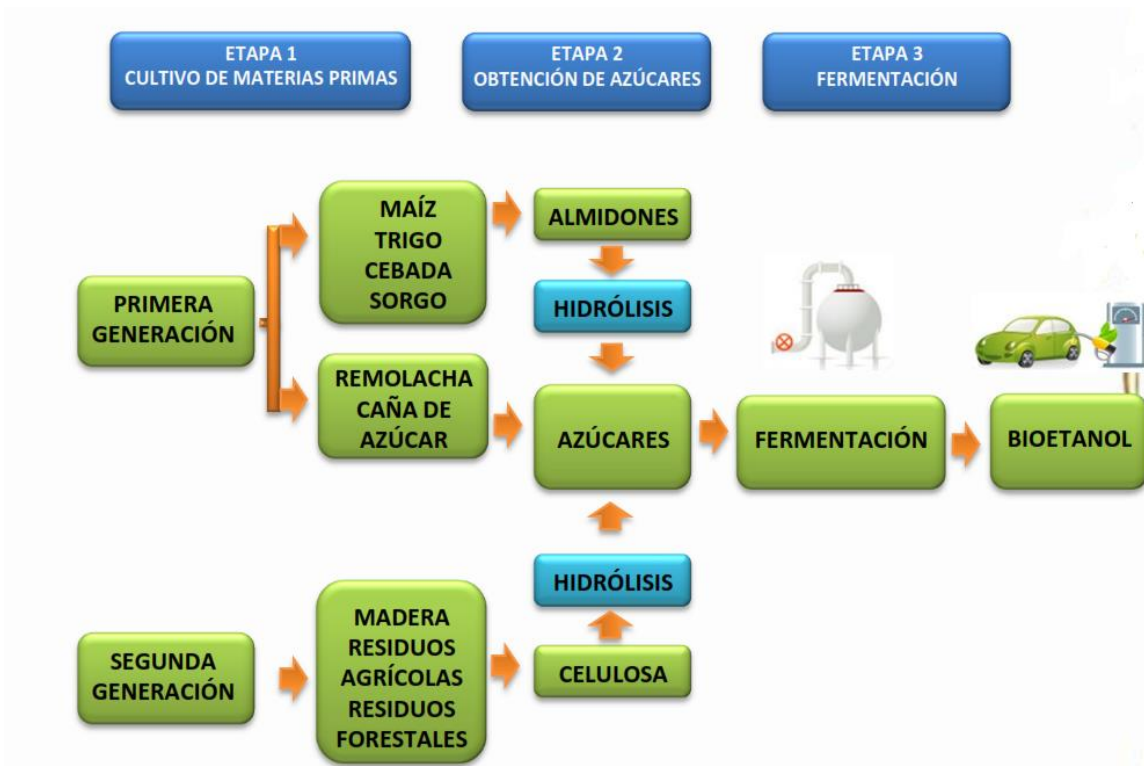
Figura 2. Tipos de Biocombustibles según la materia prima



Nota. Adaptado de Generación de Biocombustibles por tipo de materia prima. Adaptado SENER 2017.

Las etapas del proceso de producción de bioetanol de primera y segunda generación se muestran en la siguiente figura.

Figura 3. Producción de Bioetanol



Nota. Adaptado de (Superintendencia de Industria y Comercio, 2013).

En una fermentación tradicional, se convierte la glucosa en etanol, en el caso de los materiales lignocelulósicos, la celulosa debe ser primero convertida a azúcares simples por hidrólisis y entonces fermentada para producir etanol de segunda generación (Viñals Verde, 2013)

2.1.3 Pretratamientos de la Biomasa Lignocelulósica

De acuerdo con Espinosa, López, & Casdelo (2021) los métodos de pretratamientos de biomasa lignocelulósica permiten obtener altos rendimientos de los subproductos utilizados para la fermentación enzimática. El pretratamiento de la biomasa lignocelulósica juega un papel importante, ya que permite acceder a los azúcares contenidos en la biomasa lignocelulósica.

Un pretratamiento ideal es aquel que permite reducir el contenido de lignina, disminuir la cristalinidad de la celulosa e incrementar el área superficial. En la tabla 1 se presenta un cuadro comparativo de los diferentes métodos de pretratamientos con sus ventajas y desventajas.

Tabla 1. Tipos de pretratamientos ventajas y desventaja

Método	Tipo	Ventaja	Desventaja
Físico	Fragmentación mecánica y Pirólisis	Es un método eficiente en la degradación del material.	Comparativamente, el costo es elevado
Físico - químico	Explosión por vapor	Efectivo para maderas duras y desechos agrícolas. Bajo requerimiento de energía comparado con métodos físicos.	Dstrucción parcial de xilano, separación incompleta de la lignina y generación de compuestos inhibitorios para la fermentación.
	Explosión de fibra de amoníaco	Es eficiente para sustratos de poca lignina. No se producen inhibidores y no se requiere acondicionamiento	Requiere reciclaje del amonio y tiene baja eficiencia para maderas duras.
Químico	Ozonólisis	Opera en condiciones ambientales y mejora el rendimiento	Se requiere una gran cantidad de ozono, lo que eleva los costos

	Hidrólisis ácida	Mejora la hidrólisis de celulosa.	Reactivos tóxicos, corrosivos y peligrosos. Alto costo y requiere neutralización
	Hidrólisis alcalina	Mejora en la separación de la lignina	Altos costos
	Líquido iónico aprótico (AIL)	Buen rendimiento en la hidrólisis de celulosa.	Poco biodegradables, alta higroscopicidad. Pocos antecedentes en su estudio.
	Líquido iónico prótico (PIL)	Baja toxicidad, baja higroscopicidad bajos costos de producción.	Rendimientos de hidrólisis insuficientes respecto a algunos AILs
Biológico	Degradación con hongos.	Alto rendimiento, condiciones de operación moderadas, poca generación de compuestos tóxicos y mínima demanda de energía	Proceso lento (2 a 6 semanas).

Nota. Adaptado de (ORIANA & ZIOMARA, 2013).

Sin embargo, en este proyecto se estudiaron los métodos pretratamiento con ultrasonido, ácido fosfórico, peróxido de hidrógeno y líquidos iónicos.

2.1.4 Pretratamiento con Ultrasonido

En el año 1927 Wood y Loomis reportaron los efectos del tratamiento ultrasónico sobre la biomasa celular, como la fragmentación de flóculos, la ruptura y destrucción celular. Obteniendo que el rango para ultrasonido sea de 20 kHz a 1 MHz se usa para el procesamiento químico, mientras que las frecuencias más altas se usan en aplicaciones médicas y de diagnóstico. (Hassan, 2018, p. 12)

Esta técnica hace parte del pretratamiento físico o mecánico, y es una técnica empleada para extraer lignina y hemicelulosa. El pretratamiento con ultrasonido provoca alteración de la estructura de la superficie, y la producción de radicales oxidantes que atacan químicamente la matriz lignocelulósica.

2.1.5 Pretratamiento con Ácidos

El pretratamiento con ácido diluido ha sido ampliamente estudiado, utilizando ácido sulfúrico, clorhídrico, nítrico y fosfórico. La reacción se realiza colocando en contacto la biomasa con la solución de ácido a temperaturas entre 160 y 220 °C por periodos de tiempo entre 1 y 60 min (Fontecha, 2011, p. 23).

La presencia del ácido provoca la degradación de la hemicelulosa y la ruptura de las fibras celulósicas mejorando el rendimiento de la etapa de hidrólisis, obteniendo de la celulosa el componente glucosa. La desventaja de este pretratamiento es la producción de inhibidores como 5-hydroxymethyl furfural (5-HMF) y furfural, los cuales deben ser removidos antes de la etapa de hidrólisis enzimática, por lo que es necesario realizar lavados al material sólido pretratado, asumiendo la pérdida de monosacáridos obtenidos durante el pretratamiento que son solubles en el agua de lavado. (Fontecha, 2011, p. 23)

2.1.6 Pretratamiento con Peróxido de Hidrógeno

El peróxido de hidrógeno es utilizado como un agente blanqueador, tiene un rendimiento óptimo sin generar desechos ya que estos son descompuestos en oxígeno y agua, no se reporta la formación de productos secundarios tóxicos y se obtiene una alta remoción de la lignina del material lignocelulósico. (Forero, 2017, p. 39)

Para evaluar los pretratamientos con peróxido de hidrógeno es necesario tener en cuenta factores como la concentración, el tiempo, el pH y la temperatura. Múltiples investigaciones realizadas en el mundo en la etapa del pretratamiento de la biomasa lignocelulósica, se realizan mediante un planteamiento factorial con diferentes variables de estudio, en las que se evidencian altos porcentajes de deslignificación. (Forero, 2017, p. 39)

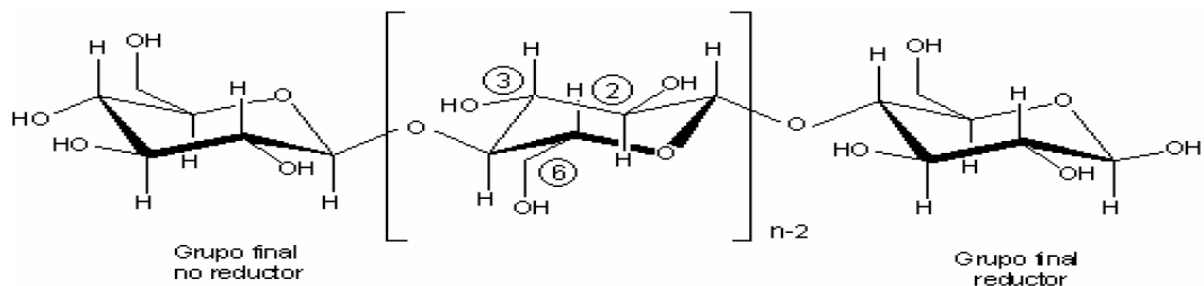
De acuerdo con Forero (2017) los pretratamientos con peróxido de hidrógeno permiten una alta digestibilidad de la celulosa, producen cantidades insignificantes de subproductos derivados de lignina, tienen baja demanda energética y bajos costos.

2.1.7 Pretratamiento con Líquidos Iónicos

Los líquidos iónicos son sales con bajo punto de fusión, menor a 100°C. Están compuestos por una parte aniónica y otra catiónica y debido a su gran estabilidad térmica y química se pueden emplear en procesos a altas temperaturas hasta de 300 °C, temperaturas superiores a esta, inducen su descomposición (Floriane, 2015)

En el proceso de la disolución de la celulosa, lo que ocurre es que la estructura cristalina de la celulosa se desmonta, dejando accesibles los enlaces β -(1-4)-D-glicosídicos para los catalizadores.

Figura 4. Estructura Celulosa



Nota. Adaptado de (Carreño, 2005, p. 9)

Las propiedades de los líquidos iónicos, entre las que se encuentra su capacidad para disolver la celulosa, varía enormemente de unos a otros dependiendo de los aniones, cationes o alquilo que estos tengan en su estructura. Serán buenos disolventes de celulosa aquellos que posean aniones con una gran capacidad de aceptar Hidrógenos (H^+) en sus bandas de valencia, además el anión no debe ser hidrófobo o contener sustituyentes alquílicos muy voluminosos. (Rosa Silvia., 2015)

2.1.8 Vigilancia Tecnológica

“La Vigilancia Tecnológica es un proceso organizado, selectivo y permanente, de captar información del exterior y de la propia organización sobre ciencia y tecnología, seleccionarla, analizarla, difundirla y comunicarla, para convertirla en conocimiento para tomar decisiones con menor riesgo y poder anticiparse a los cambios.” (Departamento Administrativo de Ciencias, Tecnología e Innovación-Colciencias, 2013, p. 4)

“La Bibliometría es la aplicación de métodos estadísticos y matemáticos para medir la información relacionada con los registros bibliográficos con el fin de identificar y analizar sus características incluyendo tendencias, impactos, agrupaciones o relaciones y formas de comunicación”. (Castellanos, 2011, p. 46)

“La Cienciometría es la aplicación de métodos estadísticos y matemáticos para medir la información científica y tecnológica con el fin de identificar y analizar sus características incluyendo tendencias, impactos, agrupaciones o relaciones y formas de comunicación sus características incluyendo desarrollo científico, agrupaciones o relaciones temáticas, productividad entre otras”. (Castellanos, 2011, p. 49)

“La Patentometría es la aplicación de métodos estadísticos y matemáticos para medir información de patentes con el fin de identificar y analizar sus características incluyendo tendencias, impactos, agrupaciones temáticas y desarrollos crecientes o decadentes.” (Castellanos, 2011)

2.1.9 Herramientas de Simulación (ASPEN PLUS)

En la realización de procesos químicos en la industria, las compañías se enfrentan a desafíos económicos globales, condiciones dinámicas de mercado y presiones competitivas para mejorar la calidad y reducir el tiempo al mercado para nuevos productos y procesos. Las

organizaciones tienen que encontrar maneras innovadoras para reducir costos operativos y de capital mientras incrementan la eficiencia de ingeniería para optimizar el desempeño de la planta y maximizar la rentabilidad. (AspenPlus, 2020, p. 2)

Existen diferentes tipos de simuladores de procesos entre ellos se listan los siguientes: **CHEMCAD, Pro MODEL, Aspen HYSYS y Aspen PLUS**. Para este proyecto se utilizará el simulador Aspen PLUS, porque dentro de sus bases de datos contiene información de las propiedades termodinámicas de compuestos como la celulosa, lignina y hemicelulosa.

Una de las razones por las cuales se trabajó en la simulación de los pretratamientos con esta herramienta es por su facilidad de manejo de sólidos y por experiencia en el uso de este simulador.

2.1.10 Reactor de Pretratamiento

De acuerdo con Lechuga (2008) los reactores químicos son usados en el pretratamiento de biomasa y están diseñados para maximizar la conversión y selectividad de la reacción química de interés con el menor coste posible. La reacción química es catalizada por una enzima purificada o por el organismo que la contiene. Dicho equipo constituye una unidad procesadora constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas, y está gobernado por un algoritmo de control.

Según las tres condiciones de operación de un reactor se pueden clasificar de la siguiente manera:

Reactores continuos. Son todos aquellos que trabajan de forma continua, donde se introduce una alimentación y se extrae el producto a medida que este alcanza las características deseadas, en el sistema hay intercambio de materia. (Guillén, 2014)

Reactores semi-continuos (feed-batch). No presentan flujo de salida. Es el reactor más común en la industria. En este el tanque se le adiciona sustrato continuo o periódicamente y este se vacía cuando se llena o culmina la fermentación. (Guillén, 2014)

Reactores discontinuos (batch). Son aquellos que trabajan por cargas, es decir se introduce una alimentación, y se espera un tiempo dado, que viene determinado por la cinética de la reacción, tras el cual se saca el producto. En el sistema no se intercambia materia con el exterior. (Guillén, 2014)

De acuerdo al tipo de flujo se pueden clasificar como:

- **Reactores ideales y no ideales.** Están definidos con ecuaciones ideales sencillas o a condiciones no reales, mientras que los reactores no ideales son válidos para situaciones reales con balances de materia, energía y presión desviados de la idealidad

Según las fases que albergan los reactores se pueden clasificar como:

- **Reactores homogéneos:** tienen una única fase, líquida o gas.
- **Reactores heterogéneos:** está definido de acuerdo a las fases: gas-sólido, líquido-sólido, gas-líquido, gas-líquido-sólido.

De acuerdo al régimen de funcionamiento se clasifica en régimen estacionario (las condiciones en cualquier punto no varían con el tiempo) y régimen no estacionario (las condiciones varían en función del tiempo).

2.1.11 Simulación de Procesos

Para comenzar con la etapa de simulación de procesos es necesario conocer cada etapa que se lleva a cabo para producir etanol a partir del bagazo de caña o biomasa lignocelulosa; (1) pretratamiento, (2) hidrólisis enzimática, (3) fermentación y (4) recuperación del producto. Cada

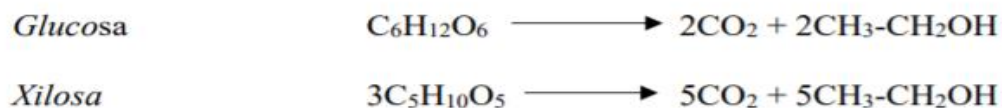
etapa tiene retos técnico-económicos, de los cuales la etapa de pretratamiento cuenta con los desafíos más grandes.

La etapa de pretratamiento tiene como finalidad solubilizar y separar uno o más componentes de la pared celular de la planta y liberarlos para llevar a cabo los pasos posteriores de hidrólisis enzimática y fermentación de manera eficiente. Existen diferentes métodos de pretratamientos; (1) físicos que tiene la desventaja de tener un alto consumo de energía, (2) métodos químicos tienen alto consumo de reactivos químicos y (3) biológicos o combinados, los cuales tiene la desventaja de requerir largos tiempos para llevar el proceso. En este proyecto se usará los métodos químicos de pretratamientos ya que tiene la ventaja de ser usado para cualquier tipo de biomasa.

Behera (2014) mediante su estudio pudo concluir que los pretratamientos químicos tienen características que permiten su uso generalizado en el pretratamiento de diferentes tipos de biomasa lignocelulósica, como solubilización de hemicelulosa en pretratamientos ácidos, eliminación de lignina en pretratamientos alcalinos/oxidativos y separación de polisacáridos por pretratamientos de líquidos iónicos. Algunos ejemplos son el uso de ácido diluido, hidróxido de sodio, peróxido de hidrógeno alcalino, ozono y líquidos iónicos, para el pretratamiento del bagazo de caña de azúcar.

En la hidrólisis enzimática se utilizan catalizadores biológicos (enzimas) cuya acción conjunta produce la degradación de la celulosa para que pueda ser metabolizada por los microorganismos que producen etanol. Existen diferentes tipos de enzimas hidrolíticas, aunque los dos grupos más relevantes son las enzimas celulolíticas y las hemicelulolíticas. La etapa de fermentación consiste en transformar los azúcares liberados durante la hidrólisis enzimática en

etanol y dióxido de carbono por medio de microorganismos como las levaduras. Las levaduras utilizadas en este proceso son *Saccharomyces cerevisiae* y *Pichia stipitis*.



El caldo tras la fermentación está compuesto mayoritariamente por agua y una fracción de etanol. Además, dependiendo del proceso de obtención puede contener células de los microorganismos fermentadores, azúcares no fermentados, oligosacáridos provenientes del hidrólisis incompleta de la celulosa y hemicelulosa, lignina, subproductos de la fermentación, dióxido de carbono disuelto, productos del metabolismo celular, etc.

2.1.12 Análisis de Ciclo de Vida (Life Cycle Assesment – LCA)

El análisis del ciclo de vida considera todos impactos ambientales que ocurre en cada etapa del desarrollo industrial y de uso del producto o servicio no limitándose a lo que ocurre solamente en los procesos de fabricación. El análisis de ciclo de vida es una herramienta analítica para la evaluación sistemática de los aspectos ambientales de un producto o servicio a través de todas las etapas de su ciclo de vida y se basada en la norma ISO 14040:2007. (Lozano, 2014, p. 13)

La metodología de análisis de ciclo de vida consiste en cinco etapas: definición de objetivo y alcance del estudio, análisis de inventario, evaluación del impacto ambiental potencial, interpretación de resultados y propuestas de mejoras.

2.2 Marco de Antecedentes

2.2.1 Pretratamientos

Suárez (2017) evaluó los cambios en la mezcla de diferentes tipos de biomasa lignocelulósicas (bagazo de caña de azúcar y hojarasca), luego de ser sometidas a un pretratamiento químico; implementado para aumentar la exposición de la celulosa para su posterior

hidrólisis enzimática. En este estudio se utilizó el pretratamiento con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) sobre la mezcla en proporción (90:10) del bagazo de caña de azúcar y hojarasca, esto se llevó a cabo con la finalidad de evaluar el comportamiento de las biomásas cuando están mezcladas. Los resultados obtenidos en la etapa de pretratamiento presentan un buen rendimiento de remoción de lignina insoluble de 88,5% con condiciones de reacción a 80 min, 25°C, 7% de peróxido de hidrógeno y un rendimiento de 79,5% de remoción bajo condiciones a 40 min, 25°C, 3% de peróxido de hidrógeno. Para la lignina soluble con 58,8% de remoción y condiciones a 80 min, 25°C, 7% de peróxido de hidrógeno, y un rendimiento de reacción de 61,67% con condiciones de 40 min, 25°C 7% de peróxido de hidrógeno, considerados con alta solubilización de la lignina.

Crimes (2017) en su trabajo realiza la evaluación de varios métodos de pretratamiento para la producción de bioetanol en Sudáfrica a partir del bagazo de la caña de azúcar, considerando la posibilidad de producir metano. Los métodos de pretratamiento utilizados son prehidrólisis ácida, explosión de vapor, deslignificación con hidróxido de sodio, hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática. Estas opciones de pretratamiento se organizaron en una superestructura y la optimización se realizó descomponiendo la superestructura en ocho posibles diagramas de flujo. Este estudio definió como mejor opción el pretratamiento por explosión de vapor para la producción de metano únicamente. La hidrólisis ácida se puede agregar a la explosión de vapor para producir glucosa (para la producción de bioetanol), y esto aumenta la rentabilidad y reduce el impacto ambiental del diagrama de flujo de explosión de vapor únicamente; sin embargo, el caudal de glucosa de la explosión de vapor con el diagrama de flujo de hidrólisis ácida es bajo. Por último, sugiere la explosión de vapor con diagrama de flujo de hidrólisis enzimática para producir un mayor caudal de glucosa; pero el impacto ambiental de este diagrama puede ser grande si el consumo de electricidad de la producción de enzimas es grande. Este estudio contribuye

información importante para la selección de los métodos de pretratamientos con mayor potencial que se evaluarán en este proyecto.

2.2.2 *Cienciometría*

Roth, Hoeltz, & Benitez (2020) realizó un análisis bibliométrico y bibliométrico utilizando la base de datos Elsevier Scopus y el software VOSviewer, con artículos científicos publicados entre 2007 y 2018, el análisis mostró que la investigación sobre el uso de la biomasa lignocelulósica se centra en la obtención de biocombustibles mediante hidrólisis enzimática.

Los análisis bibliométricos con VOSviewer revelaron un aumento astronómico en las publicaciones entre 2000 y 2020, y aclararon los temas centrales de investigación explorados con más frecuencia, las publicaciones y los autores más citados, y los países/regiones con el mayor número de citas. Estos hallazgos sugieren que la investigación en la aplicación de la fermentación en estado sólido para el bioprocesamiento de desechos agroindustriales ha ganado importancia en los últimos 50 años. (Yafetto, 2022)

2.2.3 *Simulador*

Valderramaa., Quinterob, & Kafarova (2020) utilizaron el simulador Aspen plus V8.6 en estado estable para simular el proceso de producción de etanol, tanto de primera como segunda generación, por medio de un esquema de proceso individuales. En estos esquemas se procesaron 38 toneladas de caña de azúcar por hora; conforme las condiciones de operación y rendimientos reportados por un ingenio azucarero ubicado en la región del Valle del Río Cauca.

El 60 % del bagazo de caña de azúcar obtenido se utilizó como combustibles, mientras que el 40 % restante se utilizó para la producción de bioetanol de segunda generación. Esta simulación permitió obtener valores mínimos de consumo de agua y energía para la producción de bioetanol.

Los resultados obtenidos en este estudio por medio del simulador Aspen Plus, demuestran la importancia que tiene la obtención de los consumos de agua y energía para la producción de bioetanol de segunda generación, al momento de elegir el pretratamiento más eficiente.

(Montiel Rivas , 2017) realiza la simulación de procesos de los pretratamientos por explosión de vapor, agua caliente y organosolventes. Los resultados de la simulación muestran que es posible la producción económicamente factible de etanol a partir de bagazo de caña.

2.2.4 *Diseño de Reactores*

Neila & Viatchelav (2017) patentaron una invención correspondiente a un reactor multifuncional para el pretratamiento continuo de biomasa. En este estudio se definen los mecanismos de alimentación y la definición de las variables de diseño que debe tener un reactor de pretratamiento para la obtención de los azúcares fermentables de la biomasa lignocelulósica.

Los autores (Ja Kyong Ko, 2018), (Manali Kapoor, 2017, p. 3) y (Oluwakemi , Scott M., & Hancock, 2015). Coinciden con las condiciones de trabajo óptimas de presión, temperatura y concentración de ácido diluido para un reactor de pretratamiento.

Los autores (Aditi Wagle, 2022, p. 7), (Yang Huang, 2021) & (Shahabaldin Rezania, 2020, p. 9) coinciden en las condiciones de presión, temperatura y concentración de peróxido de hidrógeno óptimas para un reactor de pretratamiento.

2.2.5 *Análisis Ambiental*

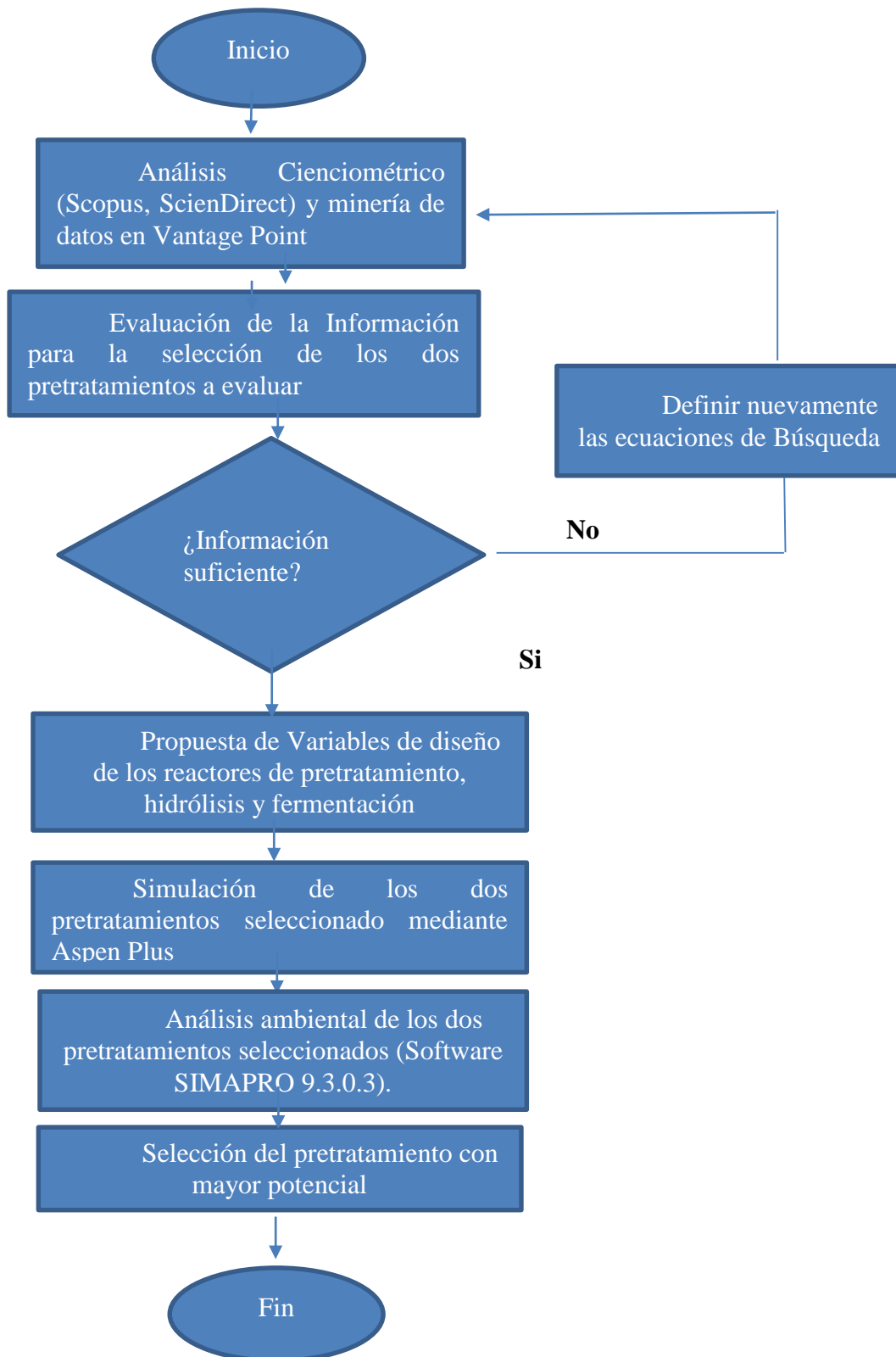
Lourdes Zumalacárregui (2015) presenta un estudio comparativo de las potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. Este estudio concluye que al producir etanol por hidrólisis del bagazo ocasiona una pérdida de las potencialidades de producción de electricidad entre 45% y 64% (en dependencia de si se considera el etanol producido

a partir de celulosas y hemicelulosas o solamente de celulosas) cuando se compara con la electricidad producida quemando el bagazo húmedo (50%). Si se utiliza la lignina contenida en el bagazo y se produce biogás a partir de las vinazas de destilería esta pérdida de potencialidades energéticas se reduce 35%. Sin embargo, en el análisis ambiental realizado la huella de carbono disminuye, aun cuando se queme la lignina y el biogás para producir mayor cantidad de energía, de donde la alternativa de producción de etanol a partir del bagazo es beneficiosa desde el punto de vista ambiental.

Shiyu Pan (2022) presentó el estado actual y los desafíos en la conversión de bagazo de caña de azúcar (SCB) en biocombustibles como biohidrógeno, biometano, biometanol, bioetanol y biobutanol. También analizó las principales perspectivas económicas y medioambientales para evaluar la economía y el respeto por el medio ambiente del SCB como materia prima para la producción de biocombustibles. Además, su estudio también destaca las brechas de conocimiento existentes que podrían inspirar a los lectores a afinar su investigación, innovaciones y plan de negocios para el desarrollo de tecnologías rentables para la producción de biocombustibles basados en SCB.

3 Metodología

Figura 5. Metodología de evaluación de los pretratamientos



En la etapa del **análisis cuantitativo** se construyeron las ecuaciones de búsqueda en Scopus, Science direct y se realizó minería de datos en el software Vantage Point permitiendo obtener artículos científicos, revisiones y patentes publicados en la ventana de observación 2012–2022 (se tomó una ventana de observación de diez años) y se analizaron los siguientes indicadores: palabra clave, el año de publicación, autor(es), distribución geográfica, instituciones, idiomas, índice de citación y patentes.

Se evaluaron los siguientes indicadores bibliométricos: (1) Indicadores Básicos (publicaciones por año, Publicaciones por países, publicaciones por instituciones y publicaciones por autores), (2) Índices de relación (relación entre palabras claves, relación entre países por estudio de pretratamiento, colaboración entre países y colaboración entre autores que tienen cinco o más publicaciones).

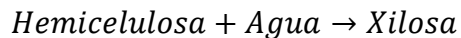
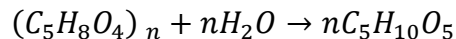
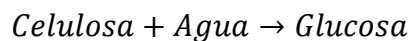
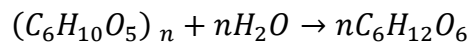
La información obtenida en el análisis bibliométrico está orientada en lo siguiente: 1) realizar una comparación entre los diferentes tipos de pretratamientos (ácido fosfórico, peróxido de hidrógeno, líquidos iónicos y ultrasonido) para la producción de bioetanol de segunda generación; 2) información de los requerimientos de energía, agua, costos, escalamiento industrial y rendimiento de la producción de bioetanol de acuerdo al tipo de pretratamiento; 3) Tipos de reactores de pretratamiento y sus condiciones operacionales; 4) variables de diseño de un reactor de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar y 5) metodología de análisis de ciclo de vida para pretratamientos

En la etapa de **simulación de procesos** se escogieron los dos pretratamientos con mayor potencial para ser llevados a escala industrial (Ácido fosfórico y Peróxido de hidrógeno alcalino) de acuerdo con la literatura obtenida del análisis cuantitativo. Igualmente, las variables de

diseño para los reactores de pretratamiento, hidrólisis y fermentación de estos dos procesos evaluados fueron obtenidas de la cienciométrica

Las simulaciones de estos dos pretratamientos se realizaron mediante el software ASPEN PLUS, permitiendo obtener los datos de rendimiento en la producción de bioetanol, consumos de agua, energía eléctrica y reactivos.

Se tomó como base de cálculo 100.000 kg/h de bagazo de caña húmeda para el pretratamiento por ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno. Este bagazo está compuesto por celulosa, hemicelulosa, y lignina. Al ser hidrolizadas la celulosa y hemicelulosa se transforman en glucosa y xilosa respectivamente por las siguientes reacciones:



La concentración de hemicelulosa corresponde al polisacárido xilano y lignina se modela el comportamiento como alcohol coniferílico ($C_{10}H_{12}O_3$) ya que es el constituyente principal de la lignina.

De acuerdo con (WOOLEY & PUTSCHE, 1996) se alimentó la base de datos del simulador, en cuanto a propiedades físicas y químicas de glucosa, xilosa, celulosa, hemicelulosa y lignina

De acuerdo con (Montiel Rivas, 2017) el modelo termodinámico más adecuado para la simulación del proceso de obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos es Non Random Two Liquids (NRTL).

La evaluación de los **impactos ambientales** de los pretratamientos seleccionados y simulados en Aspen Plus se realizó empleando la metodología de análisis de ciclo de vida de los pretratamientos por ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno. Esta fase se evaluó de acuerdo a la norma ISO 1401 y 1402 llevando a cabo las siguientes fases: (1) definición de objetivos y alcance, (2) realización de un análisis de inventario, (3) evaluación de impacto y la interpretación de resultados.

Los métodos de impacto ambiental IMPACT 2002, Cumulative Energy Demand V1.11 y IPCC 2021 GWP500 V1.00 del software SIMAPRO 9.3.0.3 fueron escogidos primeramente porque es un referente en la literatura con relación a la obtención de bioetanol a partir de la biomasa y en segundo lugar porque IMPACT 2002 evalúa procesos de ingeniería, Cumulative Energy Demand V1.11 evalúa la demanda energética y GWP500 V1.00 estima la huella de carbono o emisiones de gases efecto invernadero.

Por último, se seleccionó el **pretratamiento con mayor potencial** para ser llevado a escala industrial considerando los resultados de los métodos de impacto ambiental con relación a perfiles medioambientales, requerimiento de energía y huella de carbono o emisiones de gases efecto invernadero.

4 Resultados y discusión

4.1 Evaluación a Través de un Estudio Científico de los Cuatro Pretratamientos Químicos de Bagazo de Caña de Azúcar; Identificando los Dos con Mayor Potencial de ser Llevado a Escala Industrial

Se planteó una ecuación de búsqueda en Scopus el día 16 de mayo del 2023 encontrándose 1268 documentos. Seguidamente se realizó minería de datos en el software VantagePoint

obteniendo 1265 documentos relacionados con las palabras claves bagazo de caña, biomasa lignocelulosa, ácido fosfórico, peróxido de hidrógeno, líquidos iónicos y ultrasonido

Tabla 2. Ecuación de búsqueda general

Ecuación de Búsqueda seleccionada	Base de Datos	
TITLE-ABS-KEY ("cane bagasse" OR "Lignocellulosic Biomass") AND TITLE-ABS-KEY ("Phosphoric acid" OR "hydrogen peroxide" OR "Ionic liquids" OR ultrasound) PUBYEAR > 2011 AND (EXCLUDE (PUBYEAR , 2023))	Scopus 1268 documentos	VantagePoint 1265 Documentos

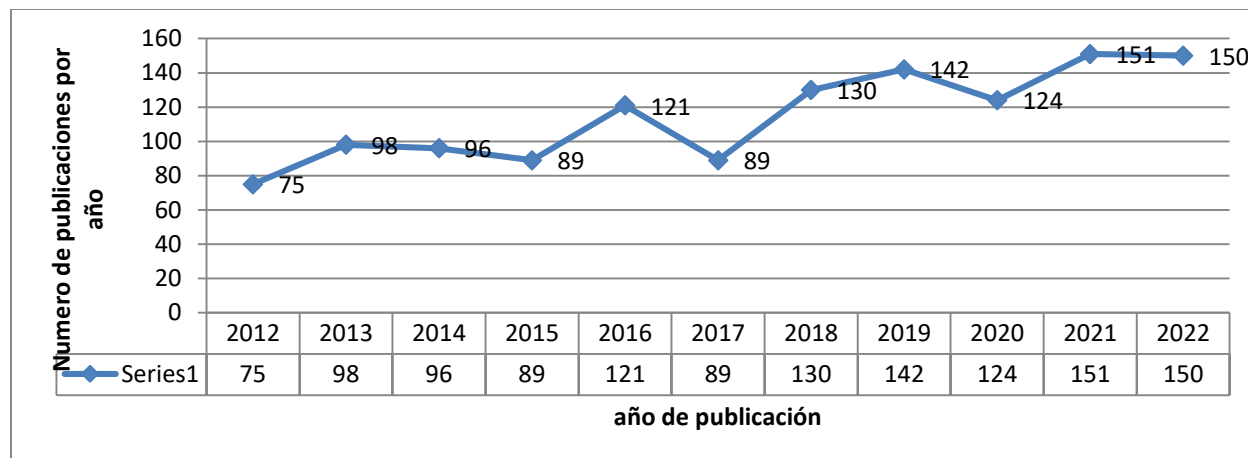
A continuación, se presentan los indicadores bibliométricos para el análisis y seguimiento de la evaluación del desempeño de pretratamientos químicos sobre bagazo de caña de azúcar para la producción de bioetanol.

4.1.1 Indicadores Básicos

Estos indicadores abarcan el número de publicaciones por año, autores, países e instituciones a nivel mundial y nacional.

4.1.1.1 Publicaciones por Año. En la figura 6 se puede notar que a pesar de la disminución en ciertos periodos de tiempo de la aparición de publicaciones en el área, la investigación en este tema sigue causando gran interés en la comunidad científica. Este comportamiento nos indica que es un tema que sigue causando interés y tiene mucha área por investigar.

Figura 6. Publicaciones por año o dinámica científica.



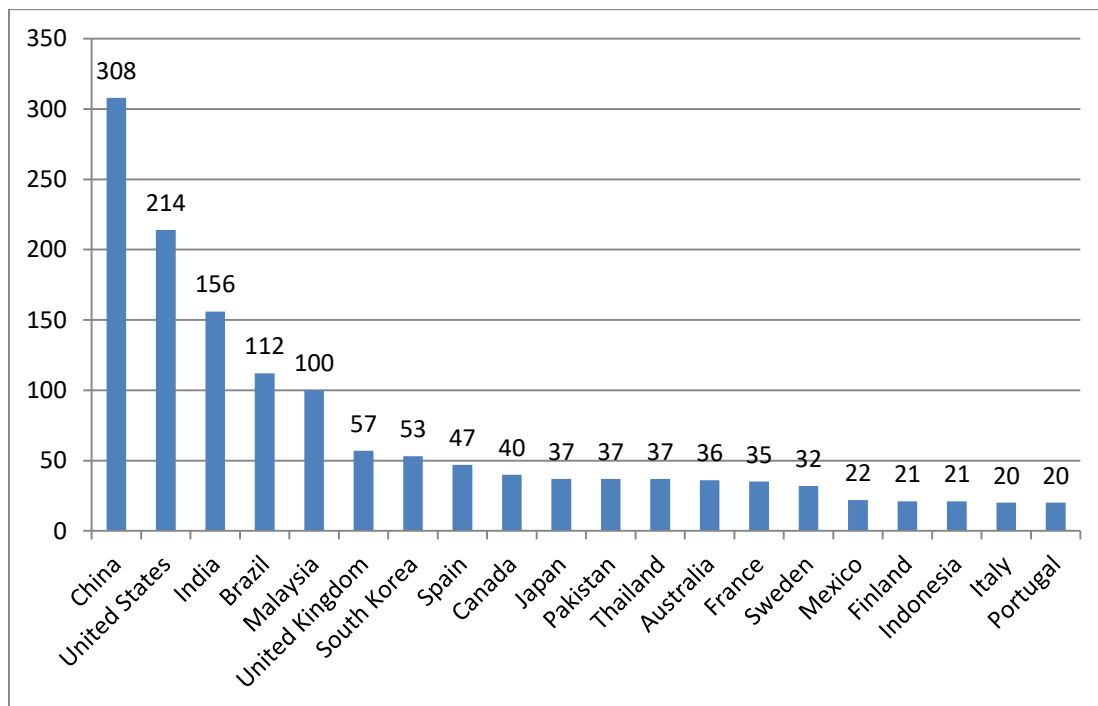
Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1). Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

4.1.1.2 Publicaciones por Países. De acuerdo con la figura 7, se puede apreciar el top 24 de los países con mayor número de publicaciones de los cuatro pretratamientos en estudio. Mientras que la figura 8 muestra la Producción por Latinoamérica y en la figura 10 se muestra la densidad de publicación de acuerdo a la coloración del mapa por país. Estos resultados permiten identificar el liderazgo de los países en este tema de investigación.

El **análisis de tendencia** de la publicación por países está directamente relacionado con aspectos como su nivel de desarrollo, las necesidades que tienen en su entorno y la importancia de reducir los impactos ambientales ocasionados por la actividad humana.

de acuerdo a los datos reportados en el año 2021 por la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO) los principales países productores de caña de azúcar en orden descendente son: Brasil, india, china, Pakistán, Tailandia, México, Indonesia, Australia, estados unidos, Guatemala, Filipinas, Colombia, Argentina, Sudáfrica, Egipto, Myanmar, Ecuador, Cuba, Vietnam y Bolivia. Ahora si comparamos el listado anterior con el top 24 de la figura 7 se puede notar que solo algunos países con alta producción de caña de azúcar están interesados en el aprovechamiento de su biomasa (China, Estados Unidos, India, Brasil, Pakistán, Tailandia, Australia y México) y los del top 24 que no hacen están en el rango de los países con mayor producción de caña de azúcar, tienen un interés en el pretratamiento del bagazo de caña. Esto se debe a que algunos países son desarrollados o subdesarrollados y dentro de sus políticas tienen incluidas el aprovechamiento de la biomasa y la bioenergía.

Figura 7. Top 24 participación de países según el número de Publicaciones.

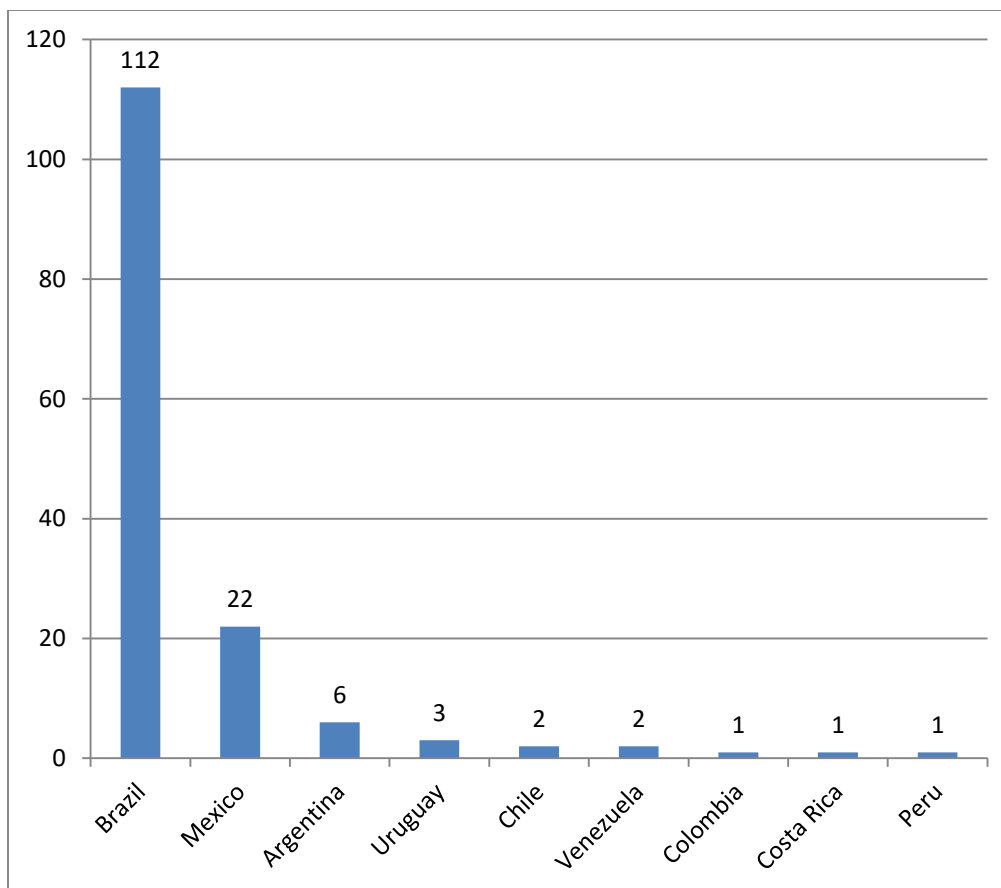


Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1). Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

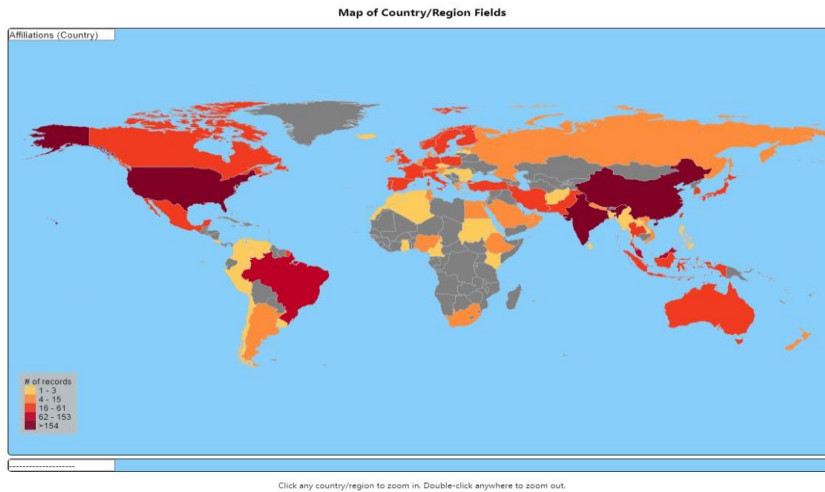
La figura 8 muestra a Brasil como líder en Latinoamérica en la producción científica relacionada con los pretratamientos en estudio seguido de México, Argentina, Uruguay, Chile, Venezuela, Colombia, Costa Rica y Perú.

En la figura 9 se puede notar la coloración oscura y clara de los países que han contribuido a la investigación del pretratamiento de biomasa. La coloración oscura corresponde a aquellos países que tienen mayor número de publicación y los de color claro a los países con menor número de publicaciones. Se puede deducir el interés investigativo de los países Estados Unidos, India y China en mayor proporción, debido a su alta reserva de biomasa residual y sus políticas energéticas.

Figura 8. Producción por Latinoamérica

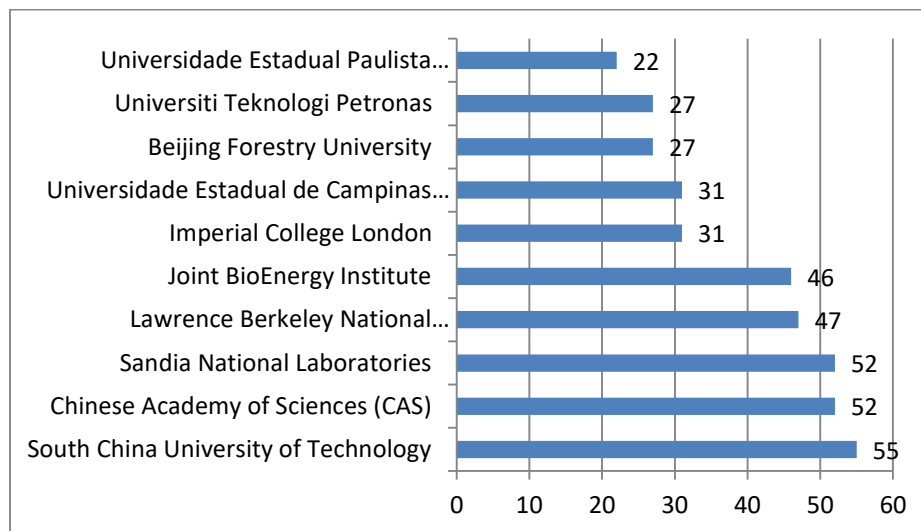


Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1). Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

Figura 9. Densidad de publicación por países.

Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1). Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

4.1.1.3 Participación por Instituciones.

Figura 10. Top 10 participación de instituciones según el número de publicaciones (2012-2022)

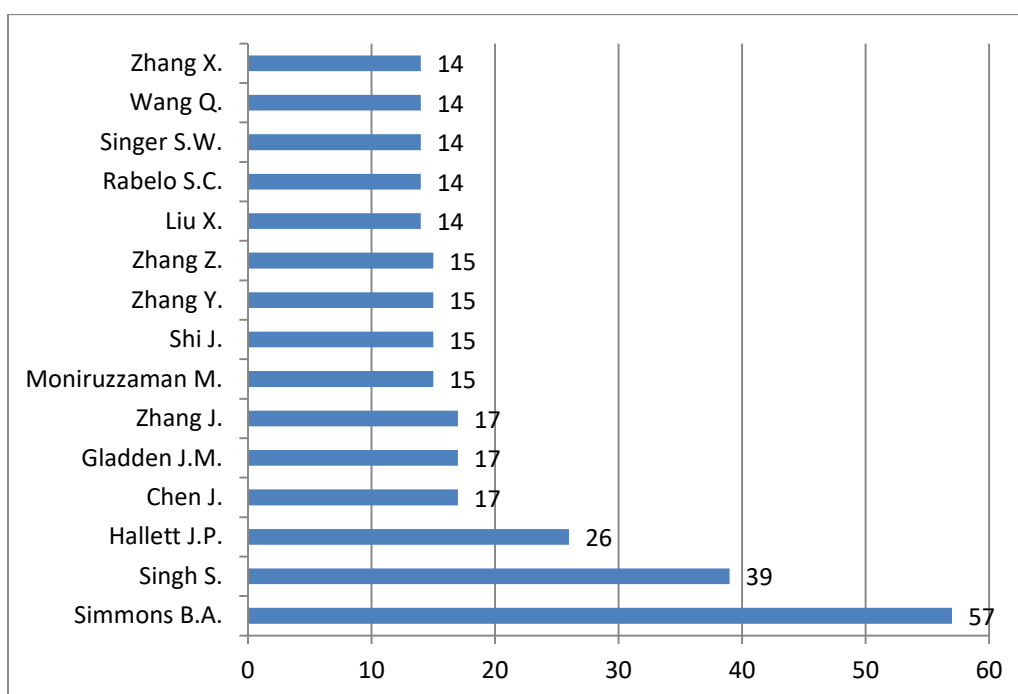
Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1). Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

La figura 10 muestra la participación de instituciones en la ventana de observación (2012-2022), la institución con mayor registro de artículos es South China University of Technology,

China. A pesar que China produce menor cantidad de caña de azúcar comparado con Brasil a nivel mundial, este país lidera las investigaciones relacionadas con pretratamiento de bagazo de caña de azúcar.

4.1.1.4 Participación por Autores. A continuación, en la figura 11 se presenta el top 15 de la participación por autores. Destacándose el autor Simmons, B.A con 57 publicaciones relacionadas con el tema en estudio.

Figura 11. *Top 10 Participación por autores*



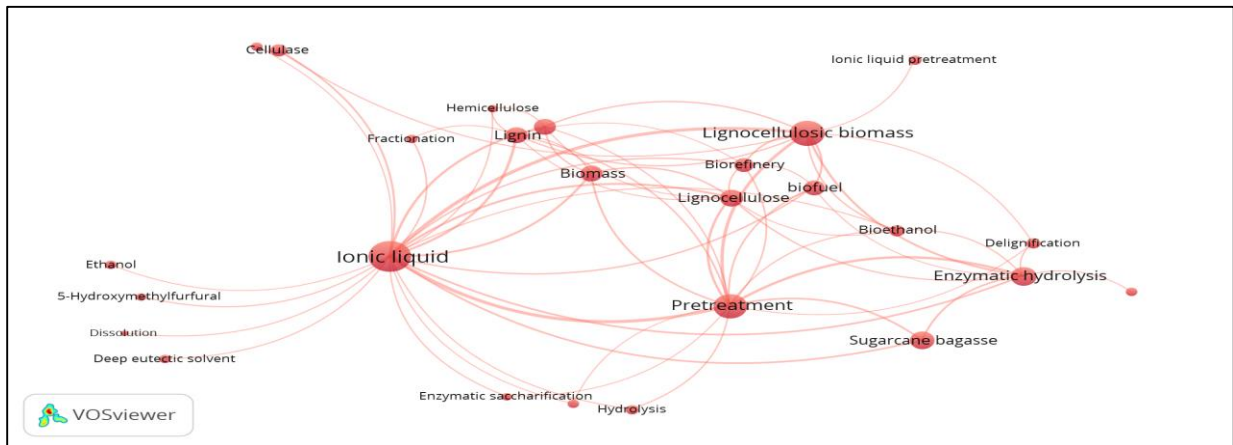
Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1). Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

Simmons, B.A es líder de investigación en Deconstruction Division, Joint BioEnergy Institute, Emeryville, CA, United States, Biological and Materials Science Center, Sandia National Laboratories, Livermore, CA, United States / United States. Esta institución es una de las que más ha desarrollado investigaciones en temas relacionados con la biomasa lignocelulosa.

4.1.2 Índices de Relación

4.1.2.1 Relación Palabras Claves. Se escogió un umbral de 101 en el software Vantage point y luego se realizó el análisis en el software VOSViewer obteniendo la siguiente figura 12.

Figura12. Relación entre palabras claves



Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1) y VOSviewer. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

El tamaño de la esfera indica el número de publicación y el color común entre ellas la coocurrencia que existe. La palabra clave “Ionic liquid” tiene el mayor número de publicaciones, seguida de “Lignocellulosic biomass”, “pretreatment”, “Surcane bagasse” y “Enzymatic Hydrolisis”. El color homogéneo muestra que las palabras están estrechamente relacionadas.

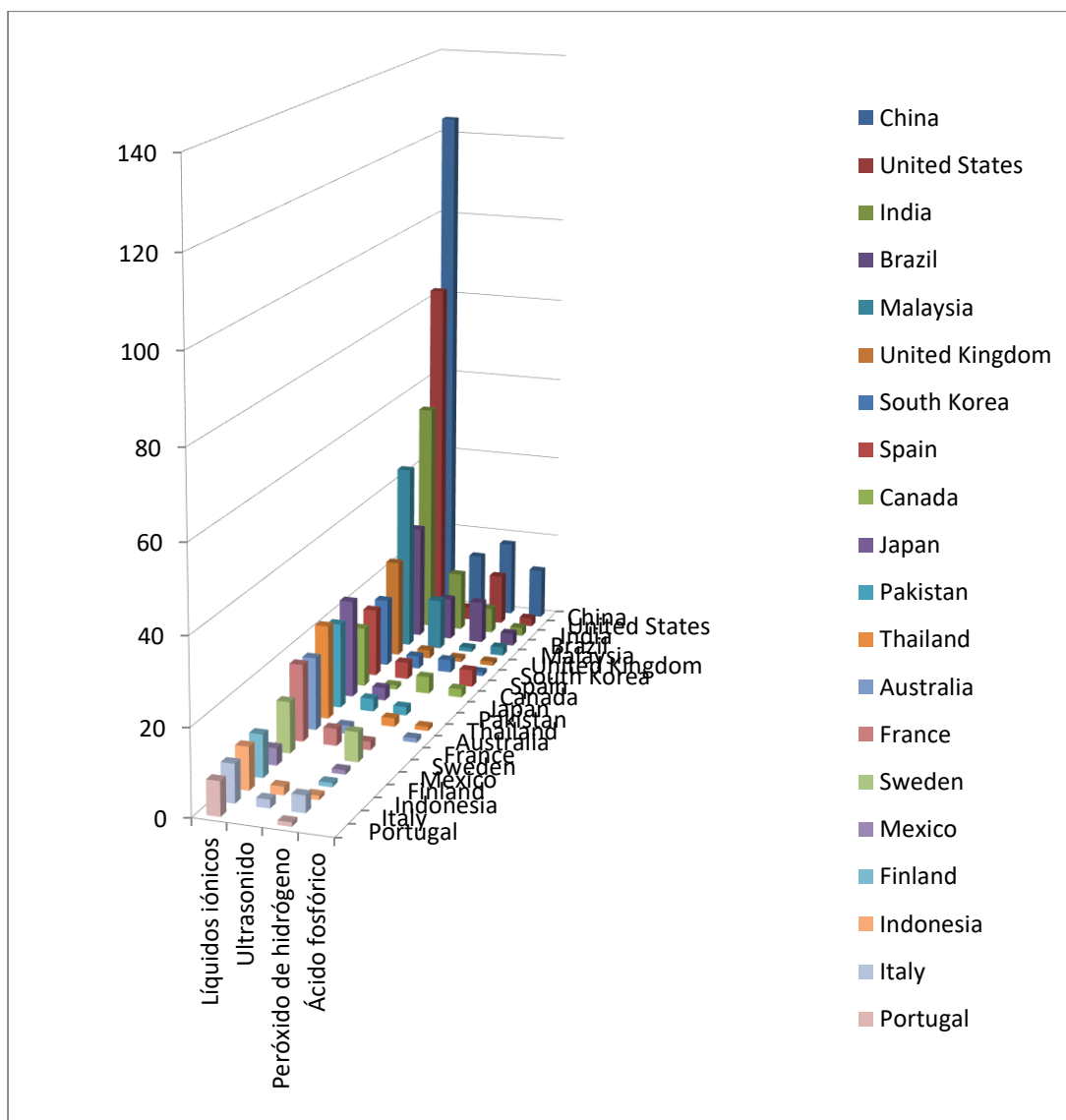
4.1.2.2 Relación entre países por estudio de pretratamiento. Se escogió un umbral de 21 en el software Vantage point relacionados con los cuatro pretratamientos en estudio.

La siguiente figura muestra un análisis de columna de los pretratamientos en estudio por países. La figura 13 muestra el liderazgo en investigación que tiene China en pretratamientos de biomasa lignocelulósica y cuenta con los siguientes números de publicaciones de acuerdo a la

ventana de observación; líquidos iónicos (124), peróxido de hidrógeno (18) y ácido fosfórico (12)). Mientras que India lidera publicaciones relacionadas con Ultrasonido (14).

Estos resultados muestran el gran interés investigativo que tienen los líquidos iónicos, ya que es considerada una tecnología ambientalmente limpia, sin embargo, su limitación o cuello de botella son los costos de los reactivos y el alto gasto en la recirculación en la etapa de pretratamiento.

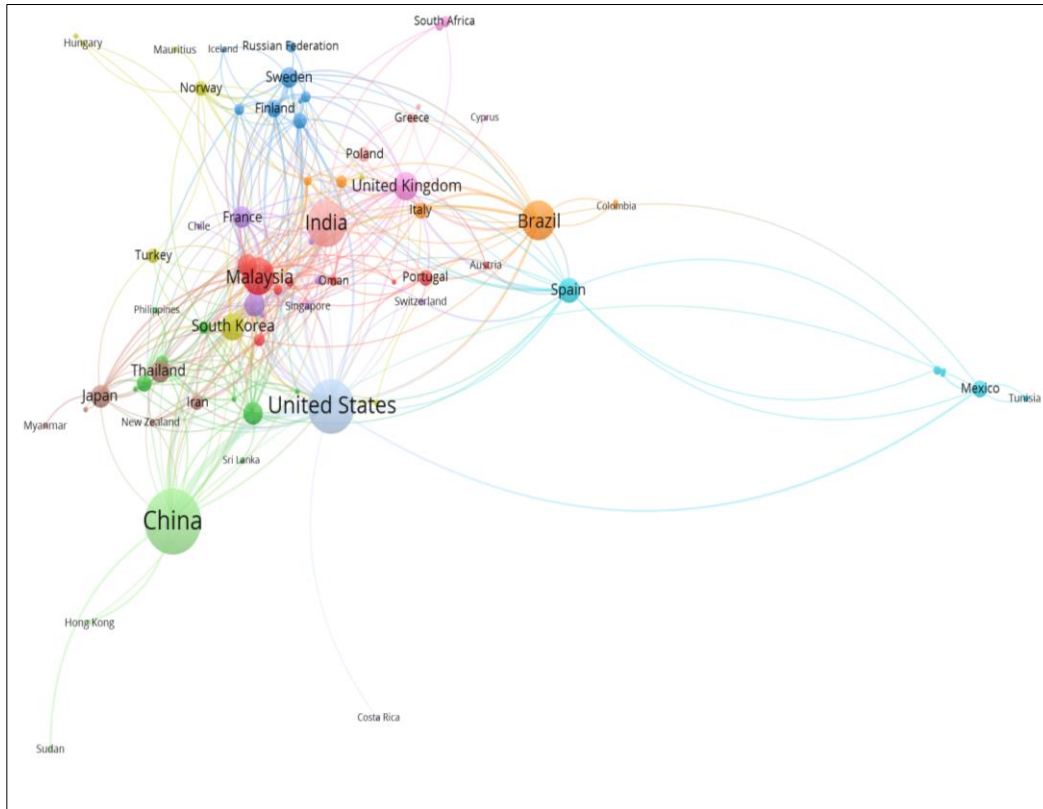
Figura 13. Relación entre países



Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1). Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga

4.1.2.3 Colaboración Entre Países. En la figura 14. Se puede observar la colaboración entre los países. El tamaño de cada esfera nos muestra el liderazgo o número de publicaciones relacionadas con los pretratamientos en estudio. China ocupa el primer lugar seguido de Estados Unidos, India, Brasil, Reino Unido, Corea del Sur, España, Japón, Australia, etc.

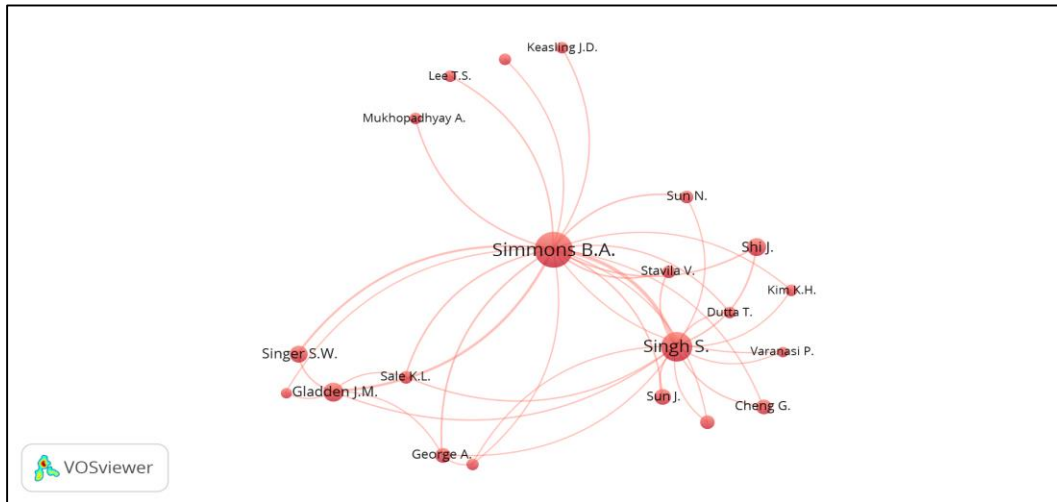
Figura 14. *Relación entre países*



Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1) y VOSviewer. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

4.1.2.4 Colaboración Entre Autores que Tienen Cinco o más Publicaciones.

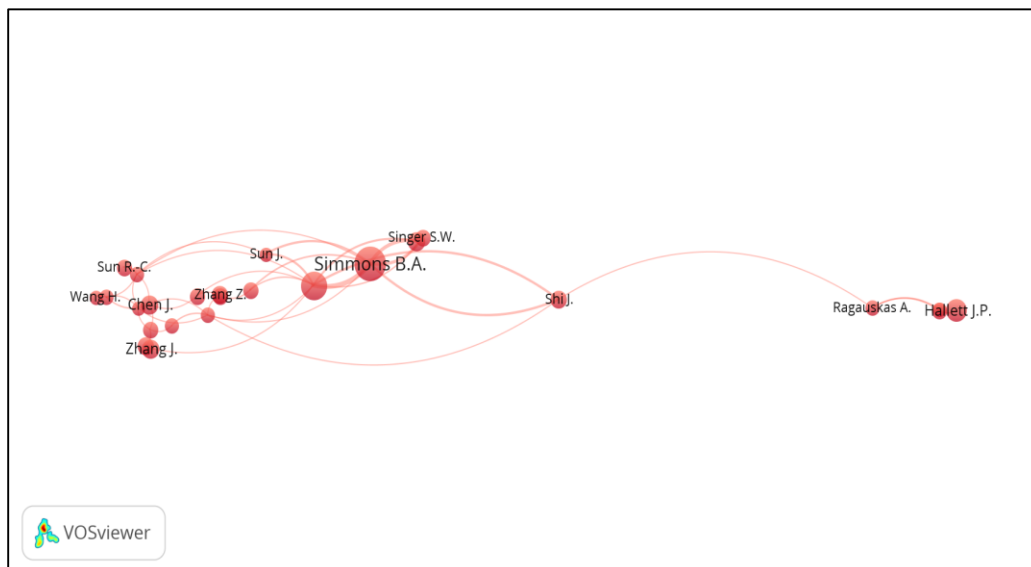
En la figura 15 muestra la gran colaboración entre los autores de todo el mundo, sobresale la red de coautoría entre los autores Simmons, B.A. que cuenta con la mayor relación con un total de 57 referencias, seguido por el autor Singh, S. con un total de 39 referencias.

Figura 15. Colaboración entre autores con cinco o más publicaciones

Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1) y VOSviewer. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

4.1.2.5 Colaboración entre 30 Autores Principales

Se escogieron 22 autores líderes y la colaboración entre ellos como se muestra en la figura 16.

Figura 16. Colaboración entre 22 autores principales

Nota: cálculos basados en información de la base de datos Scopus (Elsevier B.V., 2023), procesados con VantagePoint (Search Technology, versión estudiantil 14.1) y VOSviewer. Unidad de Bibliometría - CRAI Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga.

El autor Simmons, B.A tiene actualmente 476 documentos de los cuales 40 publicaciones están relacionadas con las palabras claves Biomass, Delignification y Ethanol Production. Sin embargo, los documentos publicados por este autor relacionados con los pretratamientos están enfocados en los líquidos iónicos y algunos de ácidos diluidos.

Una vez se realizó el análisis cuantitativo con ecuación de búsqueda de la tabla 2, relacionados con las palabras bagazo de caña, biomasa lignocelulosa, ácido fosfórico, peróxido de hidrógeno y ultrasonido. Fue necesario plantear tres ecuaciones de búsqueda que incluya aspectos como: escalamiento a nivel industrial, costos de reactivos, evaluación ambiental. El documento obtenido de estas ecuaciones de búsqueda permitió definir e identificar las variables de diseño de los reactores y la selección de los pretratamientos con mayor potencial para ser llevados a escala industrial.

4.1.2.6 Análisis Cuantitativo por Escalamiento.

Ecuación de Búsqueda seleccionada	Base de Datos Scopus
TITLE-ABS-KEY ("cane bagasse" OR "Lignocellulosic Biomass") AND TITLE-ABS-KEY ("Phosphoric acid" OR "hydrogen peroxide" OR "Ionic liquids" OR ultrasound) PUBYEAR > 2011 AND KEY (scal*) AND (EXCLUDE (PUBYEAR , 2023))	31 documentos

4.1.2.7 Escalamiento a Nivel Industrial del Pretratamiento por Ultrasonido. Las principales características de los pretratamientos de biomasa asistidos por ultrasonidos se pueden resumir en reducción de tiempo, temperaturas de proceso más bajas (incluso a temperatura ambiente) y la posibilidad de trabajar con reactores operando a presión atmosférica, sin embargo,

esta en tela de juicio el diseño eficiente de los reactores y el escalamiento industrial de esta técnica. (Erico M.M. Flores, 2021)

Para Zhenquan Ong (2020) el principal cuello de botella de la tecnología de ultrasonidos radica en la dificultad de convertirlo de su escala de investigación a escala industrial. El procesador ultrasónico de escala industrial puede enfrentarse a limitaciones como la distribución no uniforme de la intensidad de la energía o la imposibilidad de alcanzar la amplitud requerida. Además, el desperdicio de energía durante el pretratamiento por ultrasonido, la competitividad económica también es un desafío importante en la aplicación de ultrasonidos en una producción industrial.

Madeleine & Bussemaker (2017) en un análisis técnico económico de producción de bioetanol con organosolvente y ultrasonido se logró concluir que el 63 % del gasto de energía eléctrica para producir bioetanol es consumido por el pretratamiento ultrasonido.

(Zhang*, 2013) Se requiere un novedoso diseño de sonoreactores para garantizar una aplicación exitosa de biorrefinerías a escala industrial

4.1.2.8 Escalamiento a Nivel Industrial del Pretratamiento por Líquidos Iónicos. El pretratamiento de la biomasa lignocelulósica tiene la ventaja de separar la celulosa de la lignina y disolver la hemicelulosa, sin embargo, es una técnica muy costosa pues requiere grandes volúmenes de reactivos para llevarlos a una escala industrial. En el caso de los líquidos iónicos, estos han mostrado un nivel de potencial para la producción a escala industrial en términos de pretratamiento de biomasa.

Hasanov (2020) los líquidos iónicos han mostrado un nivel de potencial para la producción a escala industrial en términos de pretratamiento de biomasa. Además de esto Los líquidos Iónicos son solventes verdes en perspectiva para el pretratamiento de biomasa lignocelulósica. Esta técnica ha sido eficiente en la remoción de lignina y obtención de la celulosa y hemicelulosa.

la mayoría de los estudios realizados con el pretratamiento de biomasa a partir de los líquidos iónicos se han limitado a escala de laboratorio, es necesario realizar más investigaciones para que la aplicación de este método sea comercialmente viable a escala industrial. Por otra parte, el uso de líquidos iónicos en el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica presenta ciertas deficiencias: (i) la recuperación y reutilización de líquidos iónicos es un desafío, (ii) el uso es costoso a pesar de algunos avances en su abaratamiento, (iii) después de la extracción de celulosa, la recuperación de hemicelulosa y lignina de las ILs plantea algunas dificultades (iv) pueden ser tóxicas para microorganismos y enzimas. (Zeba Usmani, 2020)

Utiliza el pretratamiento de bagazo de caña con líquidos iónicos de manera exitosa. Rango de operación 80 °C a 170 °C, tiempo de 3 a 8 horas. Resultados: separación de la celulosa del material lignocelulósico y la disolución de la celulosa es reciclable y ecológica. Sin embargo, requiere grandes volúmenes de reactivos (líquidos iónicos) obteniendo una solución viscosa tediosa de trabajar a escala industrial. (Silva et al., 2019) De acuerdo con Perez-Pimienta et al (2016) los líquidos iónicos son solventes costosos, lo que es perjudicial para su aplicación a gran escala en la industria. Así, su reciclaje y reutilización en el pretratamiento de biomasa puede ser una herramienta eficaz para reducir la cobertura de costos.

4.1.2.9 Escalamiento a Nivel Industrial del Pretratamiento por Peróxido de Hidrógeno. El peróxido de hidrógeno es utilizado por primera vez en el año 1984. Tiene la capacidad para atacar selectivamente los grupos carbonilo y etileno mejora el proceso de deslignificación de la biomasa lignocelulósica. Las capacidades de esta técnica de pretratamiento para disociar la matriz recalcitrante de biomasa indican su potencial para mejorar la accesibilidad

de la biomasa para lograr la valorización. El análisis técnico-económico y de costo beneficio indica una viabilidad de aplicar a escala industrial.

El pretratamiento por peróxido de hidrógeno ha mostrado potenciales prometedores en la valorización de la biomasa debido a su compatibilidad con la bioconversión posterior y condiciones suaves de operación, sin embargo, requiere tiempos de residencia más prolongados para lograr una deslignificación eficiente. Por lo tanto, para llevarlo a escala industrial es requerido hacer un diseño eficiente de una instalación de flujo de reciclaje para recuperar el químico gastado y reducir los tiempos de retención. Sin embargo, de acuerdo con (Guilherme A A, 2015) esta técnica tiene la facilidad de ser llevada a escala industria debido a la alta disponibilidad de los reactivos y la falta de formación de inhibidores. (Mun ChunHo, 2019)

El uso de peróxido de hidrógeno para el pretratamiento de biomasa tiene su propio conjunto de ventajas y limitaciones en comparación con otro tipo de métodos de pretratamiento. Algunas de las ventajas de utilizar el método de pretratamiento incluyen la capacidad de reducir e incluso prevenir (en algunos casos) la formación de 5-HMF y furfural durante todo el proceso de pretratamiento. Se sabe que ambos inhibidores son perjudiciales para el proceso de fermentación en etapas posteriores del bioprosesamiento para producir biocombustibles. (Mun Chun Ho V. Z., 2019)

El pretratamiento con peróxido de hidrógeno se puede realizar en condiciones relativamente más suaves (concentración, temperatura) y presión atmosférica, mientras se elimina eficazmente la lignina de varios residuos agrícolas. Además, el peróxido alcalino es un reactivo relativamente "verde" con bajo impacto ambiental, ya que se puede descomponer fácilmente para producir agua y oxígeno como productos finales. (Cabrera E M. M., 2014)

4.1.2.10 Escalamiento a Nivel Industrial del Pretratamiento Ácido Fosfórico. El

autor líder del análisis cuantitativo realizado en la sección 4.1 Simmons, Blake en su estudio “Enhanced softwood cellulose accessibility by H₃PO₄ pretreatment: high sugar yield without compromising lignin integrity” concluyo se puede pretratar biomasa de cualquier característica a condición de reacción suave, con alto rendimiento de azúcar a una baja carga de enzimas y ser llevado a escala industrial.

Priyanka (2021) Evaluó un pretratamiento secuencial optimizado de bagazo de caña (scb) de azúcar con 10 % (p/v) de carga de bagazo sin procesar al 1 % (p/v) de NaOH (50 °C, 2 h) seguido de tratamiento 85 %, v/ v ácido fosfórico (50 °C, 1 h) con acetona enfriada. Este scb pretratado secuencialmente mostró recuperación de celulosa, 66,1% (p/p) y deslignificación, 83,2% (p/p). Sin embargo, El bagazo pretratado con NaOH o Ácido fosfórico mostró una menor recuperación de celulosa 47,4 % (p/p) o 54,5 % (p/p) con menor deslignificación, 61 % (p/p) o 56 % (p/p), respectivamente. estos resultados obtenidos a escala de laboratorio colocan las bases para llevar este pretratamiento secuencial o con ácido fosfórico a escala industrial.

Fernanda LeitãoVaz (2021) Analizo siete pretratamientos químicos; cuatro ácidos (sulfúrico, cítrico, fosfórico y oxálico), dos alcalinos (hidróxidos de sodio y calcio) y uno oxidativo (peróxido de hidrógeno alcalino). Después de pretratar el bagazo de caña de azúcar con ácido fosfórico se obtiene la mayor eficiencia en la etapa de hidrólisis enzimático comparado los otros pretratamientos ácidos analizados. Este autor sugiere implícitamente la evaluación de este método a escala industrial utilizando el reciclado de la fracción líquida, ya que con los ciclos utilizados se puede ahorrar más del 62 % en reactivos y agua utilizada en el pretratamiento en un solo ciclo, posibilitando una economía en los costos en esta etapa del proceso.

4.1.3 Análisis Cienciométrico Costos de Reactivos

Ecuación de Búsqueda seleccionada	Base de Datos Scopus
TITLE-ABS-KEY ("cane bagasse" OR "Lignocellulosic Biomass") AND TITLE-ABS-KEY ("Phosphoric acid" OR "hydrogen peroxide" OR "Ionic liquids" OR ultrasound) PUBYEAR > 2011 AND KEY (costs*) AND (EXCLUDE (PUBYEAR , 2023))	38 documentos

4.1.3.1 Costos Pretratamientos Ultrasonido. Este método no requiere el uso de reactivos químicos para pretratar la biomasa, pero si es necesario un novedoso diseño de sonoreactores para garantizar una aplicación exitosa de biorrefinerías a mayor escala. Igualmente, el 63% del gasto de energía requerida en una biorefineria que utiliza la técnica de ultrasonido es utilizada por este método, llevando a generar altos costos operacionales.

4.1.3.2 Costos Pretratamiento Líquidos Iónicos. Los líquidos iónicos muestran grandes ventajas en el pretratamiento de biomasa lignocelulosa, la transformación de polisacáridos en productos químicos de plataforma, el aislamiento y la despolimerización de lignina, así como la síntesis posterior de materiales funcionales. Sin embargo, las aplicaciones de estos en campos de biomasa lignocelulosa están restringidas debido a su alto costo y potencial toxicidad. (Xiaoqi Lin, 2022, p. 12)

Los líquidos iónicos también se han estudiado ampliamente por su potencial para degradar lignina y descomponen la estructura de celulosa cristalina. El método ofrece altas tasas de recuperación de celulosa y conversión a glucosa. Sin embargo, aún existen muchos desafíos para usar líquidos iónicos a una escala más amplia, incluido su alto precio cuando se necesitan grandes cantidades para el proceso, alta generación de desechos con difícil recuperación, alta demanda de energía para el reciclaje y alta viscosidad de la solución a lo largo del tiempo que los hace difíciles de manejar. (Broda, Yelle, & Serwańska, 2022, p. 10)

(Angélica María Vele Salto, 2021, pág. 10) utiliza líquidos iónicos (LI) en hidrólisis ácida de material lignocelulósico para la obtención de azúcares, concluyendo que debido a los elevados costos de los líquidos iónicos es necesario para su aplicación a nivel industrial, considerar técnicas de recuperación y reciclaje de manera que los procesos se vuelvan rentables.

4.1.3.3 Costos Pretratamiento Peróxido de Hidrógeno Alcalino. Alencar (2017) evaluaron la influencia del reciclaje de la fracción líquida en el pretratamiento por Peróxido de hidrógeno (AHP) sobre el hidrólisis del rastrojo de maíz, a pesar de la disminución de la eficiencia después de cada paso de reciclaje, la reutilización de la fracción líquida conduce a una reducción del consumo de agua, H_2O_2 y NaOH de hasta un 57,6 %, 59,6 % y 57,6 %, respectivamente. Estos hallazgos apuntan a una tecnología de reciclaje eficiente, que puede reducir costos y ahorrar agua.

4.1.3.4 Costos Pretratamiento Ácido Fosfórico. Simmons (2020) trabajó el pretratamiento ácido fosfórico con madera de pino, concluyendo que esta técnica puede trabajar a condiciones suaves con altos rendimientos de azúcar y conservación de lignina, lo cual generaría un impacto positivo a la economía de un escalado industrial.

Das et al., (2021) El pretratamiento con ácido solo tiene un efecto limitado sobre la lignina y afecta principalmente a los polisacáridos. Las hemicelulosas se disuelven y los enlaces polisacárido-lignina se rompen, lo que hace que la celulosa sea más accesible a las enzimas. Sus principales desventajas son el alto costo de recuperación de ácido y la producción de subproductos inhibidores. Sin embargo, los aspectos ambientales y económicos del método han sido mejorados recientemente.

Esta técnica es una de las técnicas eficientes con menor costo y es fácil de operar. Si bien el pretratamiento con ácido es rentable, tiene algunas de las desventajas del alto costo del reactor

para su uso, la formación de yeso durante la neutralización después del pretratamiento y la formación de subproductos inhibidores. (Niju, 2019)

Rajendran (2018) El pretratamiento en presencia de ácido diluido se considera una técnica económica ya que la reacción se puede realizar en condiciones de reacción más suaves.

Bassante (2018) El pretratamiento con ácido diluido ha sido altamente usado debido a que aumenta la hidrólisis de la celulosa significativamente y a la vez el costo de inversión en equipos y reactivos se ve altamente reducido.

La tabla 3 presenta un estudio de un análisis técnico-económico realizado por (Mun Chun Ho V. Z., 2019, pág. 11), de los pretratamientos líquidos iónicos, ácidos diluidos, organosolvente, Explosión de fibra de amoníaco (AFEX), álcali diluido, agua caliente líquida, explosión de vapor y finalmente centra sus estudios en el pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino (AHP).

Tabla 3. *Análisis técnico-económico de varios pretratamientos de biomasa*

Type of pretreatment	CAPEX (\$ × 10 ⁶)	OPEX (\$ × 10 ⁶ /yr)	MESP (\$/gal)	Ref.
AHP	9.76	N/R	2.73	[77]
AHP with recycle stream	17.21	N/R	2.27	[77]
Organosolv	164.10	210.35	3.07	[79]
Ionic liquid	96.00	90.00	5.00	[80]
Ammonia fiber explosion	25.60	N/R	2.09	[81]
Dilute acid	114.63	50.06	3.18	[82]
Dilute alkali	102.77	52.70	3.35	[82]
Liquid hot water	101.89	48.10	3.07	[82]
Steam explosion	91.36	45.83	3.24	[82]

*N/R Not reported.

Nota. Obtenido de (Mun Chun Ho V. Z., 2019, p. 11)

Entendemos por CAPEX como el dinero que una organización gasta para comprar, mantener o mejorar sus activos fijos, mientras que el OPEX es un gasto continuo para ejecutar un producto o proceso y MESP es el precio mínimo de venta de etanol.

Analizando los pretratamientos en estudio (peróxido de hidrógeno, ácido fosfórico, ultrasonido y líquidos iónicos) de este trabajo el pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino tiene mayor beneficio económico con respecto al CAPEX, el gasto operativo o OPEX es más beneficioso en la técnica por ácido diluido, aunque no se haya reportado el valor de AHP.

4.1.4 *Análisis Ciencimétrico por Análisis Ambiental*

Ecuación de Búsqueda seleccionada	Base de Datos Scopus
TITLE-ABS-KEY ("cane bagasse" OR "Lignocellulosic Biomass") AND TITLE-ABS-KEY ("Phosphoric acid" OR "hydrogen peroxide" OR "Ionic liquids" OR ultrasound) PUBYEAR > 2011 AND KEY (environmental AND analysis*) AND (EXCLUDE (PUBYEAR , 2023))	20 documentos

4.1.4.1 Análisis Ambiental Pretratamientos Ultrasonido. Este método de pretratamiento no utiliza químicos, sino que utiliza una onda sonora que afecta la estructura de la biomasa, rompe la pared cristalina de la celulosa y produce la descomposición de iones H^+ y OH^- ayudando a romper los enlaces intramoleculares entre la lignina y la hemicelulosa.

4.1.4.2 Análisis Ambiental Pretratamientos Líquidos Iónicos. Este método de pretratamiento es amigable con el medio ambiente, generalmente baja toxicidad, no inflamable y se considera un solvente verde, por tanto, desde el punto de vista ambiental calificaría como candidato a ser usado en una biorefinería. Sin embargo, esta en tela de juicio el costo de los reactivos de pretratamientos.

4.1.4.3 Análisis Ambiental Pretratamientos Peróxido de Hidrógeno. Alencar et al, (2017) concluyeron que el peróxido de hidrógeno es una tecnología de reciclaje eficiente, el reactor

de pretratamiento trabaja a condiciones ambiental. sin embargo, el uso de peróxido de hidrógeno a altas concentraciones puede causar corrosión en las facilidades de superficies.

En el método de pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino la oxidación de la lignina puede causar una pérdida fraccionaria de hemicelulosa, es decir se obtiene menor cantidad de azúcar para el proceso de fermentación

4.1.4.4 Análisis Ambiental Pretratamientos Ácido Fosfórico. Esta técnica de pretratamiento tiene la característica de evitar la generación de productos de descomposición que afectan el hidrólisis enzimático como por ejemplo ácido acético y furfural. Sin embargo, que la exposición repetida este ácido puede provocar bronquitis con tos y flema y falta de aire. A largo plazo la exposición a este ácido puede secar la piel y causar agrietamiento a los trabajadores que operan en las facilidades de superficie.

(Broda, Yelle, & Serwańska, 2022, pág. 10). El método de pretratamiento por ácido fosfórico tiene una principal desventaja el alto costo de recuperación de ácido y la producción de subproductos inhibidores. Sin embargo, en cuanto a la evaluación del desempeño ambientales y económicos de esta técnica ha sido perfeccionado últimamente. Por otra parte, se pueden reducir la producción de los subproductos inhibidores si se trabaja con concentraciones de ácido fosfórico entre el 1% y 4 %.

De acuerdo con la literatura obtenida de la ciencia métrica relacionada con el escalamiento a nivel industrial, costos de reactivos, materiales, y equipos que se utilizan para realizar el pretratamiento se llegó a la conclusión que el método de pretratamiento por ultrasonido tiene la desventaja de tener alto consumo de energía.

Bussemaker MJ, Day K, Drage G, Cecelja F. (2017) concluyeron que el 63 % del gasto de energía eléctrica para producir bioetanol es consumido por el pretratamiento ultrasonido.

El pretratamiento por líquido iónico tiene la desventaja de generar altos consumos de agua y reactivos, los reactivos utilizados son costosos y pierden eficiencia de remoción de lignina al realizar la recirculación de la fracción líquida.

El pretratamiento por ácido fosfórico tiene la característica de adaptarse a cualquier tipo de biomasa y obtiene la mayor eficiencia en la etapa de hidrólisis enzimática de todos los ácidos que se utilizan para pretratar. El pretratamiento por peróxido de hidrógeno tiene la ventaja de reducir e incluso prevenir la formación de 5-HMF y furfural durante todo el proceso de pretratamiento, ya que estos dos son inhibidores que generan ineficiencias en el proceso de fermentación o en etapas posteriores al pretratamiento. El peróxido de hidrógeno proporciona amplia viabilidad de llevarlos a escala industrial.

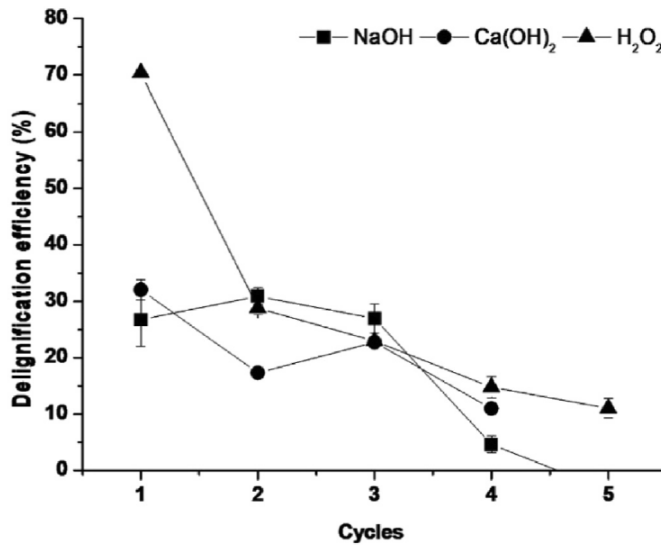
Una de las preguntas que se generaban al realizar este trabajo es: ¿Cuál será el punto de referencia en resultados de laboratorios de los pretratamientos en estudio, ya que en la metodología y análisis de resultados no se muestran pruebas de laboratorio? La solución a esta pregunta llegó al revisar los documentos de investigación obtenidos de las ecuaciones de búsqueda del análisis cuantitativo. Uno de los documentos o proyectos de investigación referente para escoger el pretratamiento por ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno es la publicación realizada por (Leitão et al, 2021).

En esta investigación se compararon siete pretratamientos químicos del bagazo de caña de azúcar: cuatro ácidos (sulfúrico, cítrico, fosfórico y oxálico), dos alcalinos (hidróxidos de sodio y calcio) y uno oxidativo (peróxido de hidrógeno alcalino). Las fracciones líquidas resultantes de estos pretratamientos se reutilizaron hasta cinco veces. La mejor eficiencia en la hidrólisis enzimática siguió el orden H_2O_2 -alcalino > NaOH > ácido oxálico > ácido fosfórico > H_2SO_4 > ácido cítrico > $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Con el reciclaje se ahorró más del 62% en reactivos utilizados en el

pretratamiento del bagazo de caña de azúcar, lo que permitió una economía en los costos en esta etapa del proceso.

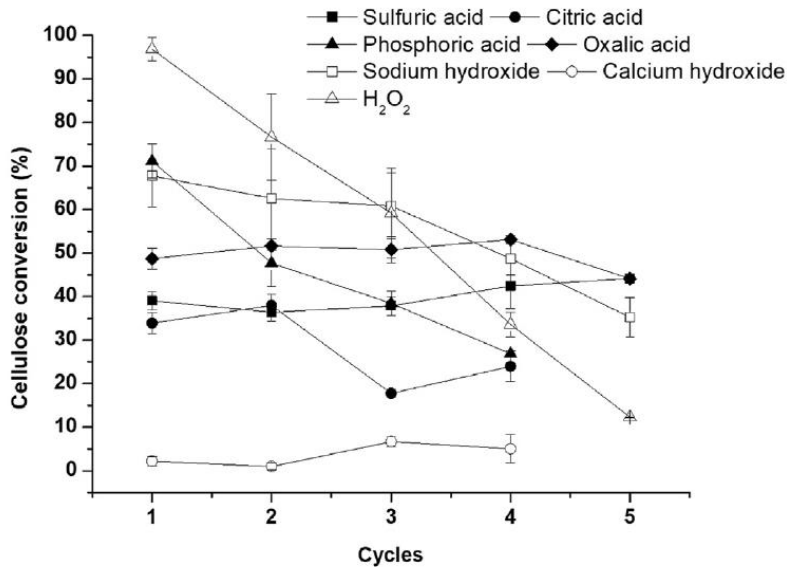
A continuación, se presentan los resultados de laboratorio obtenidos:

Figura 17. Eficiencia de deslignificación

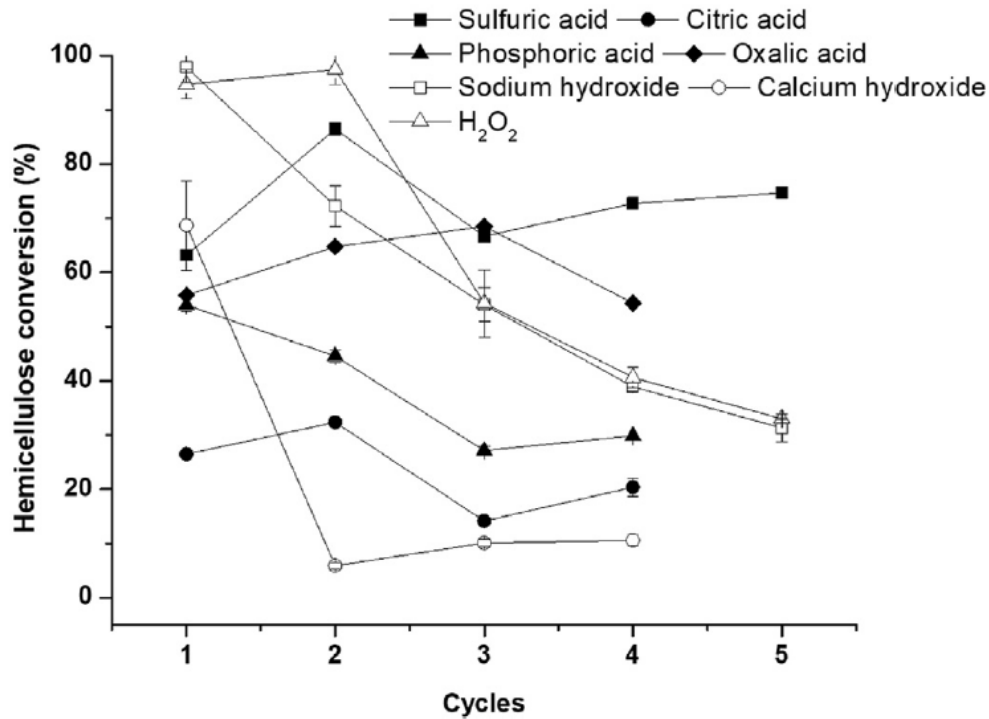


Nota. Adaptado de (Leitão et al, 2021).

Figura 18. Conversión de celulosa



Nota. Adaptado de (Leitão et al, 2021).

Figura 19. *Conversión de Hemicelulosa*

Nota. Adaptado de (Leitão et al, 2021).

Como se puede ver en los resultados obtenidos por las tres graficas anteriores, los dos pretratamientos más eficientes son Peróxido de hidrógeno y Acido fosfórico, los cuales se abordaron como los pretratamientos de mayor potencial para ser llevados a escala industrial.

4.2 Condiciones de Operación, Requerimientos Másicos y Energéticos de Cuatro Tecnologías de Pretratamientos, Seleccionando dos Esquemas con Mayor Rendimiento a Partir de Simulación de Procesos.

La selección de las condiciones de operación del pretratamiento, hidrólisis enzimática, fermentación fueron obtenidos de la literatura como resultado del análisis cuantitativo de la sección 4.1 y a continuación se presenta una tabla con las condiciones de operación planteadas por los siguientes autores.

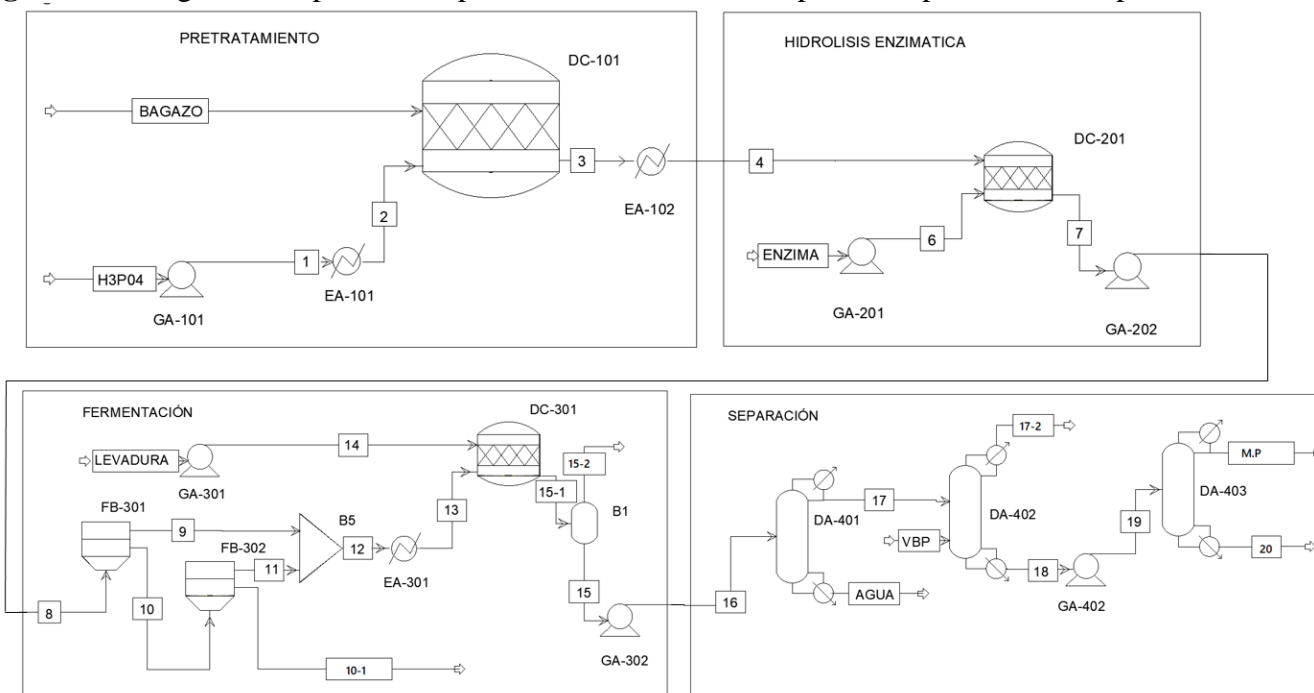
Tabla 4. *Condiciones de operación de los reactores de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar*

Técnica De Pretratamiento	De	Condiciones De Operación Del Reactor De Pretratamiento	Referencias Obtenidas Del Análisis Del Análisis Ciencimetrico
Ácido Fosfórico		Pretratamiento ácido diluido (0.1-0.2% w/v H ₃ PO ₄ ; 150 a 162 °C Las temperaturas de operación variaron de 152 a 166 C manteniendo el tiempo de residencia de 10 min con una concentración de ácido diluido de 0,25–0,7% en peso en el reactor.	(Ja Kyong Ko, 2018) (Manali Kapoor, 2017, pág. 3)
		Desarrollo de un modelo de estimación para la evaluación del requerimiento energético y condiciones de operación de un reactor de pretratamiento con ácidos diluidos proponiendo T=160 °C, P=7 atm y concentración de ácido diluido 1% al 4%	(Oluwakemi , Scott M., & Hancock, 2015).
Peróxido de hidrógeno alcalino		Establece condiciones óptimas de reactor de pretratamiento: T=25 °C y P=1atm), 1% (w/v) H ₂ O ₂ , PH=11,5 Y t=60 min	(Aditi Wagle, 2022, pág. 7)
		Condiciones de presión y temperatura suaves. Concentración peróxido de hidrógeno 1% Propone las condiciones óptimas de operación de un reactor de pretratamiento con peróxido de hidrógeno alcalino. T=60 °C, P=1 atm y concentración de peróxido de hidrógeno (0,2 % - 1,0 % v/v)	(Yang Huang, 2021) (Shahabaldin Rezanía, 2020, pág. 9)

Nota. Elaboración propia

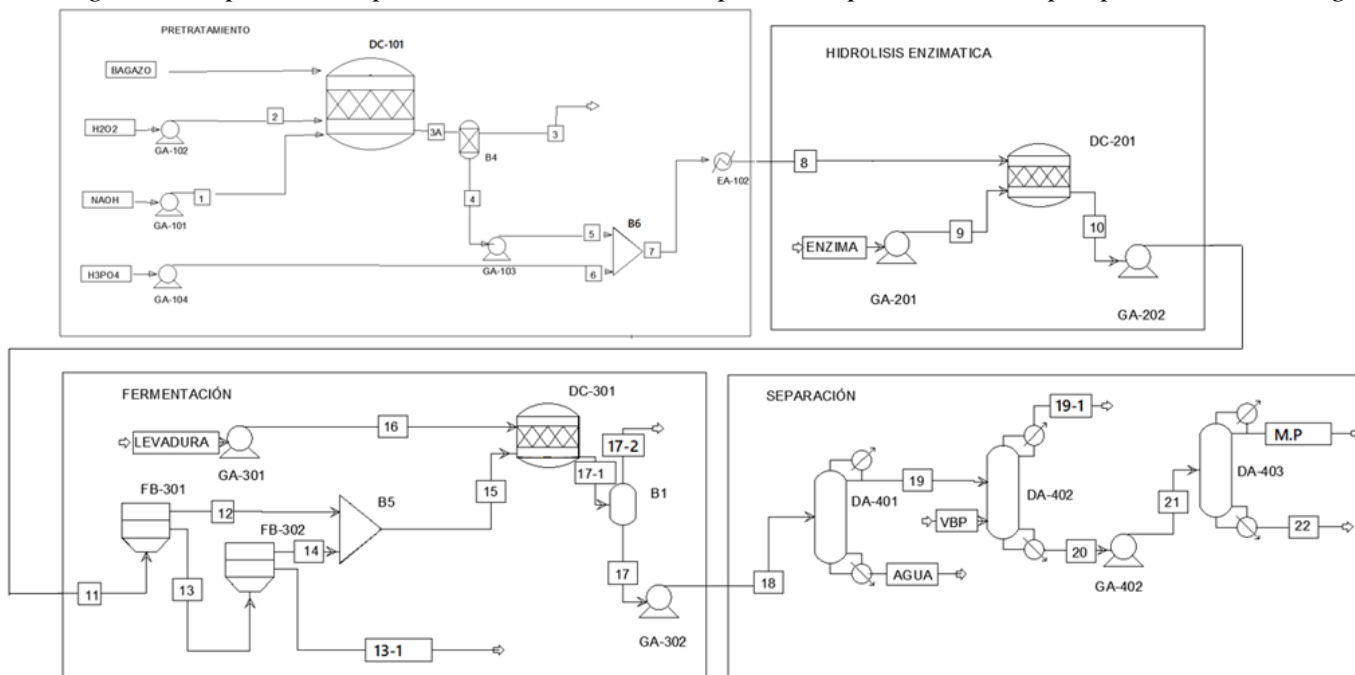
A continuación, se presentan los diagramas de procesos considerado para el pretratamiento de bagazo de caña con ácido fosfórico (ver figura 20) y peróxido de hidrógeno alcalino (ver figura 21). Mientras que en la sección 4.2.3 se describen las consideraciones realizadas para estos dos pretratamientos mencionados anteriormente.

Figura 20. Diagrama del proceso de producción de bioetanol a partir del pretratamiento por Ácido Fosfórico



TAG	DESCRIPCIÓN	CONDICIONES DE OPERACIÓN
DC-101	Reactor de pretratamiento	T=160 °C; P=7 atm ; Q=88045,55 MW
DC-201	Reactor de Hidrólisis	T=40 °C, P=1 atm ; Q=124098,99 MW
DC-301	Reactor de fermentación	T=30 °C, P=1,1 atm ; Q=-6,86363714 MW
GA-101	Bomba de Alimentación H3PO4 diluido	P=8 atm ; T= 25°C ; f=10083,8833 l/hr; W=2,66 HP
GA-201	Bomba de Alimentación Enzima	P=2 atm ; T= 25°C ; f=10070,3569 l/hr; W=0,380 HP
GA-202	Bomba de mezcla hidrolizada	P=4 atm ; T= 25°C ; f=80967,6141 l/hr; W=9,17 HP
GA-301	Bomba de alimentacion de levadura	P=3 atm ; T= 25°C ; f=10000 l/hr; W=0,755 HP
GA-302	Bomba de mezcla fermentada	P=6 atm ; T= 30,17°C ; f=88987,466 l/hr; W=16,46 HP
GA-402	Bomba de bioenol ó mezcla purificada	P=1,4 atm ; T= 63,68°C ; f=19858,47 l/hr; W=1,05 HP
EA-101	Calentador del H3PO4 diluido	P=7,5 atm ; T= 160 °C ; Q=1,65 MW
EA-102	Enfriador de mezcla pretratada	P=6,5 atm ; T= 40 °C ; Q=-10,319 MW
EA-301	Enfriador de mezcla hidrolizada	P=3,5 atm ; T= 30 °C ; Q=-0,680252124
FB-301	Sedimentador de lignina o solidos	Humedad residual=0,7 ; P=4 atm ; T=40 °C
FB-302	Sedimentador de lignina o solidos	Humedad residual=0,4 ; P=4 atm ; T=40 °C
B5	Mezclador B5	P=4 atm ; T= 40 °C
B1	Separador Flash	P=1,1 atm ; T= 30 °C ; Q=-3,12690985e-16 MW
DA-401	Torre concentrada	QC=-14,42 MW ; QR=24,49 MW; NPT=16; R=2
DA-402	Torre atmosferica	QC=0 MW ; QR=0 MW; NPT=6;
DA-403	Torre de Azeotrópica	QC=-10,67 MW ; QR=10,590 MW; NPT=14 ; R=1,6

Figura 21. Diagrama del proceso de producción de bioetanol a partir del pretratamiento por peróxido de hidrógeno diluido



TAG	DESCRIPCIÓN	CONDICIONES DE OPERACIÓN
DC-101	Reactor de pretratamiento	T=25 °C; P=1 atm ; Q=-17,5235157MW
DC-201	Reactor de Hidrólisis	T=50 °C; P=1 atm ; Q=182419,148 MW
DC-301	Reactor de fermentación	T=30 °C; P=1,1 atm ; Q=-10,6249494 MW
GA-101	Bomba de Alimentación NA(OH)	P=2 atm ; T= 25°C ; f=70975,6421 l/hr; W=2,68 HP
GA-102	Bomba de Alimentación H2O2	P=2 atm ; T= 25°C ; f=50420,0217 l/hr; W=1,903 HP
GA-103	Bomba de mezcla pretratada	P=2 atm ; T= 25°C ; f=177849,31 l/hr; W=6,71 HP
GA-104	Bomba de Alimentación H3PO4	P=2 atm ; T= 25°C ; f=17293,127 l/hr; W=0,653 HP
GA-201	Bomba de Alimentación Enzima	P=2 atm ; T= 25°C ; f=10070,3569 l/hr; W=0,380 HP
GA-202	Bomba de mezcla hidrolizada	P=3 atm ; T= 50°C ; f=211630,021 l/hr; W=15,98 HP
GA-301	Bomba de alimentacion de levadura	P=3 atm ; T= 25°C ; f=10000 l/hr; W=0,755 HP
GA-302	Bomba de mezcla fermentada	P=6 atm ; T= 30,16°C ; f=208929,68 l/hr; W=38,64 HP
GA-402	Bomba de bioetanol ó mezcla purificada	P=2 atm ; T= 74,42°C ; f=22123,4569 l/hr; W=0,75 HP
EA-102	Calentador de la mezcla pretratada	P=2 atm ; T= 50 °C ; Q=5,44946197MW
FB-301	Sedimentador de lignina o solidos	Humedad residual=0,7 ; P=4 atm ; T=40 °C
FB-302	Sedimentador de lignina o solidos	Humedad residual=0,4 ; P=4 atm ; T=40 °C
B5	Mezclador de pretratamiento B5	P=3 atm ; T= 50 °C
B6	Mezclador de purificación B6	P=2 atm ; T= 25 °C
B1	Separador Flash de fermentación	P= 1 atm ; T=30 °C ; Q=0 MW
B4	Separador de pretratamiento	Q=-0,126341198MW
DA-401	Torre concentrada	QC=-17,81 MW ; QR=45,41 MW; NPT=18; R=2
DA-402	Torre atmosferica	QC=0 MW ; QR=0 MW; NPT=8;
DA-403	Torre de Azeotrópica	QC=-15,43 MW ; QR=15,33 MW; NPT=26 ; R=3

4.2.1 Composición del Bagazo de Caña

La composición de bagazo de caña usada en la simulación del proceso de obtención de etanol fue determinada experimentalmente por los autores (Zilda Miguel Gomes-da Silva, 2022) a partir de varias muestras tomadas de un ingenio azucarero colombiano de la región del valle del Rio Cauca. El resultado experimental de la composición del bagazo de caña de azúcar es:

Tabla 5. Composición del Bagazo y flujo de entrada

Componente	Concentración (%peso/peso)	Flujo (Kg/h)
Celulosa	23	23000
Hemicelulosa	11	11000
Lignina	13,5	13500
Cenizas	2,5	2500
Humedad	50	50000
TOTAL	100	100.000

Nota. Composición del bagazo de caña. (Omar Alberto Ávila Rojas, 2010) & (Zilda Miguel Gomes-da Silva, 2022)

En la simulación del proceso de obtención de etanol se tomó como base de cálculo 100.000 kg/h de bagazo de caña húmedo, de los cuales 50.000 kg/h son humedad correspondiente al 50%p/p de humedad de salida de ingenios azucareros

4.2.2 Simulación de Pretratamientos

En esta sección se evaluarán la simulación de procesos con ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno.

4.2.2.1 Simulación de Pretratamiento con Ácido Fosfórico (H₃PO₄). En la simulación del pretratamiento con ácido fosfórico del bagazo de caña inicia de la siguiente manera: se inicia con las entradas de 100.000 kg/hr de bagazo de caña (ver composiciones y flujos definidos en la tabla 5), 10.000 kg/hr de agua con una dilución de ácido fosfórico al 1 % de acuerdo con

(Oluwakemi , Scott M., & Hancock, 2015). Se utiliza el intercambiador de calor EA-101 para preparar las condiciones óptimas que requiere el reactor de pretratamiento (160 ° C @ 7atm).

En la corriente 3 se tiene una mezcla de corriente sólidos y líquidos de bagazo de caña, el cual se hace pasar por el intercambiador de calor EA-102 para preparar las condiciones requeridas en el reactor de hidrólisis enzimática. Seguidamente se inyecta 10.000 kg/hr de agua con enzima por medio de la bomba GA-201, cuya finalidad es prepara la corriente de enzima a las condiciones óptimas del reactor de hidrólisis enzimática (40 °C y 1 atm de presión) de acuerdo con (Montiel Rivas , 2017, pág. 38) & (SENDELIUS, 2005). Después de pasar por el reactor de hidrólisis enzimática se obtienen los azúcares fermentables, para ser llevados al reactor de fermentación.

En la etapa de fermentación se bombea la corriente líquida y sólida (generalmente es lignina) que contiene azúcares listos para fermentar a los decantadores FB-301 y FB-302, con la finalidad de remover los sólidos como la lignina y obtener la mayor fracción de líquido para ser llevados al reactor de fermentación. Las corrientes 9 y 11 representan la corriente líquida de azúcares que son mezclados por el Mixer B5 listos para ser llevados al reactor de fermentación. El intercambiador de calor EA-301 se utiliza para preparar las condiciones óptimas requeridas en el reactor DC-301 conforme lo definen (Krishnan & Blanco, 2000) y (Montiel Rivas , 2017). Finalmente se bombea una corriente de levadura y la corriente 14 al reactor DC-301 obteniendo etanol al 65 % en peso. Para obtener etanol comercial es necesario realizar la etapa de purificación, obteniendo bioetanol al 92 % como mínimo y es el que se obtiene en la corriente de etanol.

4.2.2.2 Pretratamiento (H₃PO₄). En el reactor de pretratamiento DC-101 se alimenta 100.000 kg/h de bagazo de caña, con humedad del 50%. Al DC-101 se alimenta 10.000 kg/h de solución al 1% peso de ácido fosfórico mediante la bomba GA-101, previo a entrar al reactor la

solución de ácido fosfórico es calentada hasta la temperatura de reacción de 160°C, en el intercambiador de calor EA-101.

En el reactor de pretratamiento DC-101 ocurre la hidrólisis ácida de los polisacáridos celulosa y hemicelulosa, los cuales son convertidos a glucosa y xilosa respectivamente. También, en menor medida, ocurren reacciones de descomposición de hemicelulosa y xilosa en productos no deseados como ácido acético y furfuraldehído. Las reacciones involucradas y su conversión se muestran en la tabla 6

Es importante aclarar que, de acuerdo a la literatura investigada en la ventana de observación, se llegó a la conclusión que los tratamientos ácidos no deben ser mayor al 4 % en peso ya que podría traer problemas operacionales en las facilidades de superficie como corrosión y formación de productos de descomposición no deseados.

Tabla 6. Reacciones en el reactor de pretratamiento H_3PO_4

Reacciones involucradas en el reactor	Conversión (%)	Referencia
$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_5$ <i>hemicelulosa + agua → xilosa</i>	90	(Oluwakemi , Scott M., & Hancock, 2015)
$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow 2.5C_2H_4O_2$ <i>hemicelulosa + agua → acido acético</i>	9,2	(Oluwakemi , Scott M., & Hancock, 2015)
$C_5H_{10}O_5 \rightarrow C_5H_4O_2 + 3H_2O$ <i>xilosa → furfuraldehido + agua</i>	0,051	(Oluwakemi , Scott M., & Hancock, 2015)
$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6$ <i>celulosa + agua → glucosa</i>	9.9	(Oluwakemi , Scott M., & Hancock, 2015)

4.2.2.3 Hidrólisis Enzimático. El efluente (mezcla pretratada) del reactor de pretratamiento DC-101 es enfriado en el intercambiador de calor EA-102 hasta 40°C para alcanzar la temperatura de reacción requerida en el reactor de hidrólisis enzimática DC-201. La mezcla pretratada se hace reaccionar con un coctel enzimático en el DC-201 a una temperatura de 40°C y presión atmosférica. De enzima se alimentan 10.000 kg/h mediante la bomba GA-201.

En el reactor de hidrólisis enzimática DC-201 ocurre la hidrólisis de los polisacáridos celulosa y hemicelulosa, los cuales son convertidos a glucosa y xilosa respectivamente. Puesto que la reacción es catalizada por enzimas, no ocurren reacciones de descomposición y no se forman productos no deseados como ácido acético y furfuraldehído. Las reacciones involucradas y su conversión se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. *Reacciones involucradas en el reactor de hidrólisis enzimática*

Reacciones involucradas en el reactor	Conversión (%)	Referencia
$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_5$ <i>hemicelulosa + agua → xilosa</i>	72	(Montiel Rivas , 2017, pág. 38) & (SENDELIUS, 2005)
$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6$ <i>celulosa + agua → glucosa</i>	86,3	(Montiel Rivas , 2017, pág. 38) & (SENDELIUS, 2005)

4.2.2.4 Fermentación. La mezcla sólido líquido (mezcla hidrolizada) proveniente de la bomba GA-202 es decantada en el FB-301 para separar gran parte del sólido proveniente de la etapa de hidrólisis enzimática. El sólido con menor contenido de humedad que sale del FB-301 se

decanta nuevamente en el FB-302 de donde se obtiene lignina, celulosa y hemicelulosa con una humedad del 40% (corriente 10-1).

Por otro lado, la fase líquida obtenida en el FB-301 y FB-302 se mezcla y enfría en el EA-301 para alcanzar la temperatura en la que ocurre la fermentación. La fase líquida es alimentada al reactor de fermentación DC-301, en donde al estar en contacto con *Zymomonas mobilis*, la glucosa y xilosa son transformadas a etanol y dióxido de carbono. Se utiliza el separador B1 para obtener materia con gran contenido de dióxido de carbono y algunas trazas de otros componentes como agua, etanol, glucosa, xilos. En la tabla 8 se muestran las reacciones y conversión alcanzada en el reactor de pretratamiento de fermentación.

Tabla 8. Reacciones involucradas en el reactor de fermentación

Reacciones involucradas en el reactor	Conversión (%)	Referencia
$3C_5H_{10}O_5 \rightarrow 5C_2H_6O + 5CO_2$ <i>xilosa</i> \rightarrow <i>etanol</i> + <i>dioxido de carbono</i>	91,5	(Krishnan & Blanco, 2000) y (Montiel Rivas , 2017)
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_6O + 2CO_2$ <i>glucosa</i> \rightarrow <i>etanol</i> + <i>dioxido de carbono</i>	99,8	(Krishnan & Blanco, 2000) y (Montiel Rivas , 2017)

4.2.2.5 Separación ó Purificación. El etanol obtenido (corriente 16) en el proceso de fermentación se encuentra diluido en agua (15% peso), para que pueda ser usado como etanol combustible, este deber ser purificado. El líquido proveniente de la bomba GA-302 se alimenta a la torre de destilación DA-401, la cual opera a una presión de 5 atmósferas, en ella se separa por los fondos agua y por la parte del domo etanol con menor contenido de agua y contaminado con CO₂ disuelto que no logró separarse en el reactor DC-301. (corriente 17)

La corriente de domo de la DA-401 se alimenta al absorbedor DA-402, poniéndolo en contacto con vapor de baja presión (VBP). El vapor permite que el dióxido de carbono que se

encuentra disuelto en la fase líquida se liberé saliendo por la parte superior de la DA-402 (corriente 17-2), mientras que por el fondo del absorbedor sale la mezcla etanol-agua (corriente 18) con una concentración de etanol de 86.7% peso. Esta mezcla es bombeada por la GA-402 a la torre de destilación DA-403, la cual opera a presión atmosférica. En la DA-403 se separa por la parte inferior agua mientras que por la parte superior se obtiene etanol al 92 % peso.

4.2.2.6 Resultados Simulación del Pretratamiento Ácido Fosfórico.

Figura 22. Resultados simulación del pretratamiento ácido fosfórico

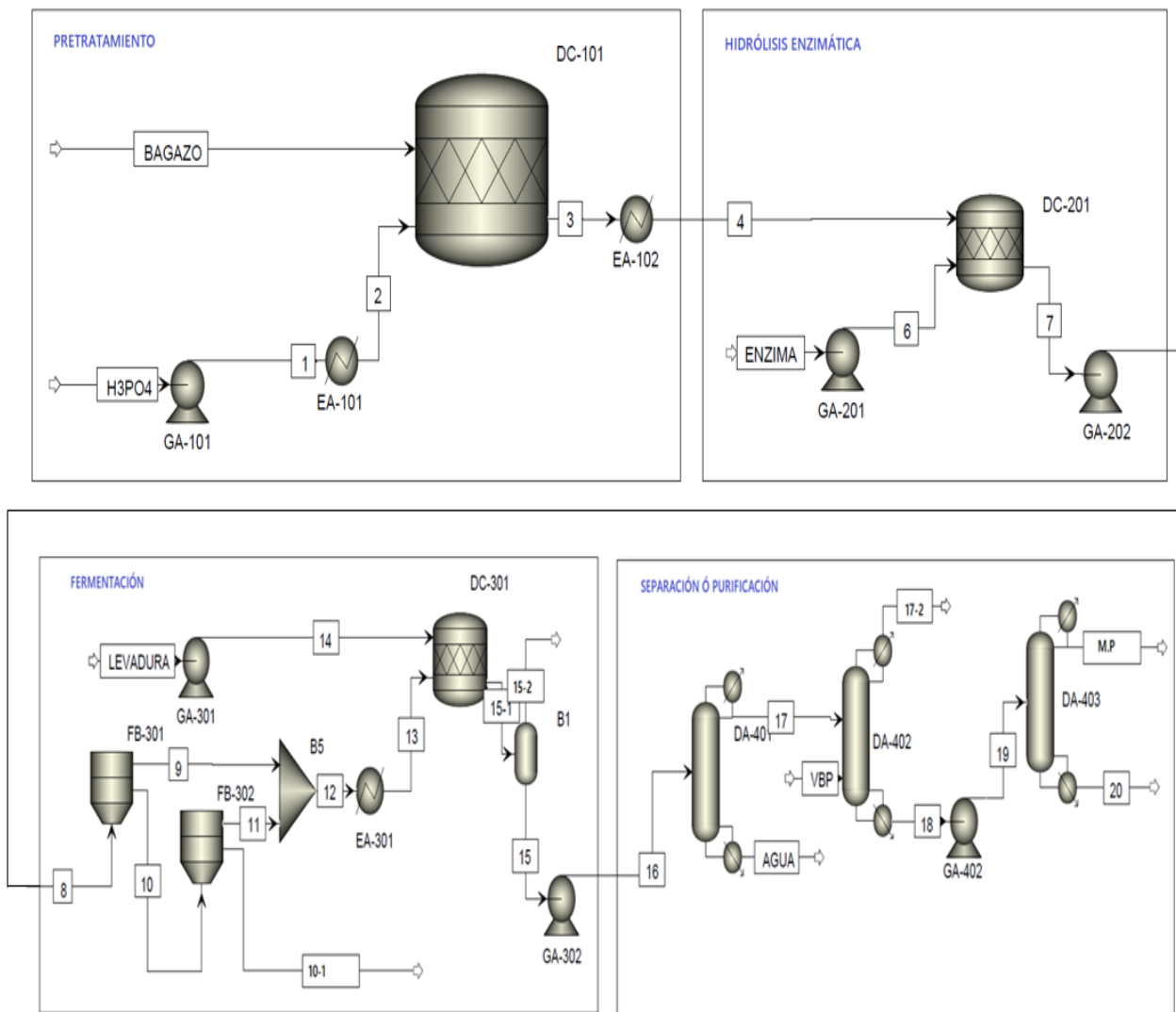


Tabla 9. Notación y definición de corrientes de la simulación de pretratamiento por ácido fosfórico

ETAPA DE PRETRATAMIENTO		HIDROLISIS ENZIMÁTICA	
CORRIENTE	CARACTERÍSTICA	CORRIENTE	CARACTERÍSTICA
BAGAZO	Bagazo de caña	4	Mezcla pretratada a condiciones del reactor de pretratamiento
H3PO4	Acido fosforico diluido	ENZIMA	Corriente de enzima diluida en agua
1	Acido fosforico diluido a presion de la bomba	6	Enzima llevada a condiciones de presion del reactor fermentación
2	Acido fosforico a condiciones del reactor	7	mezcla de hidrolizada
3	Mezcla liquido-solida pretratada		

ETAPA DE FERMENTACIÓN		ETAPA DE PURIFICACIÓN	
CORRIENTE	CARACTERÍSTICA	CORRIENTE	CRACTERÍSTICA
LEVADURA	Levadura diluida en agua	16	Bioetanol al 22 % de pureza
8	Mezcla hidrolizada a condiciones de presión del reactor de fermentación	17	Bioetanol al 83 % de pureza
9	salida de mezcla hidrolizada del sedimentador FB301	AGUA	Salida de agua de la torre DA-401
10	mezcla hidrolizada con alto contenido de solidos	VBP	Vapor de baja presión
11	salida de mezcla hidrolizada sedimentada del FB302	17--2	Salida de gas en mayor proporción CO2
10--1	salida de solidos con lignina en mayor proporción	18	Bioetanol al 87 % de pureza
12	mezcla hidrolizada sedimentada de FB301 yFB302	19	Bioetanol al 87 % de pureza llevado a la presión de la torre DA-403
13	Mezcla hidrolizada a condiciones del reactor de fermentación	M.P	Mezcla purificada (Bioetanol al 93% de pureza)
15--1	Mezcla fermentada	20	salida de agua de la torre DA-403
15--2	mezcla gaseosa en mayor proporción dioxido de carbono		
15	Bioethanol con un 21 % de pureza		

Tabla 10. Resultados Simulación de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar a partir de ácido fosfórico Aspen Plus

CORRIENTE	UNIDADES	BAGAZO	H ₃ PO ₄	1	2	3	4	ENZIMA	6	7	8	9	10	10-1.	11
Temperature	C	25	25	25,2180122	160	160	40	25	25,0586502	40	40,1000431	40,1000431	40,1001545	40,1002195	40,1001545
Pressure	atm	1	1	8	7,5	7	6,5	1	2	1	4	4	4	4	4
Flujo masico	kg/hr	100000	10000	10000	10000	109999,481	109999,481	10000	10000	119998,026	119998,026	57119,0563	62878,97	31439,485	31439,485
Celulosa	kg/hr	23000	0	0	0	20723	20723	0	0	2839,051	2839,051	0	2839,051	2839,051	0
Hemicelulosa	kg/hr	11000	0	0	0	88	88	0	0	24,64	24,64	0	24,64	24,64	0
Lignina	kg/hr	13500	0	0	0	13500	13500	0	0	13500	13500	0	13500	13500	0
Glucosa	kg/hr	0	0	0	0	2529,78723	2529,78723	0	0	22399,1706	22399,1706	12650,6936	9748,477	2785,27914	6963,19785
Xilosa	kg/hr	0	0	0	0	11249,6264	11249,6264	0	0	11321,624	11321,624	6394,27228	4927,35169	1407,81477	3519,53692
Agua	kg/hr	50000	9900	9900	9900	58159,1159	58159,1159	10000	10000	66163,5897	66163,5897	37368,1381	28795,4516	8227,27189	20568,1797
Etanol	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dioxido de carbono	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido acetico	kg/hr	0	0	0	0	1149,95108	1149,95108	0	0	1149,95108	1149,95108	649,473994	500,477089	142,993454	357,483635
Furfural	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido fosforico	kg/hr	0	100	100	100	100	100	0	0	100	100	56,4784019	43,5215981	12,4347423	31,0868558
Oxido de calcio	kg/hr	2500	0	0	0	2500	2500	0	0	2500	2500	0	2500	2500	0

Nota: autor, adaptado de los datos obtenidos en la simulación de procesos en Aspen Plus

Tabla 11. Resultados Simulación de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar a partir de ácido fosfórico Aspen Plus (continuación)

CORRIENTE	UNIDADES	12	13	LEVADURA	14	15	15-1.	15-2.	16	AGUA	VBP	17	17-1.	18	19	M.P	20
Temperature	C	40,1000826	30	25	25,1175494	30	30	30	30,1808189	151,698999	147,537856	59,7029862	49,2593952	73,4130299	73,4930435	68,3767553	101,418503
Pressure	atm	3,99999507	3,5	1	3	1,1	1,1	1,1	6	5,1	4,38744387	5	1	1,1	2,5	1	1,1
Flujo masico	kg/hr	88558,5413	88558,5413	9939,581035	9939,58104	85283,5184	98497,8234	13214,305	85283,5184	68783,5184	500	16500	1649,5707	15350,4293	15350,4293	14550	800,430525
Celulosa	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hemicelulosa	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lignina	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glucosa	kg/hr	19613,8914	19613,8914	0	0	39,2277828	39,2277828	2,4323E-18	39,2277828	39,2277828	0	5,582E-99	3,234E-116	5,582E-99	5,582E-99	0	0
Xilosa	kg/hr	9913,8092	9913,8092	0	0	842,673782	842,673782	8,528E-13	842,673782	842,673782	0	1,5772E-93	1,383E-106	1,5772E-93	1,5772E-93	0	0
Agua	kg/hr	57936,3178	57936,3178	9939,581035	9939,58104	67680,416	67875,8989	195,482904	67680,416	66203,9942	500	1476,42179	34,2461985	1942,17559	1942,17559	1150,11397	792,060825
Etanol	kg/hr	0	0	0	0	14339,2876	14650,1235	310,835871	14339,2876	607,244035	0	13732,0436	396,775423	13335,2682	13335,2682	13326,9009	8,36926152
Dioxido de carbono	kg/hr	0	0	0	0	1291,5342	13995,3766	12703,8424	1291,5342	3,9873E-06	0	1291,5342	1218,54908	72,9851161	72,9851161	72,9851271	6,5098E-17
Acido acetico	kg/hr	1006,95763	1006,95763	0	0	1002,81384	1006,95763	4,14378767	1002,81384	1002,8134	0	0,0004415	2,5445E-06	0,00043896	0,00043896	2,6338E-07	0,0004387
Furfural	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido fosforico	kg/hr	87,5652577	87,5652577	0	0	87,5652577	87,5652577	7,3417E-79	87,5652577	87,5652577	0	6,067E-146	0	6,067E-146	6,067E-146	0	0
Oxido de calcio	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: autor, adaptado de los datos obtenidos en la simulación de procesos en Aspen Plus

Al tratar 100.000 Kg/h de bagazo de caña mediante el proceso ácido fosfórico, se obtiene **13326,9009 Kg/h** de etanol combustible, a una concentración másica de 92%. De acuerdo con el trabajo desarrollado por (Montiel Rivas , 2017) la producción de bioetanol se aproxima a la que ellos obtuvieron con la técnica de pretratamiento a explosión de vapor y organosolvente. Siendo esta tesis un punto de apoyo para el diseño la simulación de procesos a través del software Aspen Plus.

4.2.3 Simulación de Pretratamiento con Peróxido de Hidrógeno e hidróxido de Sodio

El tratamiento básico de bagazo de caña se simuló en el software Aspen Plus V.12.1, el tratamiento consiste en poner en contacto una mezcla de peróxido de hidrógeno e hidróxido de sodio con bagazo de caña, posteriormente hidrolizar el bagazo pretratado con enzima para obtener glucosa y xilosa, los cuales se fermentan para obtener etanol diluido, el cual se purifica hasta grado combustible en la etapa de separación.

4.2.3.1 Pretratamiento Peróxido de Hidrógeno Alcalino. En el tanque de pretratamiento DC-101 se alimenta 100.000 kg/h de bagazo de caña, con humedad del 50%. Al DC-101 se alimenta 50.43 m³/h de solución al 30% volumen de peróxido de hidrógeno mediante la bomba GA-102 y 69,753 kg/h de una solución de hidróxido de sodio al 0.1% peso, mediante la bomba GA-101. En el DC-101 la mezcla de peróxido y NaOH alteran la estructura del bagazo de caña, disolviendo parte de la lignina y hemicelulosa en el medio básico, mientras que en el sólido la celulosa y hemicelulosa quedan más accesibles para ser hidrolizadas en la siguiente etapa.

A las condiciones de presión y temperatura atmosférica, pH 12 y una concentración de 7% de peróxido se disuelve 75,4% de lignina en el medio básico y 38.7% de hemicelulosa, mientras que el peróxido de hidrógeno se descompone por completo en oxígeno y agua. El oxígeno es separado en el DC-101 y la mezcla sólido-líquido es bombeada por la GA-103 al intercambiador

de calor EA-102. En la línea de descarga de la GA-103, previo a entrar al intercambiador EA-102, se adiciona 17.149,2 kg/h de una solución de ácido fosfórico al 1% peso para llevar el pH de la mezcla a 5.

Tabla 12. *Reacciones en el reactor de pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino*

Reacciones químicas o disoluciones en el reactor involucradas en el reactor	Conversión (%)	Referencia
$H_2O_2 \rightarrow 0,5O_2 + H_2O$ <p><i>peroxido de hidrogeno → oxigeno + agua</i></p>	100	(Rabelo, Amezquita Fonseca, Andrade, Maciel Filho, & Costa, 2011, pág. 2) & (Yapeng, Ruoyu, Hong, Ming, & Qinfeng, 2015)
$(C_5H_8O_4)_{solida} \rightarrow (C_5H_8O_4)_{liquida}$ <p><i>hemicelulosa solida → hemicelulosa liquida</i></p>	38,7	(Yapeng, Ruoyu, Hong, Ming, & Qinfeng, 2015) & (Hongdan , Shihang, Weiqi , Jiajie , & Jun , 2019, pág. 3)
$(C_{7,3}H_{13,9}O_{1.3})_{solida} \rightarrow (C_{7,3}H_{13,9}O_{1.3})_{liquida}$ <p><i>lignina solida → lignina liquida</i></p>	75,4	(Yapeng, Ruoyu, Hong, Ming, & Qinfeng, 2015), (Roy, Rahman Sajjadur , & Raynie, 2020, pág. 6), (Hongdan , Shihang, Weiqi , Jiajie , & Jun , 2019, pág. 3) & (Suárez Forero, Candela Soto, Henao Martínez, & Bayona Ayala, 2019)

4.2.3.2 Hidrólisis Enzimático. El bagazo pretratado en el DC-101 es calentado a 50°C en el intercambiador de calor EA-102 hasta 50°C para alcanzar la temperatura de reacción requerida en el reactor de hidrólisis enzimática DC-201. El bagazo pretratado se hace reaccionar con un

coctel enzimático en el DC-201 a una temperatura de 50°C y presión atmosférica. De enzima se alimentan 10.000 kg/h mediante la bomba GA-201.

En el reactor de hidrólisis enzimática DC-201 ocurre la hidrólisis de los polisacáridos celulosa y hemicelulosa, los cuales son convertidos a glucosa y xilosa respectivamente. La hemicelulosa disuelta en la fase líquida tiene una conversión de 9.4 %, mientras que la hemicelulosa que se encuentra en el sólido tiene un porcentaje de conversión de 72 %. La lignina que se encontraba disuelta en el medio básico se precipita por el cambio a medio ácido (pH=5 en el DC-201). Puesto que la reacción es catalizada por enzimas, no ocurren reacciones de descomposición y no se forman productos no deseados como ácido acético y furfuraldehído. Las reacciones involucradas y su conversión se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Reacciones involucradas en el reactor de hidrólisis enzimático del pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino

Reacciones químicas o disoluciones en el reactor involucradas en el reactor	Conversión (%)	Referencia
$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_5$	7	(Montiel Rivas , 2017, p. 38) &
<i>hemicelulosa + agua → xilosa</i>	2	(SENDELIUS, 2005)
$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6$	8	(Montiel Rivas , 2017, p. 38) &
<i>celulosa + agua → glucosa</i>	6,3	(SENDELIUS, 2005)
$(C_{7,3}H_{13,9}O_{1.3})_{sólida}$	-	(Yapeng, Ruoyu, Hong, Ming, &
$\rightarrow (C_{7,3}H_{13,9}O_{1.3})_{sólida}$	-	Qinfeng, 2015), (Roy, Rahman Sajjadur
<i>lignina sólida → lignina sólida</i>		, & Raynie, 2020, p. 6), (Hongdan ,
		Shihang, Weiqi , Jiajie , & Jun , 2019,

pág. 3) & (Suárez, Candela Soto, Henao Martínez, & Bayona Ayala, 2019)

$C_5H_8O_4 + H_2O \rightarrow C_5H_{10}O_5$ <p><i>hemicelulosa liquida + agua</i></p> <p style="text-align: center;"><i>→ xilosa</i></p>	-	<p>(Yapeng, Ruoyu, Hong, Ming, & Qinfeng, 2015), (Roy, Rahman Sajjadur , & Raynie, 2020, p. 6), (Hongdan , Shihang, Weiqi , Jiajie , & Jun , 2019, pág. 3) & (Suárez Forero, Candela Soto, Henao Martínez, & Bayona Ayala, 2019)</p>
--	---	--

El efluente del reactor DC-201 es enviado mediante la bomba GA-202 a la etapa de fermentación.

4.2.3.3 Fermentación. La mezcla sólido líquido proveniente de la bomba GA-202 (corriente 11 ó mezcla hidrolizada) es decantada en el FB-301 para separar gran parte del sólido proveniente de la etapa de hidrólisis enzimática. El sólido con menor contenido de humedad que sale del FB-301 se decanta nuevamente en el FB-302 de donde se obtiene lignina, celulosa y hemicelulosa con una humedad del 40% (corriente 13-1).

Por otro lado, la fase líquida obtenida en el FB-301 y FB-302 se mezcla y enfría para alcanzar la temperatura en la que ocurre la fermentación. La fase líquida es alimentada al reactor de fermentación DC-301, en donde al estar en contacto con *Zymomonas mobilis*, la glucosa y xilosa son transformadas a etanol y dióxido de carbono. En la corriente 17-1 se obtiene una cantidad de materia rica en dióxido de carbono y algunas trazas de etanol, agua, celulosa, hemicelulosa, etc. En la tabla 14 se muestran las reacciones y conversión alcanzada.

Tabla 14. Reacciones involucradas en el reactor de fermentación del pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino

Reacciones involucradas en el reactor	Conversión (%)	Referencia
$3C_5H_{10}O_5 \rightarrow 5C_2H_6O + 5CO_2$ <i>xilosa</i> → etanol + dióxido de carbono	91,5	(Krishnan & Blanco, 2000) y (Montiel Rivas , 2017)
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_6O + 2CO_2$ <i>glucosa</i> → etanol + dióxido de carbono	99,8	(Krishnan & Blanco, 2000) y (Montiel Rivas , 2017)

4.2.3.4 Separación o Purificación. El etanol obtenido en el proceso de fermentación se encuentra diluido en agua (7% peso), para que pueda ser usado como etanol combustible, este deber ser purificado. El líquido proveniente de la bomba GA-302 se alimenta a la torre de destilación DA-401, la cual opera a una presión de 5 atmósferas, en ella se separa por los fondos agua y por la parte del domo etanol con menor contenido de agua y contaminado con CO₂ disuelto que no logró separarse en el reactor DC-301.

La corriente de domo de la DA-401 se alimenta al absorbedor DA-402, poniéndolo en contacto con vapor de baja presión. El vapor permite que el dióxido de carbono que se encuentra disuelto en la fase líquida se liberé saliendo por la parte superior de la DA-402, mientras que por el fondo del absorbedor sale la mezcla etanol-agua con una concentración de etanol de 85.2% peso. Esta mezcla es bombeada por la GA-402 a la torre de destilación DA-403, la cual opera a presión atmosférica. En la DA-403 se separa por la parte inferior agua mientras que por la parte superior se obtiene etanol al 93% peso. La corriente 19-1 contiene alto contenido en dióxido de carbono y algunas trazas de agua, etanol, celulosa, hemicelulosa, entre otros.

4.2.3.5 Resultados Simulación del Pretratamiento Peróxido de Hidrógeno.

Figura 23. Resultados simulación del pretratamiento peróxido de hidrógeno

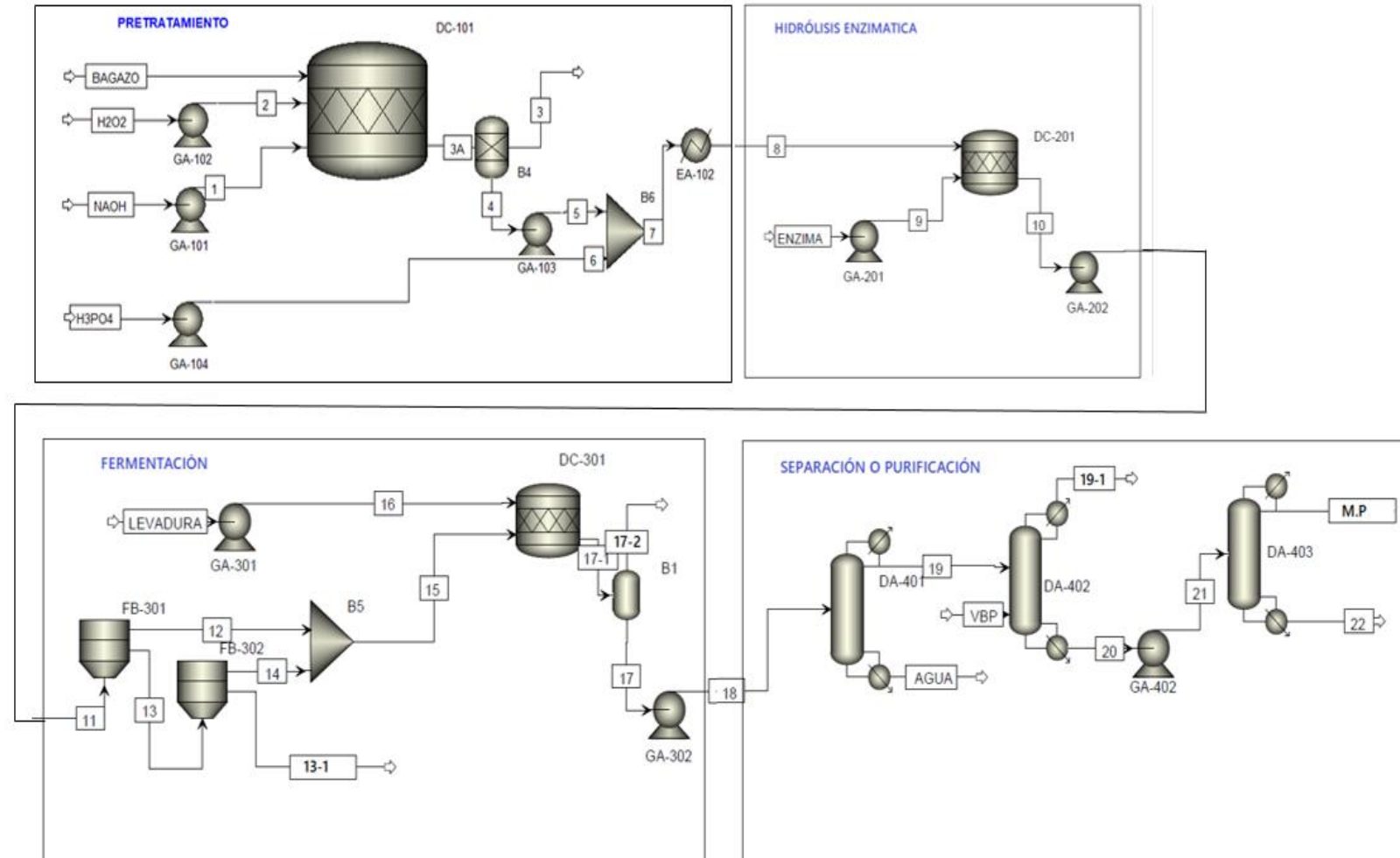


Tabla 15. Notación y definición de corrientes de la simulación de pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino

ETAPA DE PRETRATAMIENTO		HIDROLISIS ENZIMÁTICA	
CORRIENTE	CARACTERÍSTICA	CORRIENTE	CARACTERÍSTICA
BAGAZO	Bagazo de caña	8	Mezcla pretratada a condiciones del reactor de pretratamiento
H3PO4	Acido fosforico diluido para neutralizar al 1%	ENZIMA	Corriente de enzima diluida en agua
H2O2	Peroxido de hidrogeno diluido al 7%	9	Enzima llevada a condiciones de presion del reactor fermentación
Na(OH)	Hidroxido de Sodio diluido	10	mezcla de hidrolizada
1	Hidroxido de Sodio a condiciones de reactor de pretratamiento		
2	peroxido de hidrogeno a condiciones de reactor de pretratamiento		
3A	Mezcla liquido-solida pretratada		
3	Oxigeno liberado al ambiente		
4	Mezcla liquido-solida pretratada libre de oxigeno		
5	Mezcla liquido-solida pretratada libre de oxigeno		
6	Peroxido de hidrogeno para neutralizar @ 2atm y 25 °C		
7	Peroxido de hidrogeno neutralizado		

ETAPA DE FERMENTACIÓN		ETAPA DE PURIFICACIÓN	
CORRIENTE	CARACTERÍSTICA	CORRIENTE	CRACTERÍSTICA
LEVADURA	Levadura diluida en agua	18	Bioetanol al 6 % de pureza
11	Mezcla hidrolizada a condiciones de presión del reactor de fermentación	19	Bioetanol al 73 % de pureza
12	salida de mezcla hidrolizada del sedimentador FB301	AGUA	Salida de agua de la torre DA-401
13	mezcla hidrolizada con alto contenido de solidos	VBP	Vapor de baja presión
14	salida de mezcla hidrolizada sedimentada del FB302	19--1	Salida de gas en mayor proporción CO2
13--1	salida de solidos con lignina en mayor proporción	20	Bioetanol al 78 % de pureza
16	Levadura diluida a condiciones del reactor de fermentación	21	Bioetanol al 78 % de pureza llevado a la presión de la torre DA-403
15	mezcla hidrolizada sedimentada de FB301 yFB302	M.P	Mezcla purificada (Bioetanol al 94% de pureza)
17--1	Mezcla fermentada o bioetanol	22	salida de agua de la torre DA-403
17--2	mezcla gaseosa en mayor proporción dióxido de carbono		
17	Bioetanol con un 6 % de pureza		

Tabla 16. Resultados Simulación de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar a partir de peróxido de hidrógeno alcalino con Aspen

Plus

CORRIENTE	UNIDADES	BAGAZO	H3PO4	H2O2	NAOH	1	2	3 (OXIGENO)	3A	4	5	6	7	ENZIMA	8	9	10	11
Temperature	C	25	25	25	25	25,031	25,04	25	25	25	25,033238	25,0499337	25,0347882	25	50	25,0587	50	50,0631286
Pressure	atm	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	1	3
Flujo masico	kg/hr	100000	17149,2	57060,7559	69753	69753	57061	10267,46642	226813,8	216546,29	216546,29	17149,2	233695,489	10000	233695,49	10000	243693,6	243693,6
Celulosa	kg/hr	23000	0	0	0	0	0	0	23000	23000	23000	0	23000	0	23000	0	1656	1656
Hemicelulosa	kg/hr	11000	0	0	0	0	0	0	11000	11000	11000	0	11000	0	11000	0	5744,882	5744,882
Lignina	kg/hr	13500	0	0	0	0	0	0	13500	13500	13500	0	13500	0	13500	0	13500	13500
Glucosa	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23713,561	23713,561
Xilosa	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5971,5267	5971,5267
Agua	kg/hr	50000	16977,154	35232,138	69682,86	69682,9	35232	0	166476,1	166476,15	166476,15	16977,154	183453,303	10000	183453,3	10000	190365,44	190365,444
Etanol	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dioxido de carbono	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido acetico	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Furfural	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido fosforico	kg/hr	0	172,046	0	0	0	0	0	0	0	0	172,046	172,046	0	172,046	0	172,046	172,046
Hidroxido de Sodio	kg/hr	0	0	0	70,14	70,14	0	0	70,14	70,14	70,14	0	70,14	0	70,14	0	70,14	70,14
Peroxido de Hidrogeno	kg/hr	0	0	21828,6179	0	0	21829	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxigeno	kg/hr	0	0	0	0	0	0	10267,46642	10267,47	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxido de Calcio	kg/hr	2500	0	0	0	0	0	0	2500	2500	2500	0	2500	0	2500	0	2500	2500

Nota: autor, adaptado de los datos obtenidos en la simulación de procesos en Aspen Plus

Tabla 17. Resultados Simulación de pretratamiento de bagazo de caña de azúcar a partir de peróxido de hidrógeno alcalino con Aspen (Continuación)

CORRIENTE	12	13	13-1.	14	15	LEVADURA	16	17	17-1	17-2.	18	AGUA	VBP	19	19-1.	20	21	M.P	22
Temperature	50,063152	50,0631501	50,0631659	50,0631735	50,0631795	25	25,1175494	30	30	30	30,1567009	153,187255	147,537856	45,5481339	40,0053832	81,6635163	81,7259456	78,1728732	102,31041
Pressure	3	3	3	3	3	1	3	1,1	1,1	1,1	6	5,1	4,38744387	5	1	1,1	2	1	1,1
Flujo masico	165690,66	78002,94	39001,47	39001,47	204692,13	9939,581035	9939,58104	203281,69	214631,429	11349,7387	203281,69	184581,69	1050	18700,0384	2559,25589	17190,7825	17190,7825	14259,9999	2930,78265
Celulosa	0	1656	1656	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hemicelulosa	0	5744,882	5744,882	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lignina	0	13500	13500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glucosa	17835,885	5877,67608	1679,33602	4198,34006	22034,2251	0	44,0684502	44,0684502	1,1199E-18	44,0684502	44,0684415	0	5,31E-112	0	0	0	0	0	0
Xilosa	4491,4158	1480,11086	422,888818	1057,22205	5548,63785	0	471,634217	471,634217	1,7892E-13	471,634217	471,634124	0	3,524E-81	0	0	0	0	0	0
Agua	143181,202	47184,2425	13481,2121	33703,0304	176884,232	9939,581035	9939,58104	186648,304	186823,813	175,509394	186648,304	183840,175	1050	2808,10404	45,1609692	3812,94307	3812,94307	891,370925	2921,57213
Etanol	0	0	0	0	0	0	0	13718,5114	13842,7711	124,259759	13718,5114	0,77793587	0	13717,7885	339,950796	13377,8377	13377,8377	13368,6272	9,21051673
Dioxido de carbono	0	0	0	0	0	0	0	2174,13712	13224,1067	11049,9696	2174,13712	2,0283E-12	0	2174,14585	2174,14412	0,00172497	0,00172497	0,00172497	1,287E-19
Acido acetico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Furfural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido fosforico	129,40244	42,6435597	12,1838742	30,4596855	159,862126	0	159,862126	159,862126	4,8716E-79	159,862126	159,862094	0	5,11E-249	0	0	0	0	0	0
Hidroxido de Sodio	52,7550025	17,3849975	4,96714213	12,4178553	65,1728579	0	65,1728579	65,1728579	8,5636E-18	65,1728579	65,172845	0	9,84E-127	0	0	0	0	0	0
Peroxido de Hidrogeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxigeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oxido de Calcio	0	2500	2500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: autor, adaptado de los datos obtenidos en la simulación de procesos en Aspen Plus

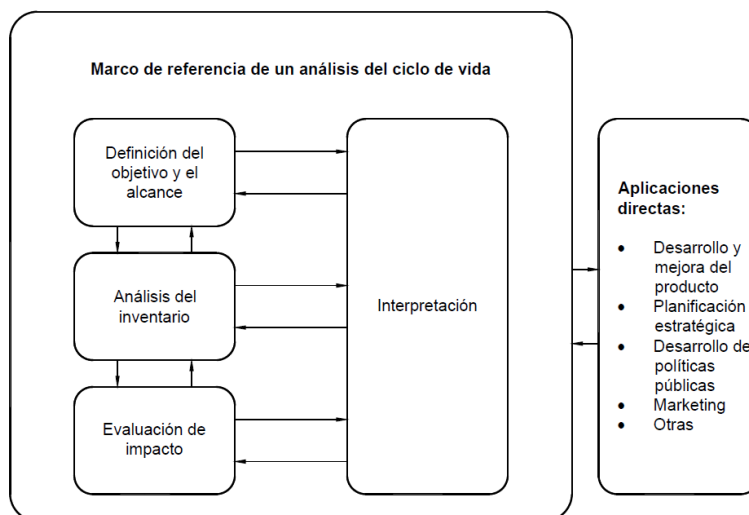
Al tratar 100.000 Kg/h de bagazo de caña mediante el pretratamiento con peróxido de hidrógeno alcalino, se obtiene **13368,6722 Kg/h** de etanol combustible, a una concentración másica de 93%. por tanto, desde el punto de vista de productividad de etanol es más eficiente trabajar con peróxido de hidrógeno diluido.

Por otra parte se puede concluir que la simulación en Aspen plus obtenida en este trabajo se aproxima al trabajo de maestría desarrollado por (Montiel Rivas , 2017) pero en esta ocasión el pretratamiento por peróxido de hidrógeno está cerca de la producción máxima en los dos métodos de pretratamiento evaluados por este autor.

4.3 Evaluar Impactos Ambientales de los Dos Tipos de Pretratamientos con Mayor Potencial Mediante la Metodología Análisis Ciclo de Vida.

La norma ISO 14041 y 14042 es una metodología para realizar análisis de ciclo de vida que consta de las siguientes fases: Objetivos y alcance de estudio, inventario de ciclo de vida y análisis de impacto. Mientras que la ISO 14043 representa una guía para la interpretación de los resultados. En la siguiente figura se muestran las fases del análisis de ciclo de vida.

Figura 24. Fases de un análisis de ciclo de vida según norma ISO 14040



Nota. Tomado de (INCONTEC, 2007)

4.3.1 Fase I: Definición de Objetivos y Alcance de Estudio

Se realizará un análisis de ciclo de vida de la “puerta a la puerta” de la producción de bioetanol a partir del bagazo de caña de azúcar con la finalidad de evaluar los impactos ambientales generados en función de la unidad funcional (1 litro de bioetanol). Este estudio va dirigido especialmente a la comunidad científica y a la industria azucarera, con la finalidad de diagnosticar el uso de esta materia prima como fuente de bioetanol.

Los objetivos de este análisis de ciclo de vida de la “puerta a la puerta” se puede definir de la siguiente manera:

- Evaluar los impactos ambientales potenciales generados en la obtención de bioetanol a partir del bagazo de caña húmedo, desde el momento que se entrega 100.000 kg/hr de bagazo de caña hasta la obtención del bioetanol.
- Realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de los impactos ambientales

Una vez identificados los impactos ambientales definir un plan de acción para reducir dichos impactos a lo largo del ciclo de vida de la cuna a la puerta.

De acuerdo con (Herrera, de la Rúa, & Lechón, 2015, p. 11) el alcance del estudio está definido por la función del sistema, la unidad funcional y los límites establecidos.

La función del sistema consiste de, a partir del bagazo de caña de azúcar y las etapas de pretratamiento, hidrólisis enzimático, fermentación alcohólica y purificación del bioetanol, obtener bioetanol (92 % p/p) y ser usado como combustible o aditivo para la gasolina.

Teniendo en cuenta los procesos estudiados, se definió como **unidad funcional** la producción de 1 litro de etanol a partir del bagazo de caña húmeda de un ingenio azucarero de la región del valle del cauca.

Los dos sistemas estudiados se presentan en las siguientes figuras con sus etapas: Pretratamiento, hidrólisis enzimática, fermentación alcohólica y purificación o separación.

Figura 25. Diagrama de procesos de pretratamiento por Ácido Fosfórico

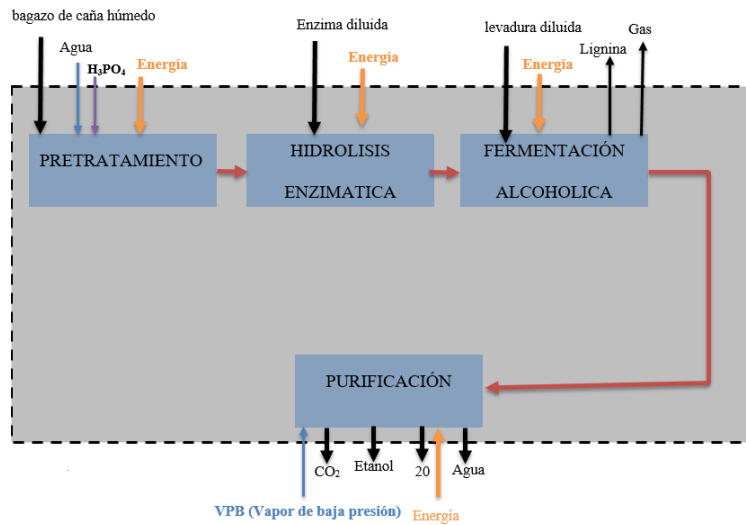
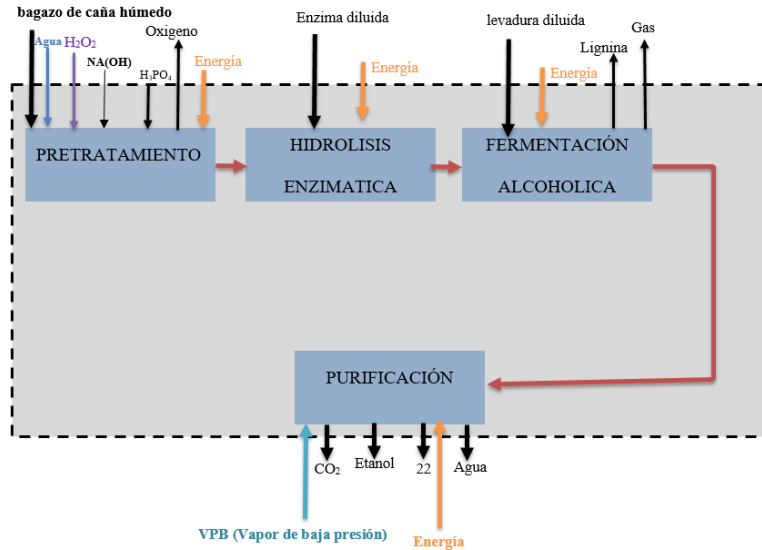


Figura 26. Diagrama de procesos de pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino



El Análisis de ciclo de vida realizado está limitado a la transformación de bagazo de caña de azúcar en bioetanol únicamente, residuo lignina y algunas emisiones de gases que pueden ser tratados como productos evitados. Por tanto, solo se tiene en cuenta que el bagazo es entregado para ser procesado y no incluiría transporte, cultivo y trituración de la caña de azúcar.

4.4 Fase II: Análisis de Inventario y Aplicación NTC ISO 14064:2006

La información obtenida de cada etapa del proceso de producción está fundamentada en la literatura obtenida del análisis cuantitativo que se realizó por la herramienta de búsqueda Scopus, Science Direct y la minería de datos con el software Vantage point. Igualmente, algunos datos de equipos y corrientes de entrada y salida se obtuvieron de la simulación de procesos en el software Aspen Plus 12.1.

4.4.1 Análisis de Inventario del Pretratamiento de Bagazo de Caña de Azúcar con Ácido Fosfórico y Peróxido de Hidrógeno Alcalino.

Se ha utilizado como unidad funcional la producción de un litro de bioetanol y se han obtenido los flujos másicos y consumos energéticos en cada etapa del proceso.

El agua cruda del río Cali fue usada para la etapa de pretratamiento y el agua potable del municipio de Yumbo-Valle del Cauca para la etapa de hidrólisis enzimática y fermentación alcohólica. El bagazo de caña de azúcar se caracterizó en el software SIMAPRO 9.3.0.3 agregando los componentes lignina, hemicelulosa, celulosa y cenizas con su respectivo número CAS y colocando los porcentajes de fracción másica. De la misma manera se realizaron las caracterizaciones para la mezcla pretratada, hidrolizada, fermentada y purificada conforme a los requerimientos energéticos en los equipos, emisiones o productos evitados y consumos de agua.

En las tablas 18 y 19 se muestra el inventario de los dos pretratamientos en estudio. Para cada etapa del proceso se creó una hoja en SIMAPRO con las corrientes de entrada, salida, requerimientos de energía eléctrica, calórica y productos evitados en las etapas de (1) Pretratamiento, (2) hidrólisis, (3) fermentación y (4) Purificación. Los nombres en las hojas creadas o caracterizadas en SIMAPRO son las siguientes:

- ✓ **Etapa de pretratamiento**, pretratamiento H_3PO_4 y Pretratamiento H_2O_2

- ✓ **Etapa de hidrólisis**, hidrólisis H_3PO_4 e hidrólisis H_2O_2
- ✓ **Etapa de fermentación**, fermentación H_3PO_4 y fermentación H_2O_2
- ✓ **Etapa de purificación**, Bioetanol H_3PO_4 y Bioetanol H_2O_2

En el pretratamiento por ácido fosfórico se definió las corrientes de salidas como productos evitados en las etapas de fermentación y purificación. Mientras que en el pretratamiento por peróxido de hidrógeno los productos evitados se evaluaron para las etapas de pretratamiento, fermentación y purificación. En el apéndice A se muestra las hojas de procesos o caracterización de cada etapa de los procesos, bagazo de caña, agua potable, agua de río, emisiones al agua y al aire como productos evitados.

Las pérdidas de energía en forma de calor que los dispositivos de ingeniería utilizados (reactores, intercambiadores de calor y separadores) emiten al medio, fueron consideradas como emisiones por pérdida energía en forma de calor.

Las emisiones al suelo como lo son las corrientes 10-1 y 13-1 de los pretratamientos por ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno respectivamente que contiene lignina en mayor proporción, suelen usarse como combustible, es decir es un desecho que se quema y generan vapor para uso en las plantas de proceso.

(Julian & Ariel) proponen que las emisiones al aire de dióxido de carbono obtenidas en las corrientes 15-2, 17-2 y 17-2, 19-1 tratadas como productos evitados pueden ser comprimidas o utilizadas para la carbonatación de bebidas.

Las emisiones al agua o agua producida en la etapa de purificación podrían tratarse y ser reutilizarse en el mismo proceso (etapa de pretratamiento) o como agua para servicio en baños y estaciones de servicio.

Tabla 18. Inventario del pretratamiento de bagazo de caña con ácido fosfórico

INVENTARIO DEL PRETRATAMIENTO DE BAGAZO DE CAÑA CON ACIDO FOSFORICO- 17134,1 L/h Bioetanol												
ETAPA DEL PROCESO	Entradas		Salidas		Emisiones al aire		Vertimiento al suelo ó Agua		Emisiones por perdida de energia en forma de calor		Energia electrica en los equipos	
	CORRIENTE	[Kg/L Bioetanol]	CORRIENTE	[Kg/L Bioetanol]	CORRIENTE	[Kg/L Bioetanol]	CORRIENTE	[Kg/L Bioetanol]	EQUIPO	[KJ/L Bioetanol]	EQUIPO	[KJ/L Bioetanol]
PRETRATAMIENTO	Bagazo de caña	5,836	Mezcla pretratada	6,420	N/A	N/A	N/A	N/A	Intercambiador EA-102	-2.168,18	Intercambiador EA-101	0,000
	Agua	0,578			N/A	N/A	N/A	N/A	Total	-2.168,18	Reactor DC-101	0,000
	Acido fosforico	0,006			N/A	N/A	N/A	N/A	-----	-----	Intercambiador EA-102	0,000
					N/A	N/A	N/A	N/A	-----	-----	Bomba GA-101	0,5218
					N/A	N/A	N/A	N/A	-----	-----	-----	-----
					N/A	N/A	N/A	N/A	-----	-----	-----	-----
HIDROLISIS ENZIMÁTICA	Mezcla pretratada	6,420	Mezcla hidrolizada	7,003	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Bomba GA-201	0,1411
	Enzima-agua	0,584			N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Reactor DC-201	0,0000
					N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Bomba GA-202	2,1095
					N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	total	2,2506
					N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		
					N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		
7,003				N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A		
FERMENTACIÓN ALCOHOLICA	Mezcla hidrolizada	7,003	Mezcla fermentada	4,977	GAS 15-2	0,771	Corriente 10-1	1,835	Intercambiador EA-301	-142,9259797	Decantador FB-301	0
	Agua-Levadura	0,580							Reactor DC-301	-1442,100698	Decantador FB-302	0
									Separador Flash B1	-6,56987E-14	Mezclador B5	0
									Total	-1585,026677	Intercambiador EA-301	0
											Bomba GA-301	0,28094
											Reactor DC-301	0
											Separador Flash B1	0
											Bomba GA-302	3,73588
											Total	4,01682
PURIFICACIÓN	Mezcla fermentada	4,977	Bioetanol	0,849183924	GAS 17-1	0,096274153	ja salida purificac	4,01442324	Torre DA-403	-15,74213	Torre DA-401	0
	VPB	0,0291816					Corriente 20	0,04671565	total	-15,74213	Torre DA-402	0
		74,634804									Torre DA-403	0
											Bomba GA-402	0,234871597
											total	0,23487

Nota. Obtenido de la simulación de procesos en Aspen Plus 12.1

Tabla 19. Inventario del pretratamiento de bagazo de caña con peróxido de hidrógeno alcalino

INVENTARIO DEL PRETRATAMIENTO DE BAGAZO DE CAÑA CON ACIDO FOSFORICO- 17134,1 L/h Bioetanol												
ETAPA DEL PROCESO	Entradas		Salidas		Emisiones al aire		Vertimiento al suelo ó Agua		Emisiones por perdida de energia en forma de calor		Energia electrica en los equipos	
	CORRIENTE	[Kg/L Bioetanol]	CORRIENTE	[Kg/L Bioetanol]	CORRIENTE	[Kg/L Bioetanol]	CORRIENTE	[Kg/L Bioetanol]	EQUIPO	[KJ/L Bioetanol]	EQUIPO	[KJ/L Bioetanol]
PRETRATAMIENTO	Bagazo de caña	5,806	Mezcla pretratada	13,569	Oxigeno	0,596	-----	-----	Bomba GA-101	0,00	Intercambiador de Calor	0,000
	Agua rio cali	7,077			-----	-----	-----	-----	Separador Flash B4	-26,41	mixer B6	0,000
	Peroxido de hidrogeno	1,267			-----	-----	-----	-----	Reactor pretratamiento	-3.662,82	Reactor DC-101	0,000
	Na(OH)	0,004			-----	-----	-----	-----	Total	-3.689,23	Separador Flash B4	0,000
	Acido Fosforico	0,010			-----	-----	-----	-----	-----	-----	Bomba GA-101	0,5219
		-----			-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Bomba GA-102
											Bomba GA-103	1,3921
											Bomba GA-104	0,2038
											Total	2,5877
HIDROLISIS ENZIMÁTICA	Mezcla pretratada	13,569	Mezcla hidrolizada	14,149	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Bomba GA-201	0,1404
	Enzima-agua	0,581			-----	-----	-----	-----	-----	-----	Reactor DC-201	0,0000
					-----	-----	-----	-----	-----	-----	Bomba GA-202	3,2541
					-----	-----	-----	-----	-----	-----	total	3,3945
					-----	-----	-----	-----	-----	-----		
14,149												
FERMENTACIÓN ALCOHOLICA	Mezcla hidrolizada	14,149	Mezcla fermentada	11,803	Gas 17-2	0,66	Corriente 13-1	2,26	Reactor DC-300	-2220,862273	Decantador FB-301	0
	Agua-Levadura	0,577							Total	-2220,862273	Decantador FB-302	0
											Mezclador B5	0
											Intercambiador EA-301	0
											Bomba GA-301	0,27949
											Reactor DC-301	0
											Separador Flash B1	0
											Bomba GA-302	7,88089
										total	8,16038	
											Total	8,16038
PURIFICACIÓN	Mezcla fermentada	11,803	Mezcla Purificada	0,827964617	Gas 19-1	0,148595606	AGUA	10,7171886	Torre DA-403	-21,96108	Torre DA-401	0
	VPB	0,061					CORRIENTE 22	0,17016721	total	-21,96108	Torre DA-402	0
		155,92443									Torre DA-403	0
											Bomba GA-402	0,220170002
											total	0,22017

Nota. Obtenido de la simulación de procesos en Aspen Plus 12.1

Tabla 20. Caracterización Físicoquímica y microbiológica del río Cali

CARACTERIZACIÓN DE RÍO CALI (VALLE DEL CAUCA)			
PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ANÁLISIS	VALOR PROMEDIO
Temperatura	°C	SM 2550 B	19,4
PH	Uni PH	SM 4500 H+ B	7,62
Conductividad	ms/cm	SM 2510 B	101,6
Color Aparente	UPC	SM 2120 B	132,5
Turbidez	NTU	SM 2130 B	87,2
Cloro Residual	---	---	---
Alcalinidad Total	Mg/L CaCO ₃	SM 2320 B	39,2
Dureza total	Mg/L CaCO ₄	SM 2340 C	44,5
Magnesio	Mg/L Mg	SM 3500 Mg B	3,7
Cloruros	Mg/L CL-	SM 4500-CI D	2
Calcio	Mg/L Ca	SM 3500 Ca B	11,7
Sulfatos	Mg/L SO ₄	SM 4500 SO ₄ -2 E	11,17
Nitritos	Mg/L NO ₂ -	SM 4500 NO ₂ B	0,019

Nota. Tomado de indicador calidad del agua, acueducto Cali-Valle del Cauca

Tabla 21. Caracterización Físicoquímica y microbiológica de agua Potable

CARACTERIZACION DE AGUA POTABLE (MUNICIPIO YUMBO-VALLE DEL CAUCA)			
PARAMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ANÁLISIS	VALOR PROMEDIO
Temperatura	°C	SM 2550 B	26,06
PH	Uni PH	SM 4500 H+ B	7,29
Conductividad	ms/cm	SM 2510 B	134,65
Color Aparente	UPC	SM 2120 B	0,975
Turbidez	NTU	SM 2130 B	0,3745
Cloro Residual	---	---	---
Alcalinidad Total	Mg/L CaCO ₃	SM 2320 B	22,58
Dureza total	Mg/L CaCO ₄	SM 2340 C	47,43
Magnesio	Mg/L Mg	SM 3500 Mg B	3,61
Cloruros	Mg/L CL-	SM 4500-CI D	17,86
Calcio	Mg/L Ca	SM 3500 Ca B	13,075
Sulfatos	Mg/L SO ₄	SM 4500 SO ₄ -2 E	16,495
Nitritos	Mg/L NO ₂ -	SM 4500 NO ₂ B	<0,002

Nota. Tomado de indicador calidad del agua, acueducto Cali-Valle del Cauca

4.4.2 Fase III y IV Evaluación e Interpretación del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

Los métodos de evaluación de impacto ambiental escogidos fueron los siguientes: (1) IMPAC 2002 se utilizó para evaluar las categorías de impacto ambiental y la construcción de los perfiles medio ambientales, (2) Cumulative Energy Demand V1.11 utilizado para evaluar la demanda energética y (3) IPCC 2021 GWP20 V1.00 para la evaluación de la huella de carbono.

El análisis de ciclo de vida es un acumulativo de cada proceso anterior, es decir la mezcla hidrolizada lleva acumula los impactos de la mezcla pretratada, la mezcla fermentada acumula los impactos obtenidos de la etapa de hidrólisis enzimática y por último la mezcla purificada acumula los impactos obtenidos de la mezcla fermentada.

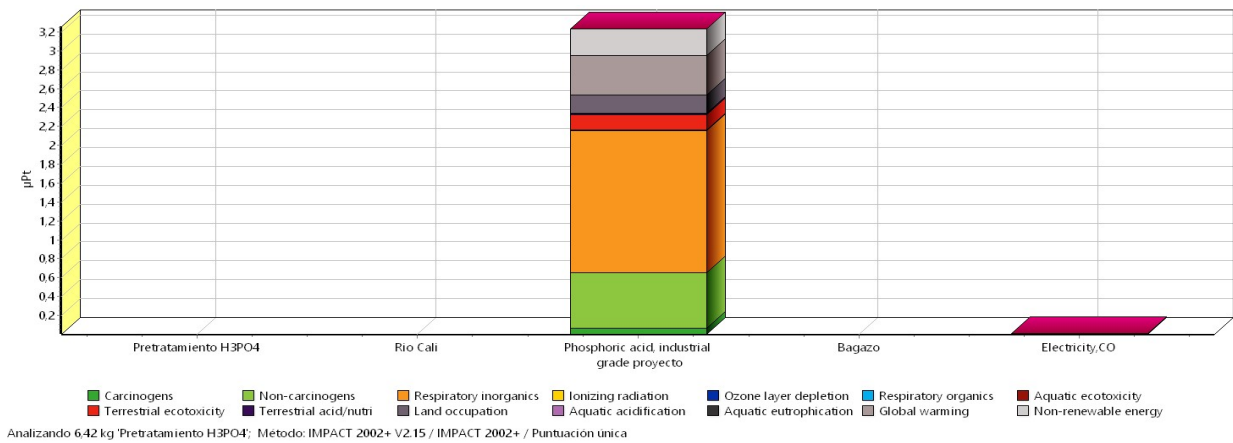
4.4.2.1 Perfiles Medioambientales. Con el método IMPAC 2002 se evaluaron las 14 categorías de impacto ambiental del método: calentamiento global, orgánicos respiratorios, ecotoxicidad acuática, agotamiento de la capa de ozono, radiación ionizante, extracción de mineral, ácidos/nutrientes terrestres, cancerígenos, ocupación de la tierra, ecotoxicidad terrestre, no cancerígeno, energía no renovable e inorgánicos respiratorios.

Para la evaluación de estas categorías de impacto ambiental se evaluaron las categorías de impacto mencionadas anteriormente para los dos pretratamientos tomando los datos del inventario para cada etapa del proceso.

Etapa de pretratamiento con ácido fosfórico (figura 27). Esta etapa tiene la característica que el ácido fosfórico utilizado tiene el mayor impacto negativo sobre el medio en todas las categorías evaluadas debido a las consecuencias que trae este ácido sobre la salud humana, facilidades de superficie y el medio. las categorías de impactos con mayor afectación son: de orgánicos respiratorios, eutrofización acuática, calentamiento global, radiación ionizante las más representativas.

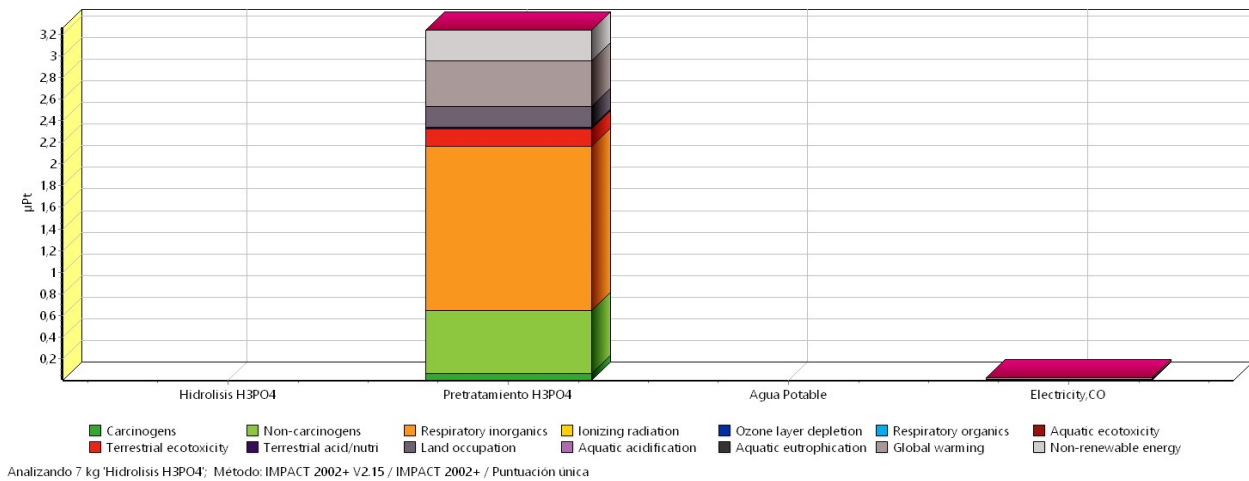
Etapa de hidrólisis con ácido fosfórico (figura 28). En esta etapa el impacto negativo de la mezcla pretratada (pretratamiento H₃PO₄) tiene aproximadamente el mismo aporte como lo adquirió el ácido fosfórico en la etapa de pretratamiento, esto se debe a que el impacto es un legado de la etapa anterior.

Figura 27. Evaluación de impacto por puntuación única de 6,420 kg de mezcla pretratada del pretratamiento por ácido fosfórico



Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

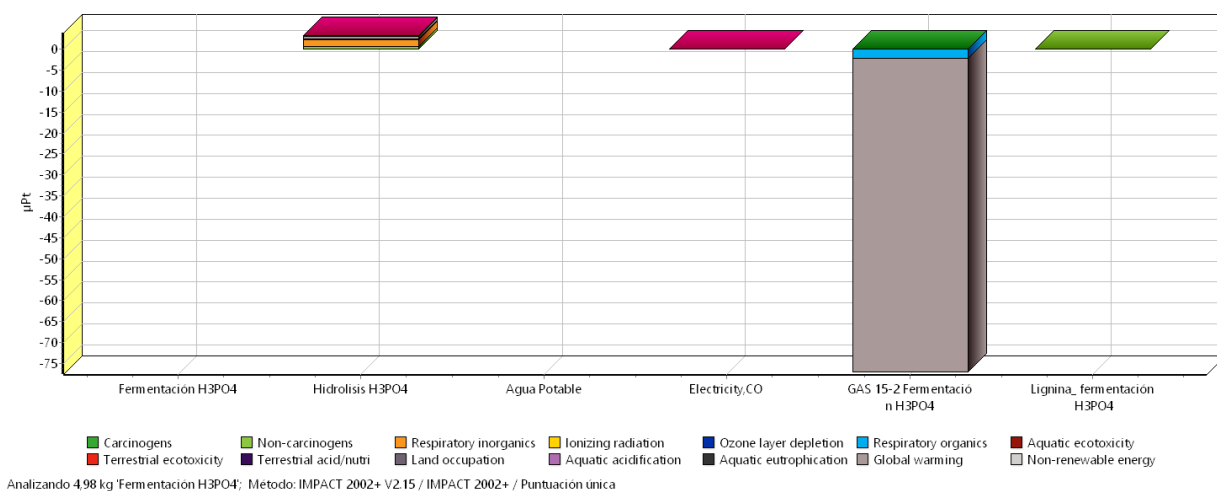
Figura 28. Evaluación de impacto por puntuación única de 7,003 kg de mezcla hidrolizada del pretratamiento por ácido fosfórico



Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Etapa de fermentación con ácido fosfórico (figura 29). En esta etapa se puede notar que hay un impacto negativo despreciable en la corriente de mezcla hidrolizada (hidrólisis H₃PO₄). las corrientes GAS 15-2 de fermentación H₃PO₄ y lignina fermentación H₃PO₄ generaron impactos positivos al medio ya que se definieron como productos evitados en las hojas de procesos de SIMAPRO de la etapa de fermentación. En caso de no tomar como producto evitado las dos corrientes anteriores se obtendría un impacto negativo al medio ambiente.

Figura 29. Evaluación de impacto por puntuación única de 4,977 kg de mezcla fermentada del pretratamiento por ácido fosfórico

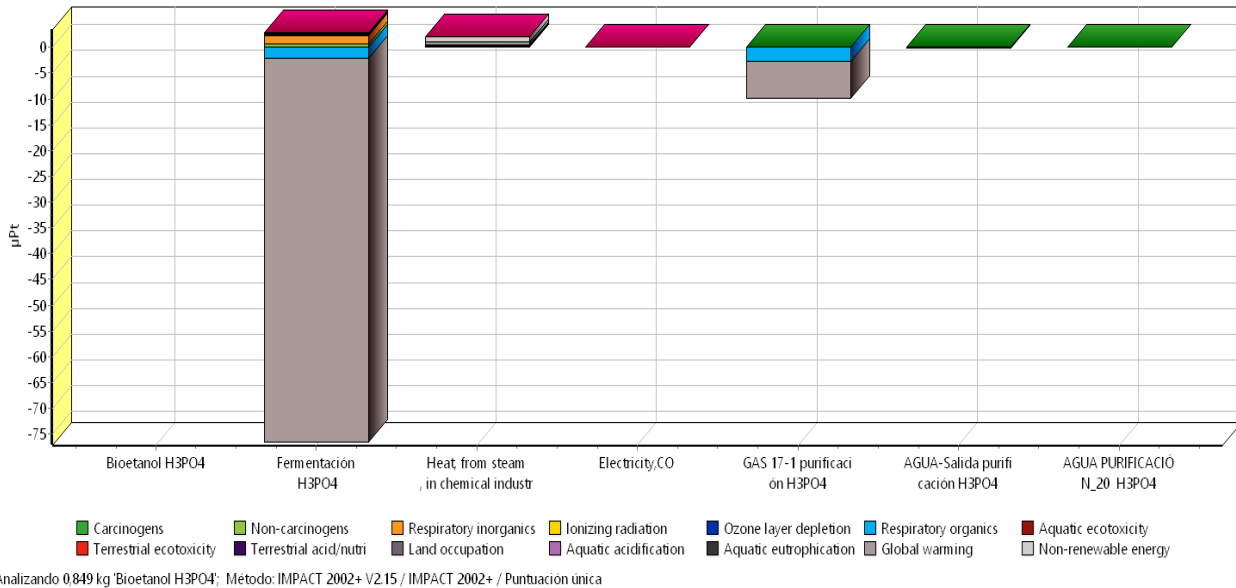


Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3 9.3.0.3

Etapa de purificación con ácido fosfórico (figura 30). En esta etapa final, el vapor de baja presión genera impactos negativos en la categoría de eutrofización acuática y calentamiento global. La mezcla fermentada tiene impactos positivos marcados en ecotoxicidad acuática con algunas trazas en acidificación acuática y eutrofización acuática e impactos positivos en la categoría de calentamiento global. Por parte la corriente GAS 17-1 purificación H₃PO₄, AGUA-salida de purificación H₃PO₄ y AGUA PURIFICACIÓN_20 H₃PO₄ al ser tratados como productos evitados generan impactos positivos y es notorio el impacto positivo generado por la

corriente GAS 17-1 purificación H3PO4 en la categoría de orgánicos respiratorio y calentamiento global.

Figura 30. Evaluación de impacto por puntuación única de 0,84918392 kg de mezcla purificada ó Bioetanol del pretratamiento por ácido fosfórico.



Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Etapa de pretratamiento peróxido de hidrógeno (figura 31). El mayor impacto ambiental negativo en esta etapa está directamente relacionado con el uso del peróxido de hidrógeno, seguidamente un impacto despreciable del ácido fosfórico e hidróxido de sodio neutralizante.

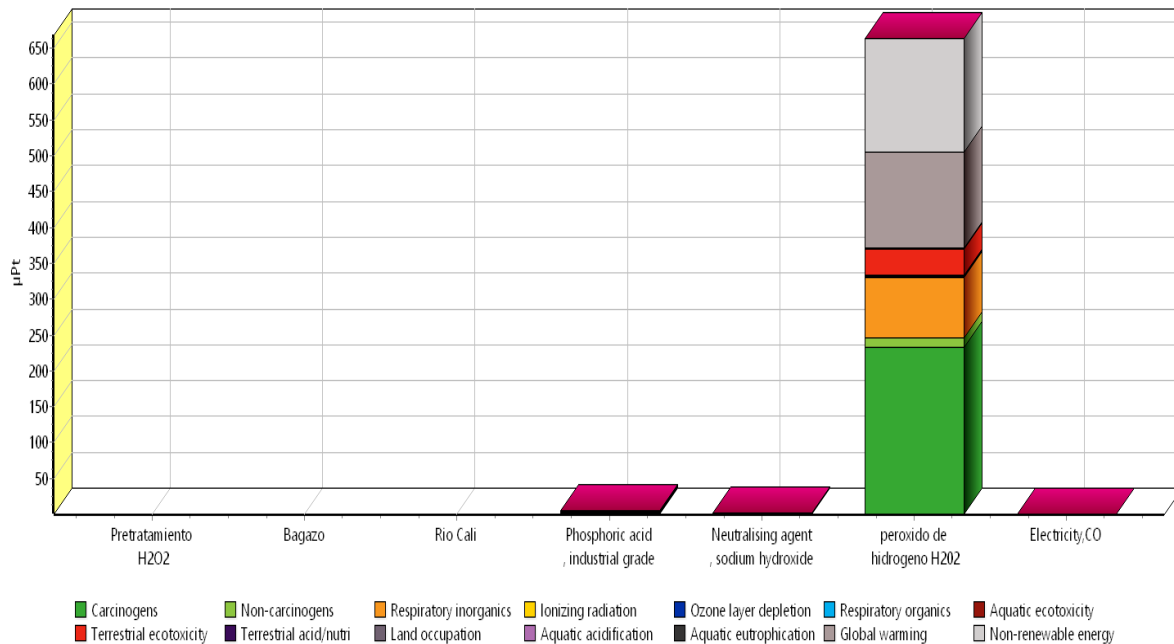
Etapa de hidrólisis enzimática con peróxido de hidrógeno (figura 32). El mayor impacto ambiental negativo en esta etapa está directamente relacionado la mezcla pre-tratada, ese impacto es un legado de la etapa de pretratamiento.

Etapa de fermentación con peróxido de hidrógeno (figura 33). En esta fase se tomó las corrientes de salidas (GAS 17-2 fermentación H2O2 y Lignina fermentación H2O2) como

productos evitados los cuales generan impactos positivos al medio. Sin embargo, hay un impacto negativo en la mezcla hidrolizada (corriente hidrólisis H2O2) este impacto es un legado del peróxido de hidrógeno utilizado en la etapa de pretratamiento.

Etapas de purificación con peróxido de hidrógeno (figura 34). En esta etapa final, el vapor de baja presión genera impactos negativos leves. La mezcla fermentada (Fermentación H2O2) tiene impactos negativos heredados del peróxido de hidrógeno que se utilizó en la etapa de pretratamiento. Por parte la corriente GAS 19-1, purificación H2O2, AGUA-salida de purificación H2O2 y AGUA PURIFICACIÓN_22 H2O2 son tratados como productos evitados. la corriente GAS 19-1 purificación H2O2 genera impactos positivos calentamiento global.

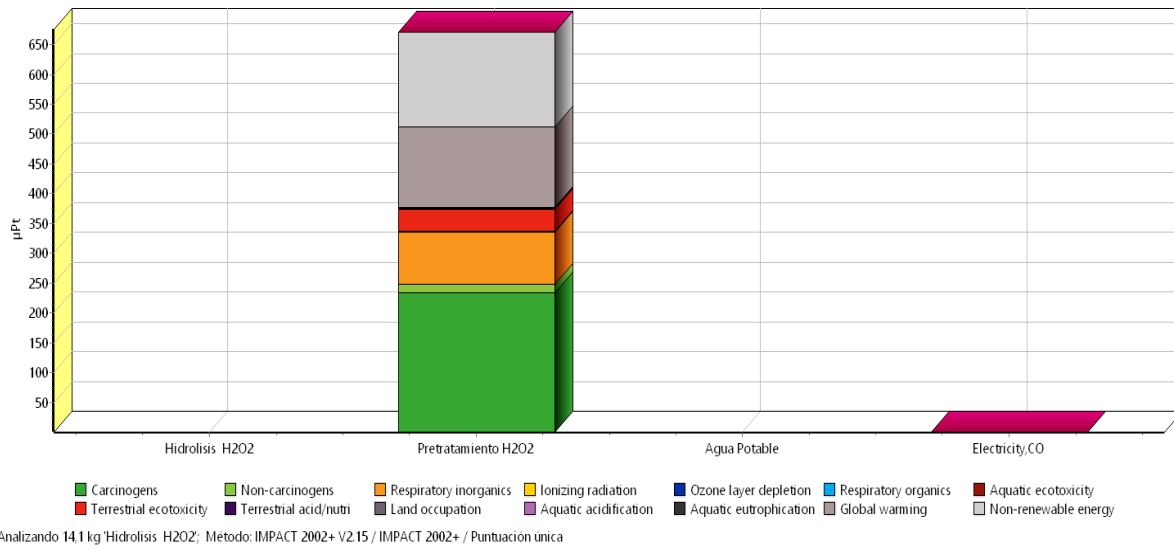
Figura 31. Evaluación de impacto por puntuación única de 13,569 kg de mezcla pretratada del pretratamiento por peróxido de hidrógeno.



Analizando 13.6 kg 'Pretratamiento H2O2'; Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Puntuación única

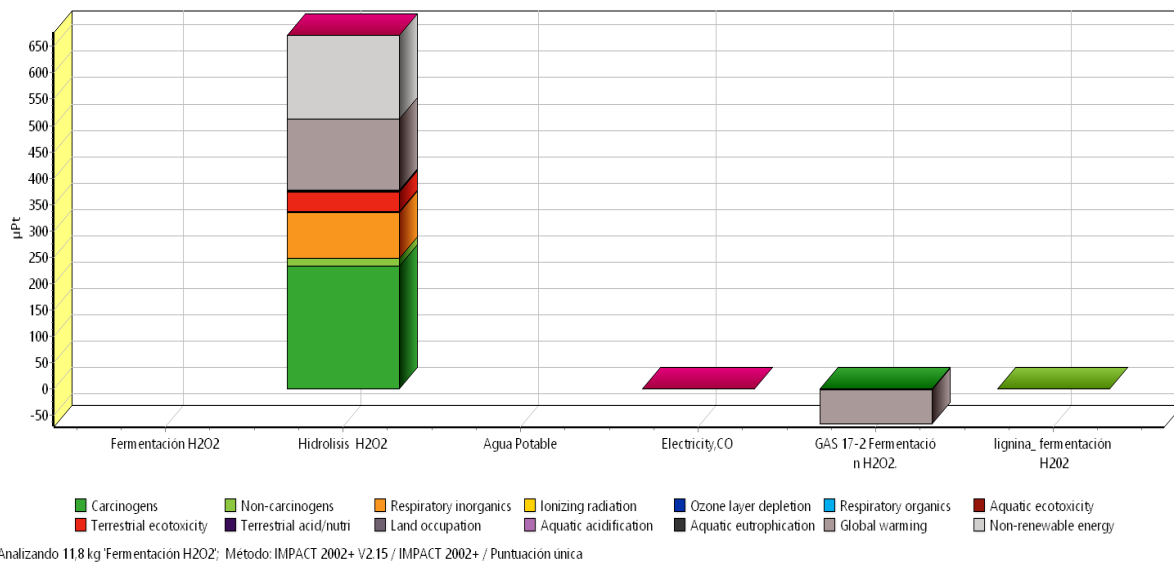
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 32. Evaluación de impacto por puntuación única de 14,149 Kg de mezcla hidrolizada del pretratamiento por peróxido de hidrógeno.



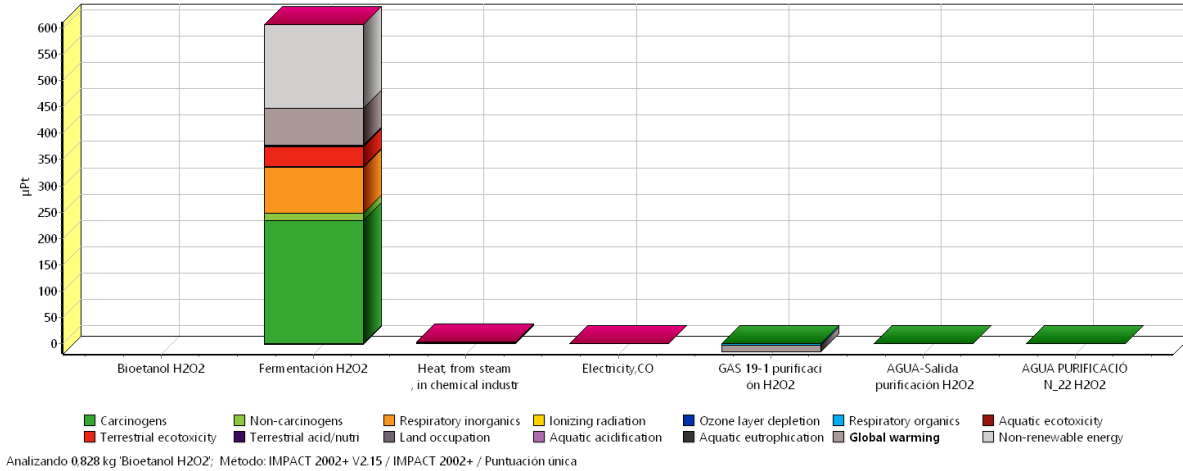
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 33. Evaluación de impacto por puntuación única de 11,803 Kg de mezcla fermentada del pretratamiento por peróxido de hidrógeno.



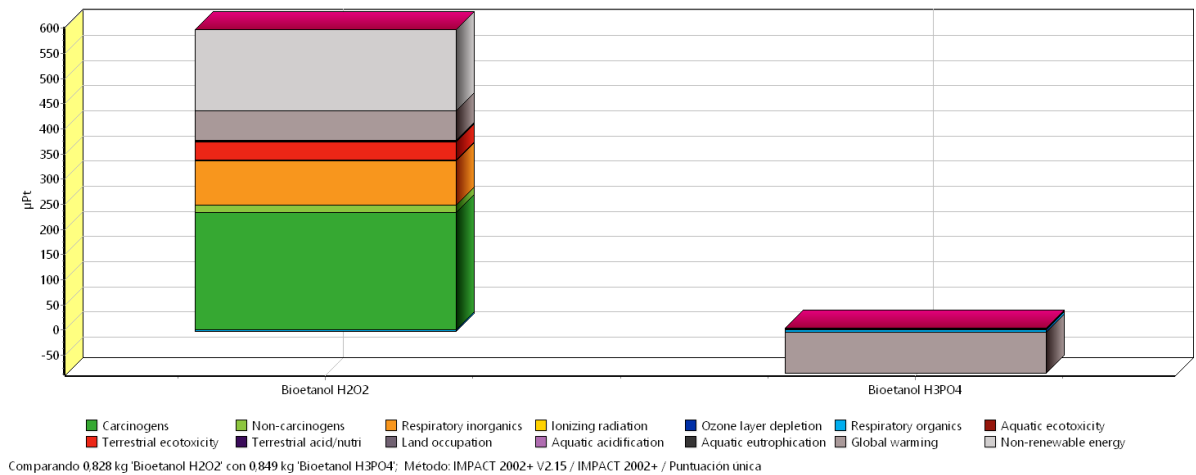
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 34. Evaluación de impacto por puntuación única de 0,827964617 Kg de mezcla purificada del pretratamiento por peróxido de hidrógeno.



Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 35. Análisis comparativo de la producción de bioetanol con ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno



Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Se puede concluir que, por efectos de desempeño ambiental de los dos tipos de pretratamientos, utilizar el pretratamiento con ácido fosfórico tiene menor afectación en las

categorías de impacto evaluadas y por tanto es la opción más viable desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, el peróxido de hidrógeno en este proyecto tiene un rendimiento un poco mayor que el pretratamiento con ácido fosfórico.

Debido a que tomar 0,849183924 kg de bioetanol producido por ácido fosfórico y 0,827964617 kg de bioetanol producido por peróxido de hidrógeno es una cantidad muy pequeña a nivel industrial, se evaluara una tonelada de bioetanol de cada pretratamiento para mejor visualización e identificación de las categorías de impacto

4.4.2.2 Análisis Individual por Pretratamiento. Se evaluó la producción de una tonelada de bioetanol producida con ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno con el método IMPAC 2002 y estos fueron los resultados:

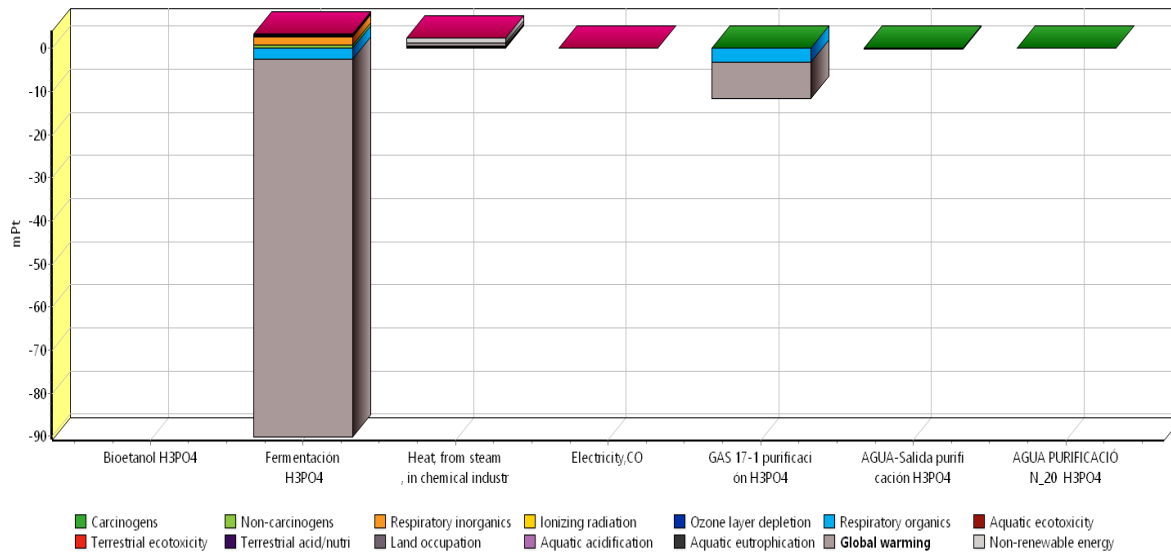
En la evaluación de categoría de impacto (figura 36 y 39) el peróxido de hidrógeno genera impactos negativos sobre el medio, a pesar que las emisiones son tratadas como productos evitados. Esto se debe a que el impacto generado por el peróxido de hidrógeno que viene desde la etapa de pretratamiento es grande. Sin embargo, en el pretratamiento por ácido fosfórico los impactos son positivos, considerando las emisiones al agua y al aire como productos evitados.

En la evaluación al daño (figura 37 y 40) impactos positivos en la mezcla fermentada del pretratamiento por ácido fosfórico en las categorías cambio climático y salud humana. Mientras que en la mezcla fermentada por el pretratamiento con peróxido de hidrógeno se obtiene impactos negativos en salud humana, recursos, cambio climático y calidad de ecosistemas.

En la evaluación por contribución del proceso (figura 38 y 41) del bioetanol producido por el pretratamiento con peróxido de hidrógeno muestra impactos negativos en la mezcla fermentada, vapor de baja presión y en la electricidad utilizada para los equipos. Mientras que el bioetanol

producido por el ácido fosfórico muestra impactos positivos en la mezcla fermentada y en las emisiones de gas que son tratados como productos no deseados (GAS 17-1 purificación H3PO4).

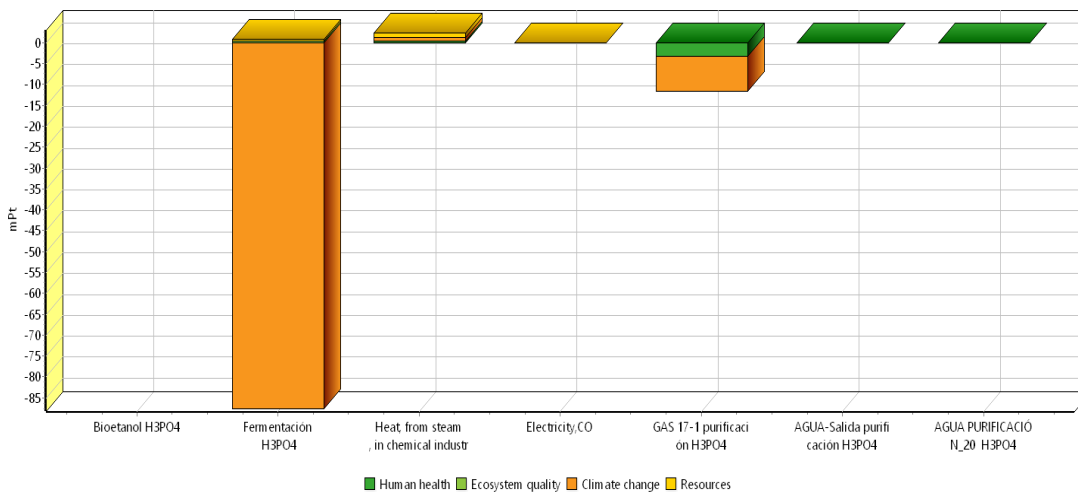
Figura 36. Evaluación por categoría de impacto del pretratamiento por ácido fosfórico.



Analizando 1 ton Bioetanol H3PO4; Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Puntuación única

Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

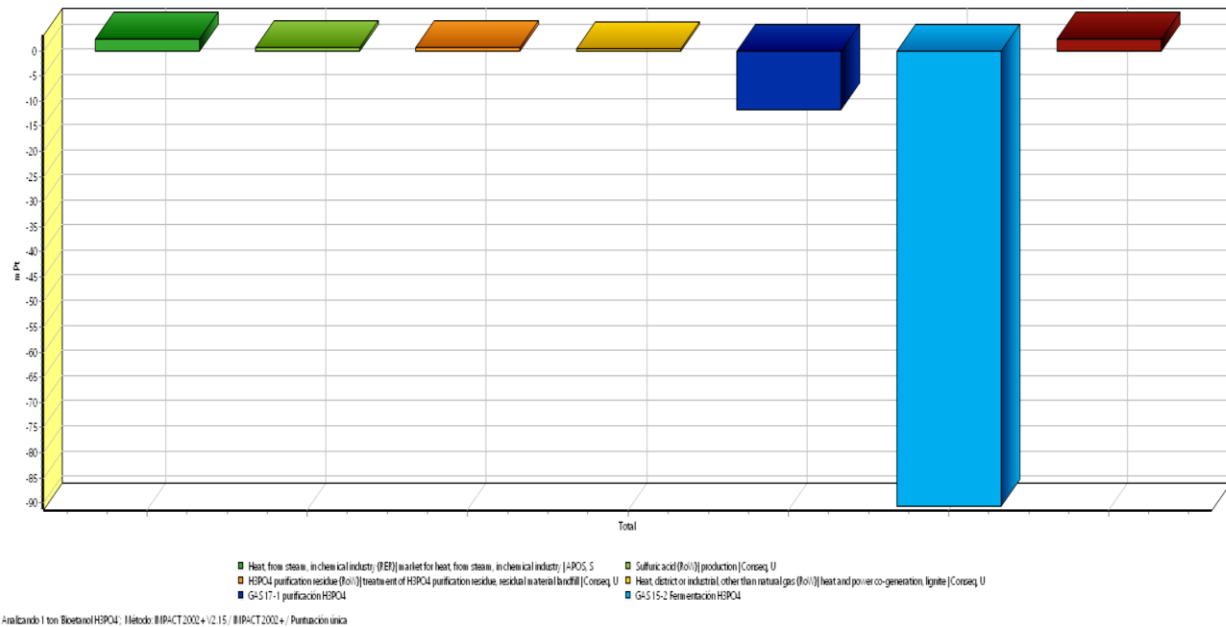
Figura 37. Evaluación del daño del pretratamiento por ácido fosfórico



Analizando 1 ton Bioetanol H3PO4; Método: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Puntuación única

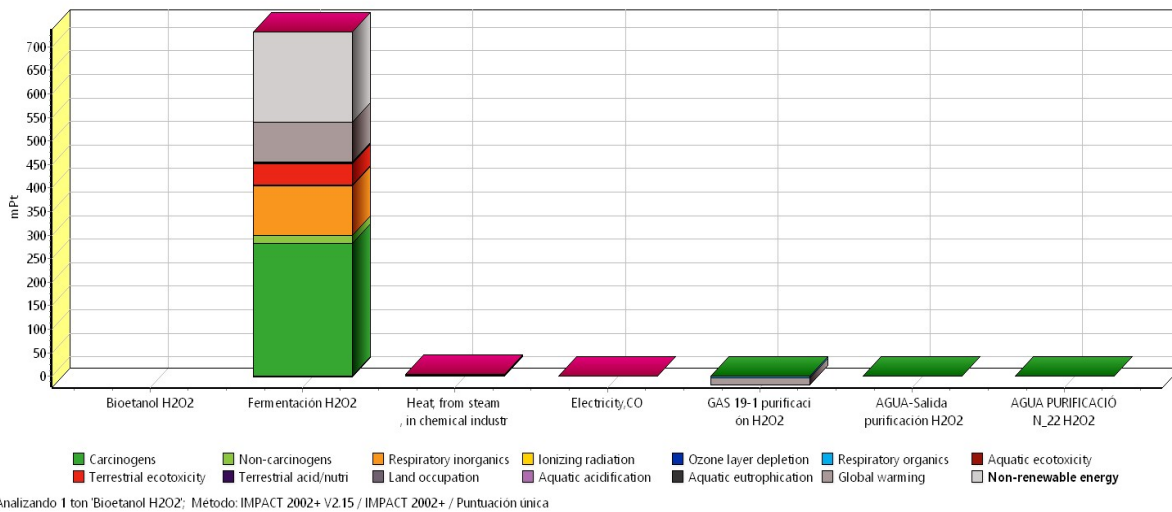
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 38. Contribución del proceso ácido fosfórico



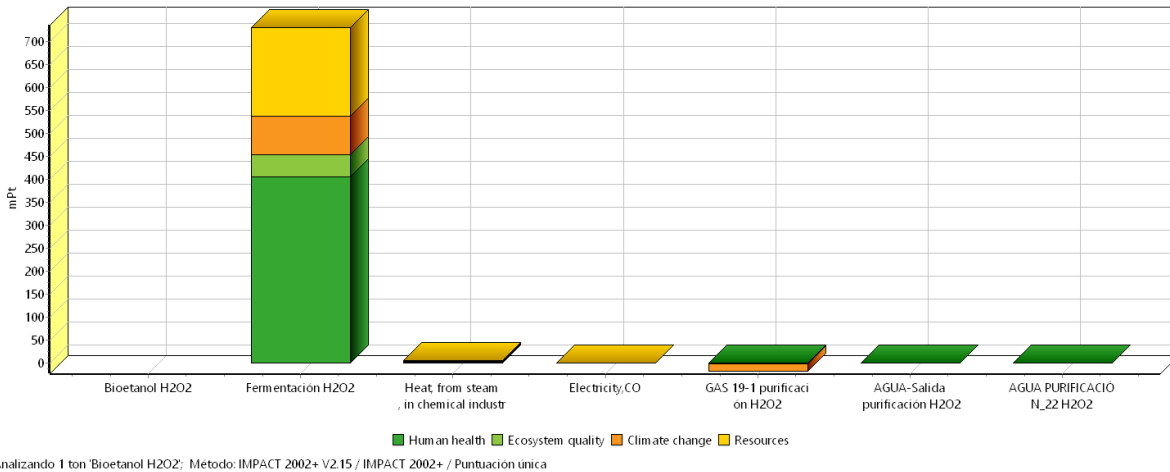
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 39. Evaluación por categoría de impacto-puntuación única del pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino



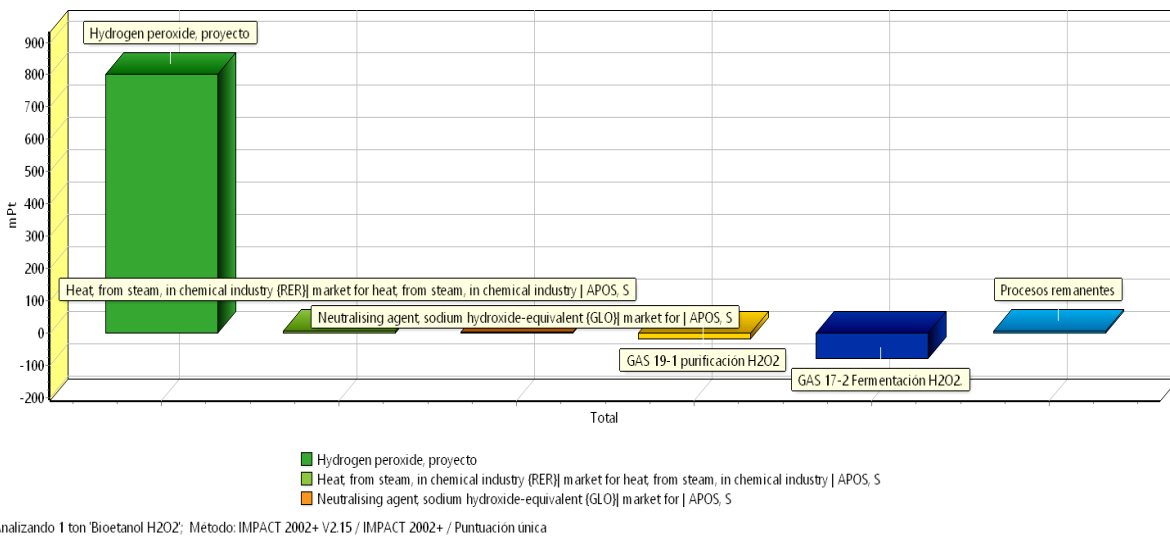
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 40. Evaluación del daño del pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino



Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 41. Contribución del proceso pretratamiento peróxido de hidrógeno



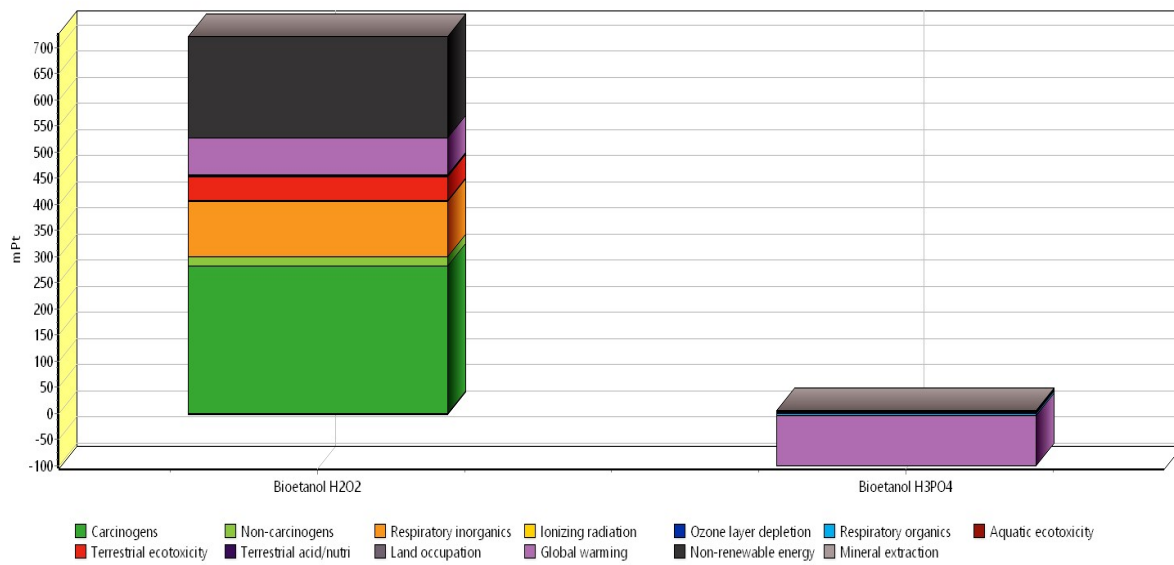
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3.

4.4.2.3 Análisis Comparativo entre los Dos Pretratamientos. El análisis comparativo por categoría de impacto de los dos pretratamientos (figura 42) muestra que producir bioetanol con peróxido de hidrógeno causaría efectos negativos al medio. El orden de afectación de estas

categorías serían las siguientes; Cancerígenos>No-renovable> Calentamiento global> Ectotoxicida terrestre>No cancerígenos.

El bioetanol producido por el pretratamiento con ácido fosfórico tiene impactos positivos en la categoría de calentamiento global, orgánicos respiratorios y algunas trazas de las otras categorías de impacto, mostrando que esta es el método de pretratamiento que muestra un desempeño positivo con el medio ambiente.

Figura 42. Análisis comparativo evaluación por categoría de impacto de los dos pretratamientos

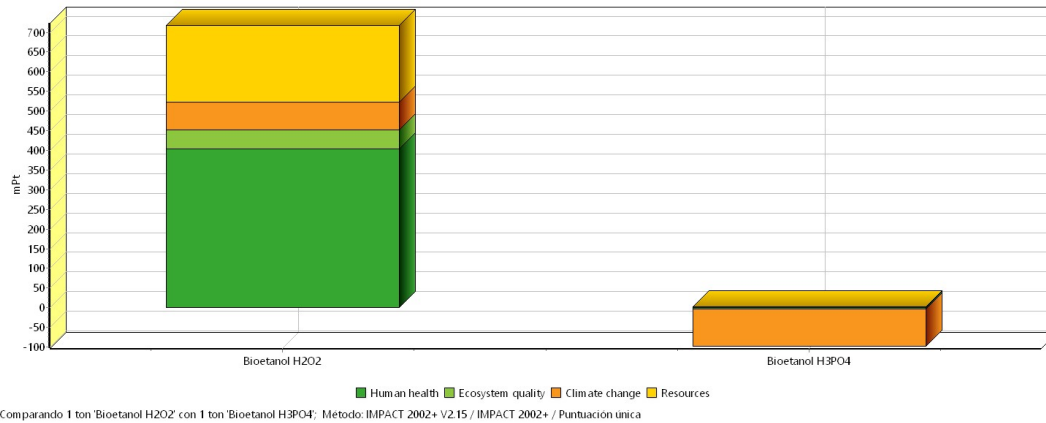


Comparando 1 ton 'Bioetanol H2O2' con 1 ton 'Bioetanol H3PO4'; Metodo: IMPACT 2002+ V2.15 / IMPACT 2002+ / Puntuación única

Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

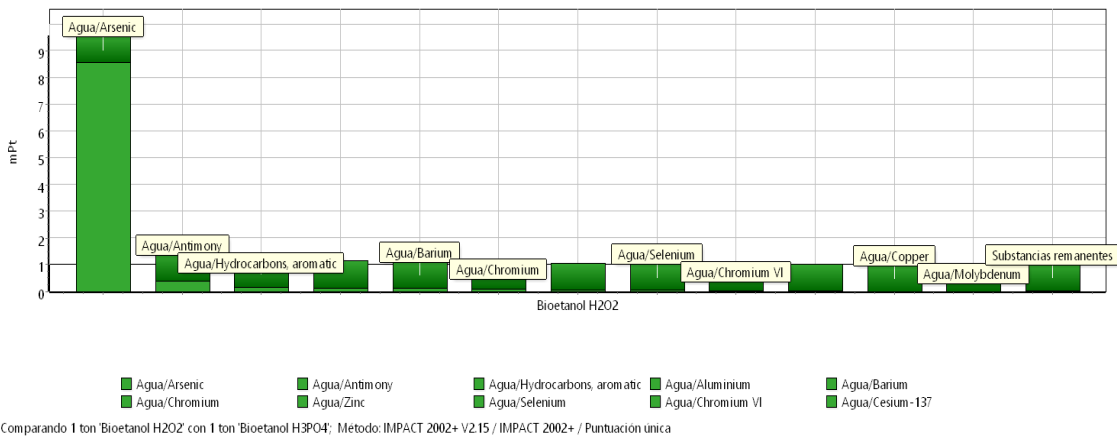
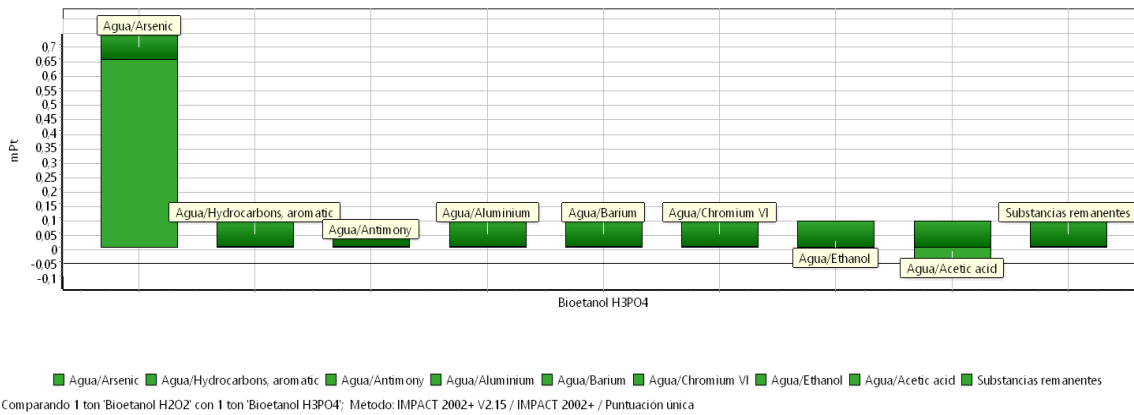
La figura 43 muestra la evaluación al daño de los dos pretratamientos, siendo el pretratamiento por ácido fosfórico con mejor desempeño ambiental que el peróxido de hidrógeno. igualmente, en las emisiones al agua, aire, suelo y contribución por procesos que se muestran en las figuras del 44 al 47 perfilan al método de pretratamiento por ácido fosfórico como el elegido para producir bioetanol a partir del bagazo de caña de azúcar.

Figura 43. Análisis comparativo evaluación del daño de los dos pretratamientos



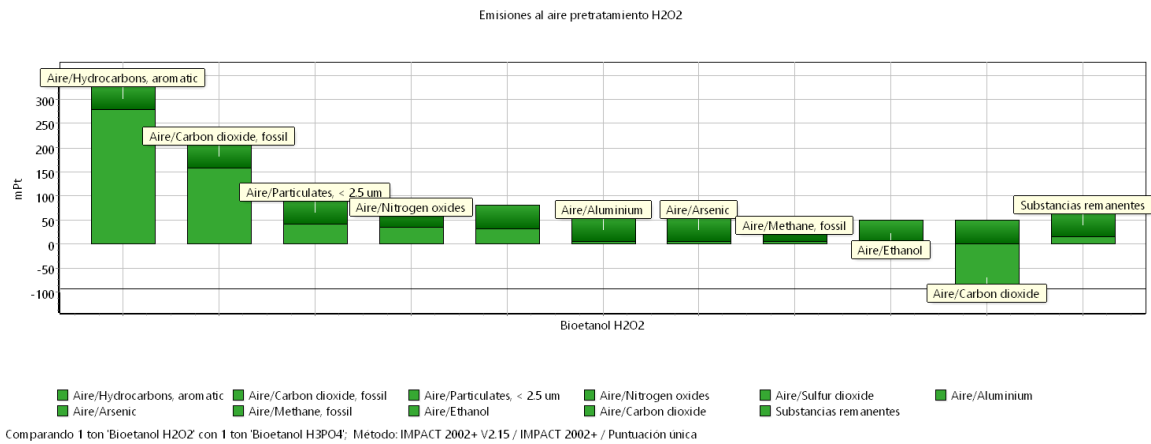
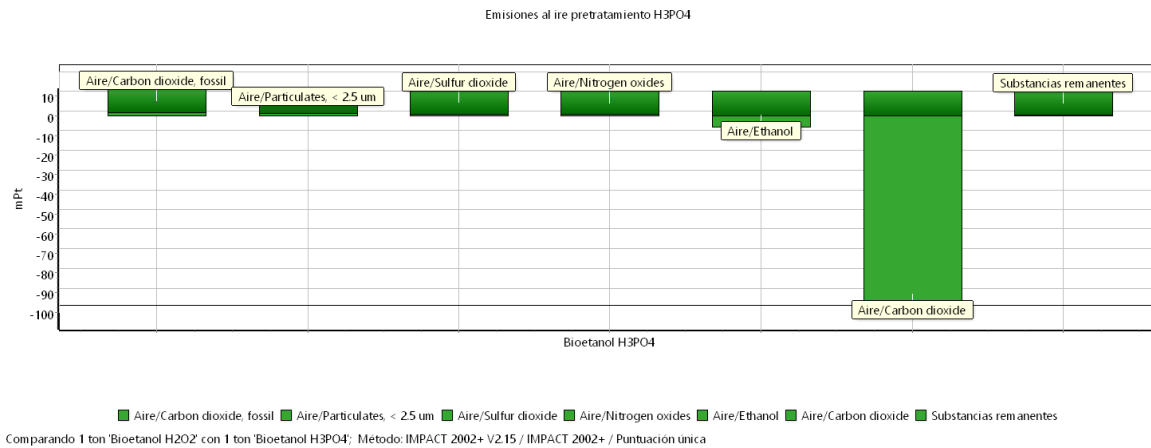
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3 3

Figura 44. Comparativo emisiones al agua de los dos pretratamientos



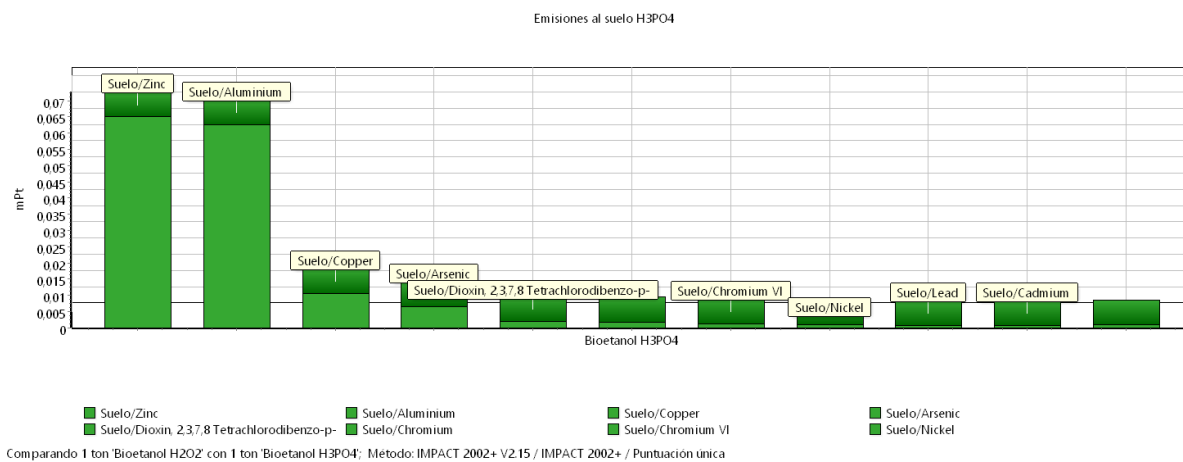
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3 3

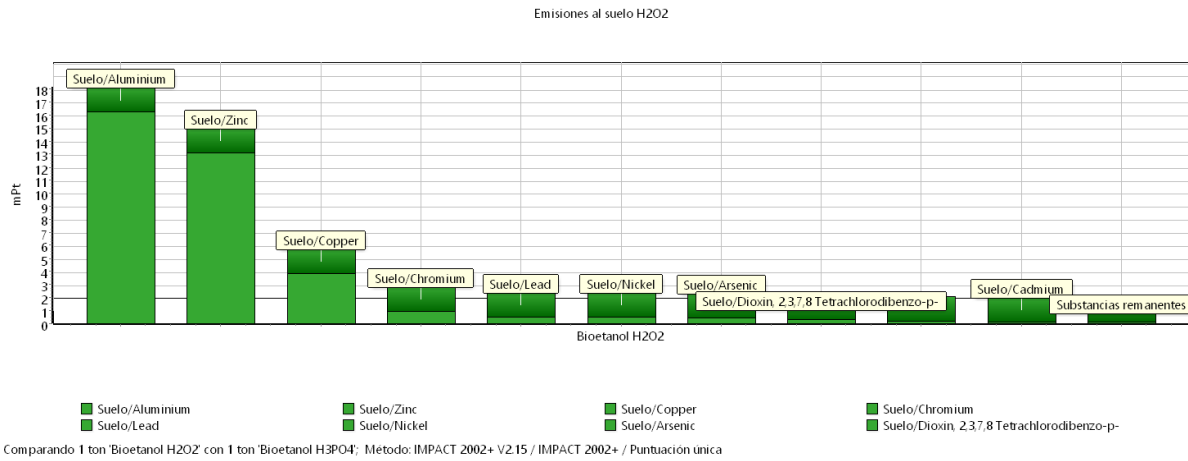
Figura 45. Comparativo emisiones al aire de los dos pretratamientos



Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3 3

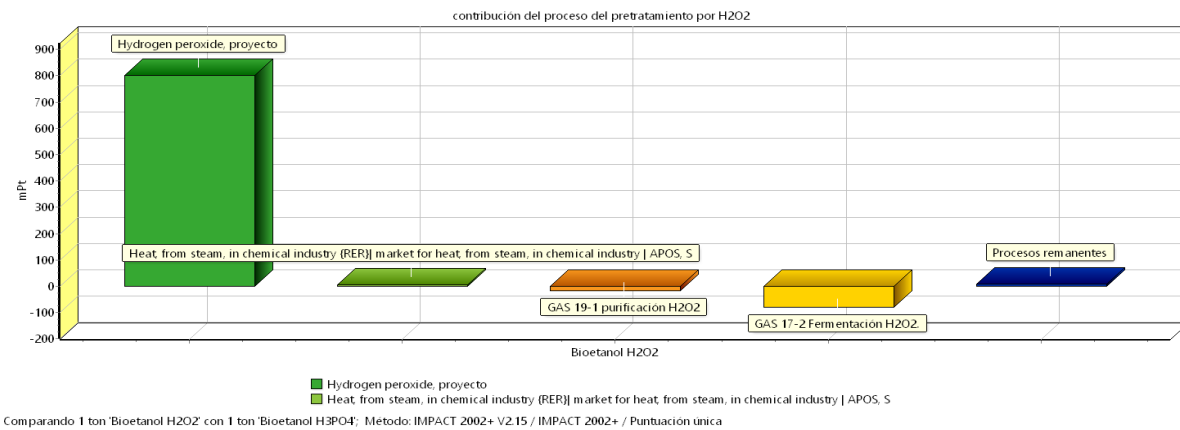
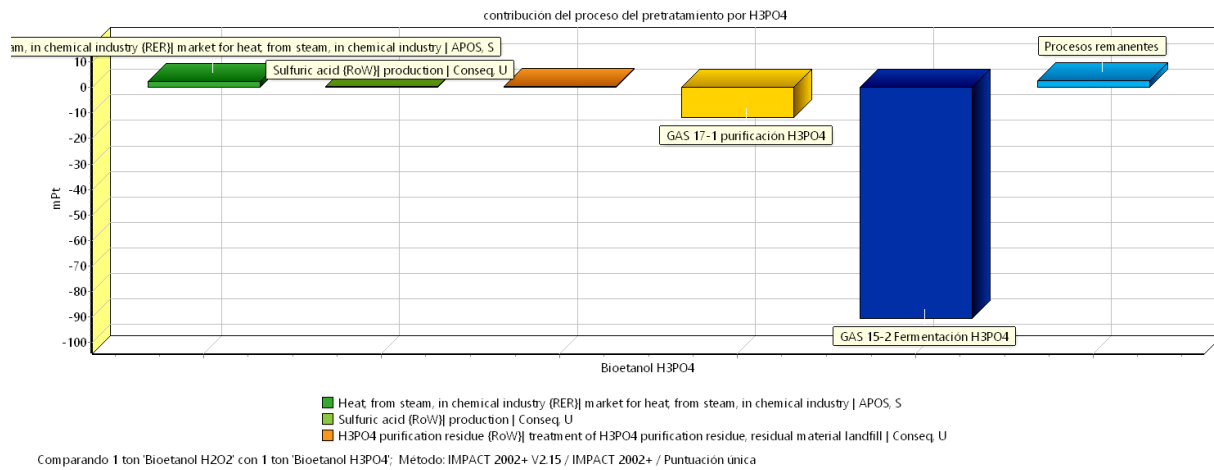
Figura 46. Comparativo emisiones al suelo de los dos pretratamientos





Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 47. Análisis comparativo de contribución del proceso de los dos pretratamientos.



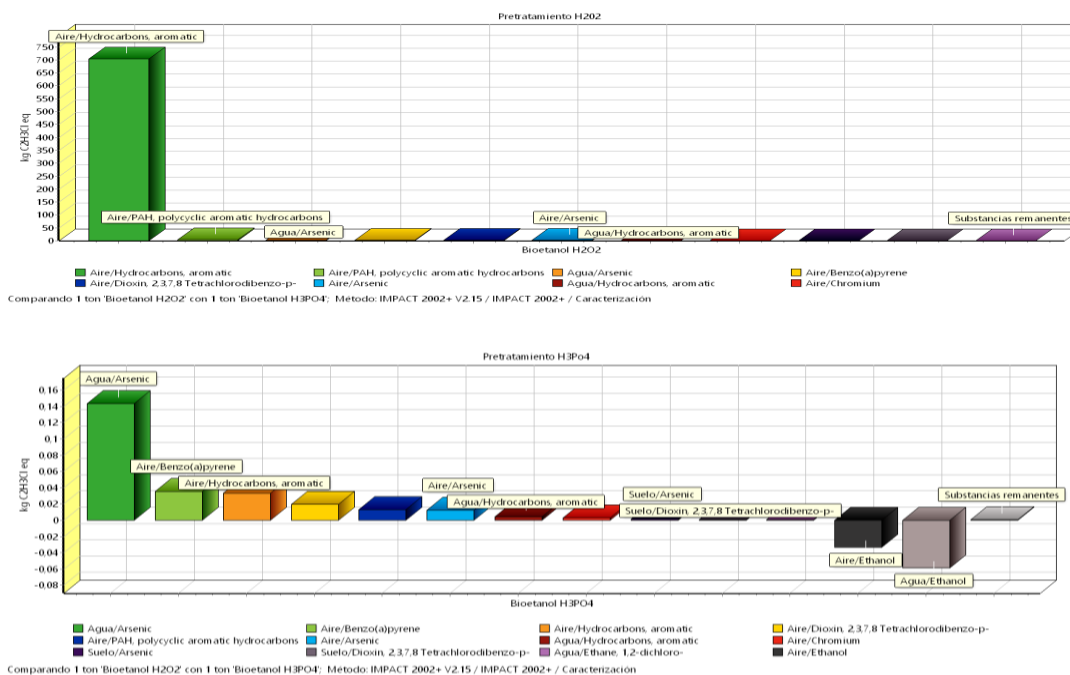
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

4.4.2.4 Perfil Medio Ambiental Método IMPAC 2002. Se comparó la producción de una tonelada de bioetanol H_3PO_4 con una tonelada de H_2O_2 de las categorías cancerígeno, no-cancerígeno, respiratorios inorgánicos, ecotoxicidad terrestre y calentamiento global con el método IMPAC 2002.

En cada categoría de impacto se puede notar la afectación al medio ambiente que se genera al pretratar bagazo de caña de azúcar con peróxido de hidrógeno. A pesar de tomar todas las emisiones al agua y aire como productos evitados o hacer un aprovechamiento con esas corrientes, se sigue obteniendo impactos negativos al medio, esto se debe al efecto en el uso del peróxido desde la etapa de pretratamiento.

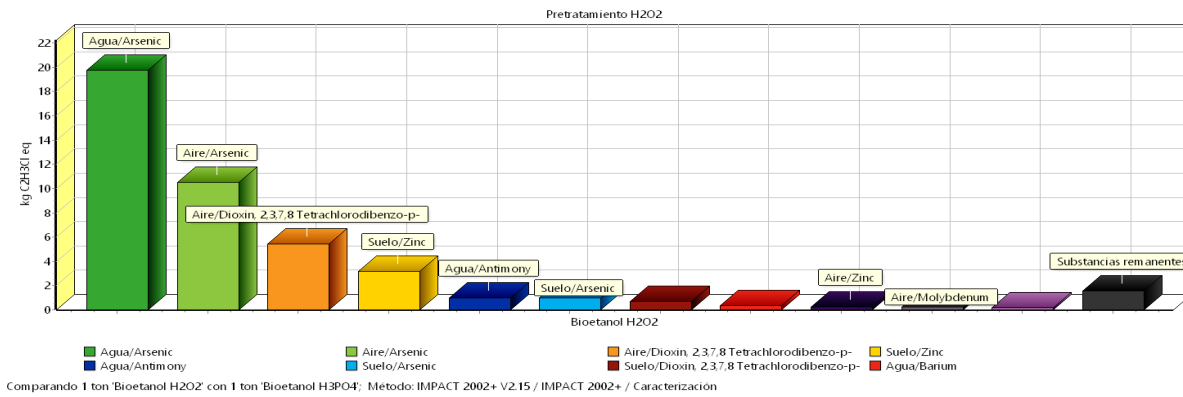
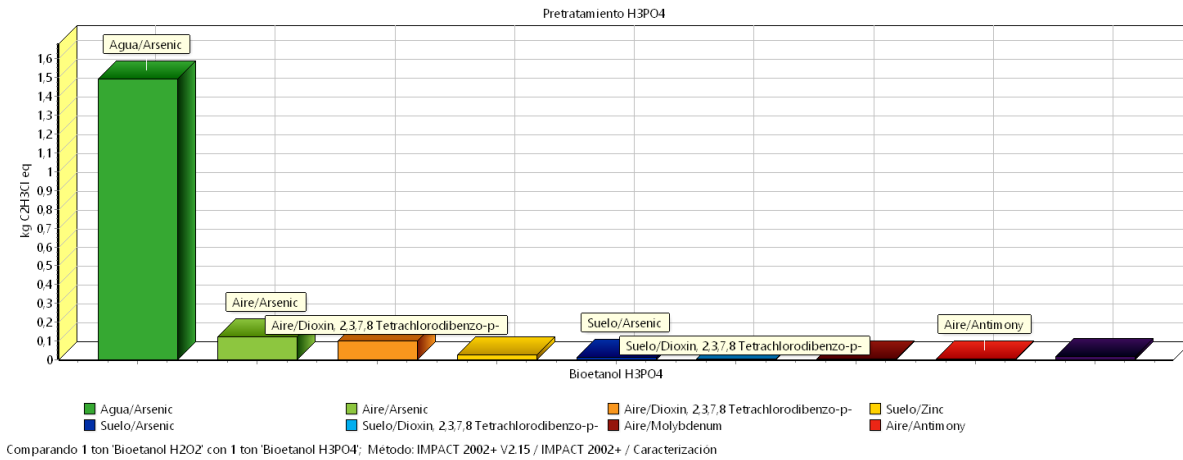
Por otra parte, el pretratamiento con ácido fosfórico tiene menor afectación en cada categoría de impacto y se genera un beneficio al medio cuando se toman las emisiones al aire y agua como productos evitados o aprovechables.

Figura 48. Perfil medioambiental categoría cancerígenos



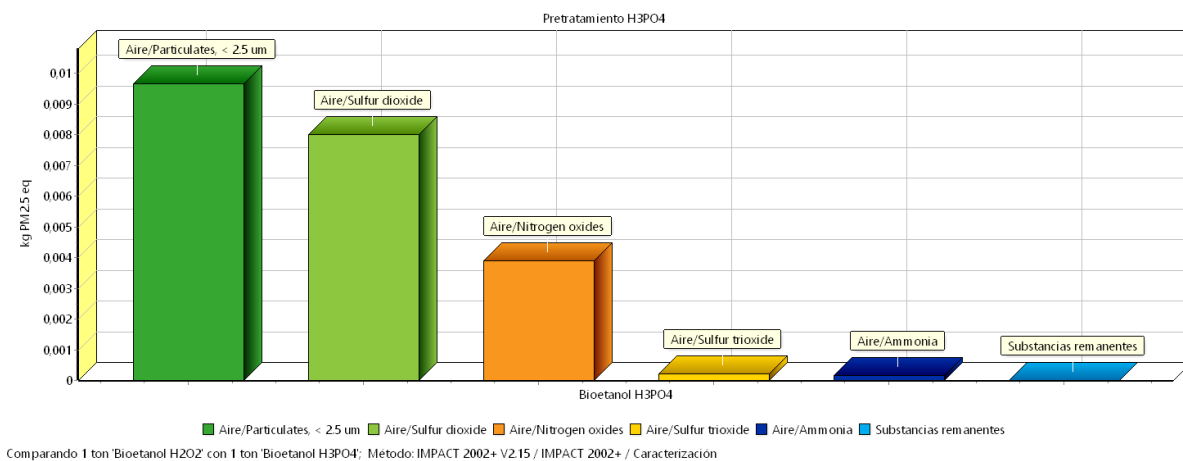
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

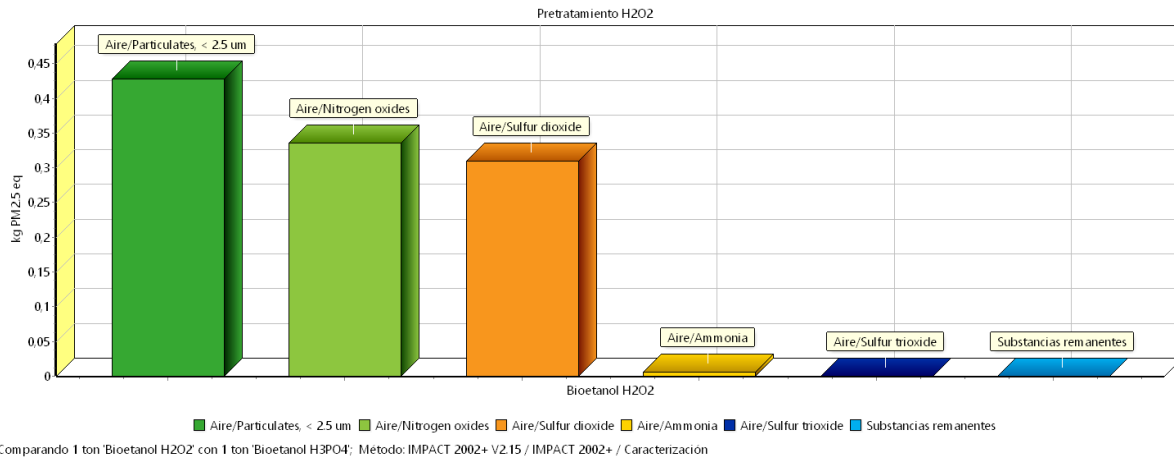
Figura 49. Perfil medioambiental categoría No-cancerígenos



Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

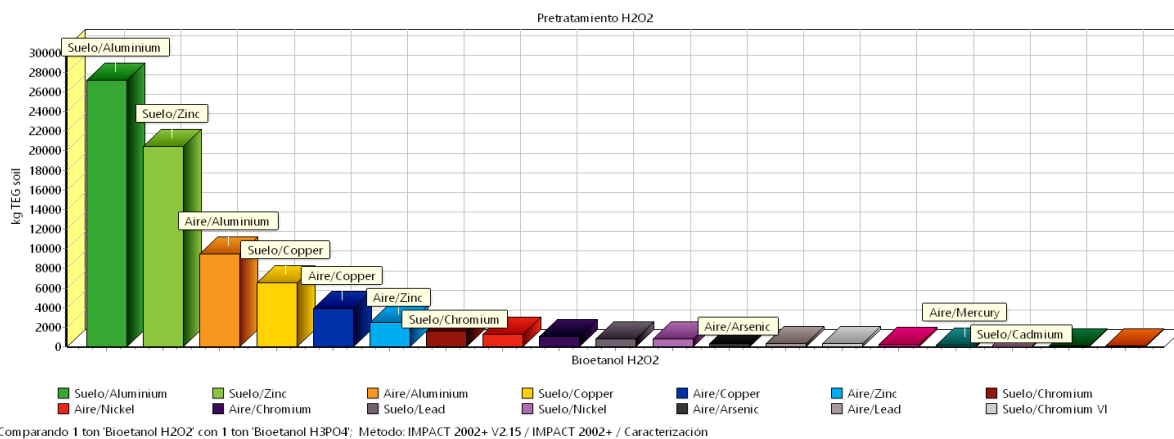
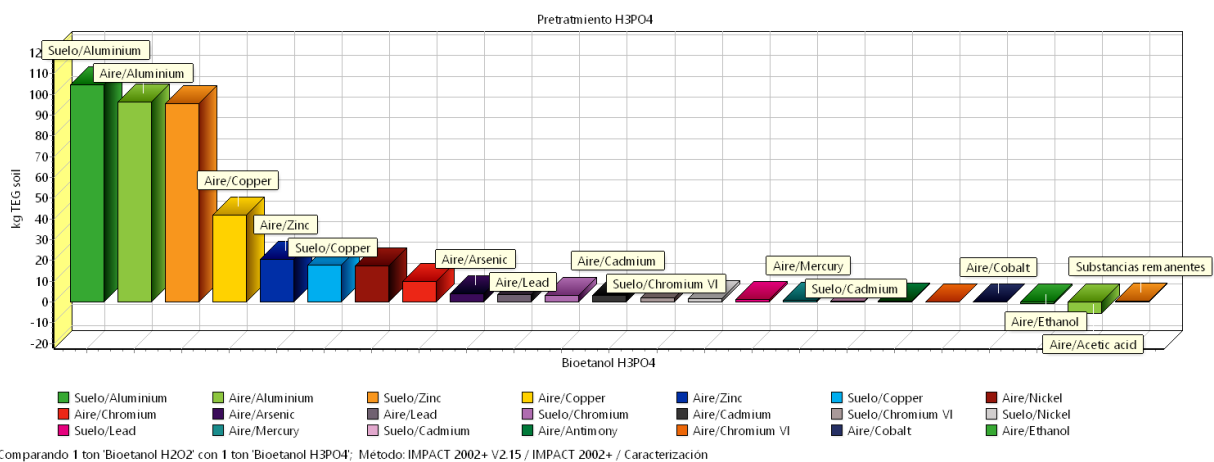
Figura 50. Perfil medioambiental categoría Inorgánicos respiratorios





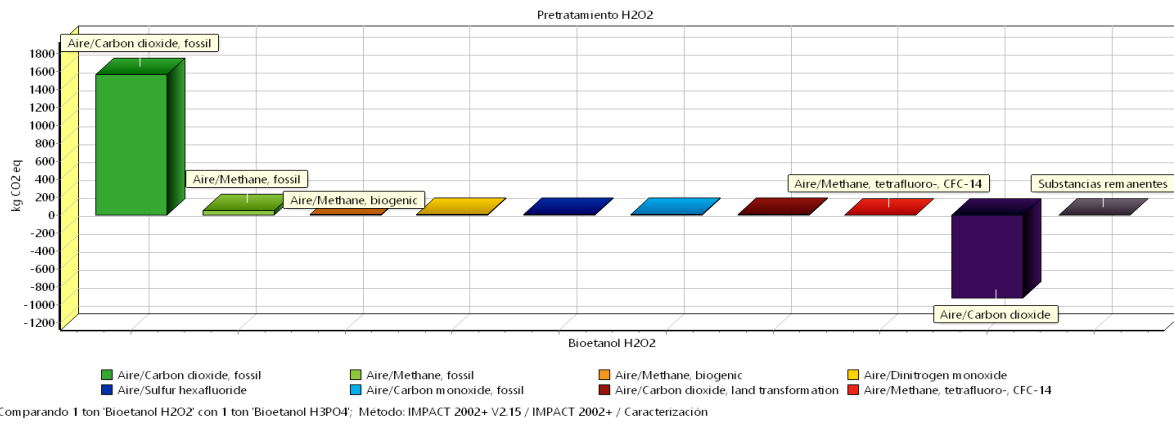
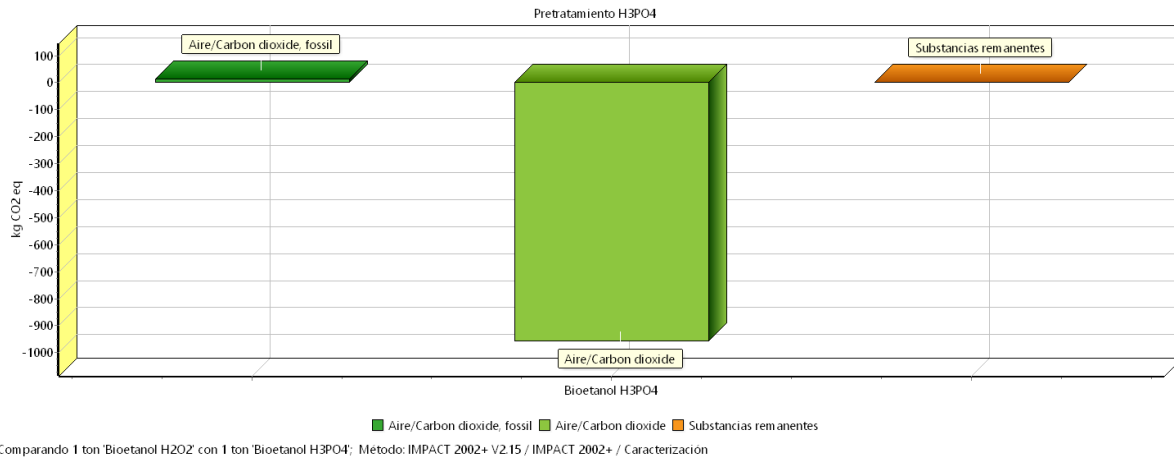
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 51. Perfil medioambiental categoría Ecotoxicidad terrestre



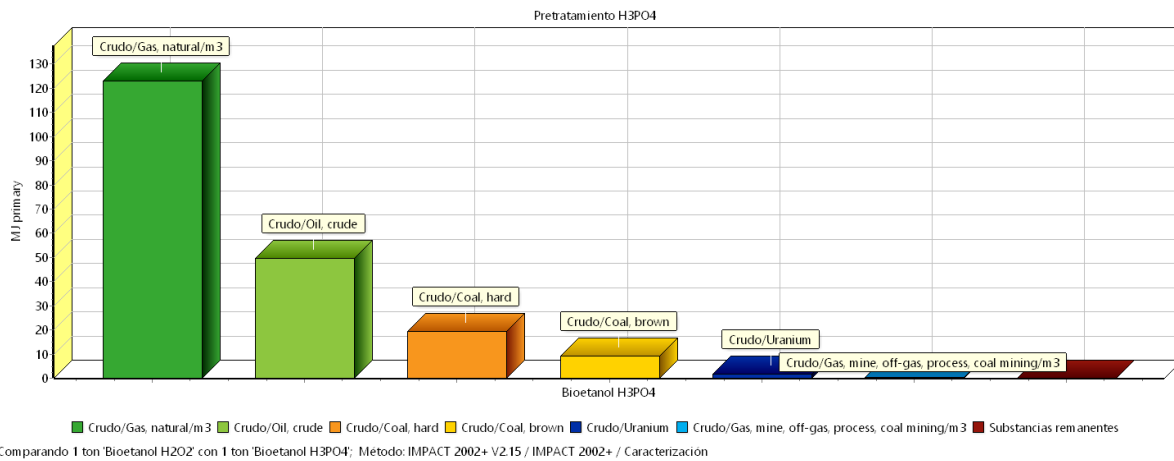
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

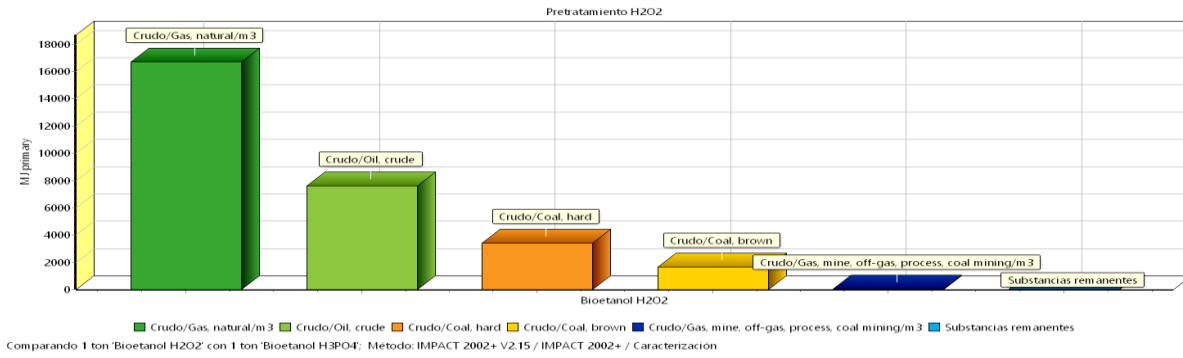
Figura 52. Perfil medioambiental categoría calentamiento global



Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 53. Perfil medioambiental categoría energía no-renovable





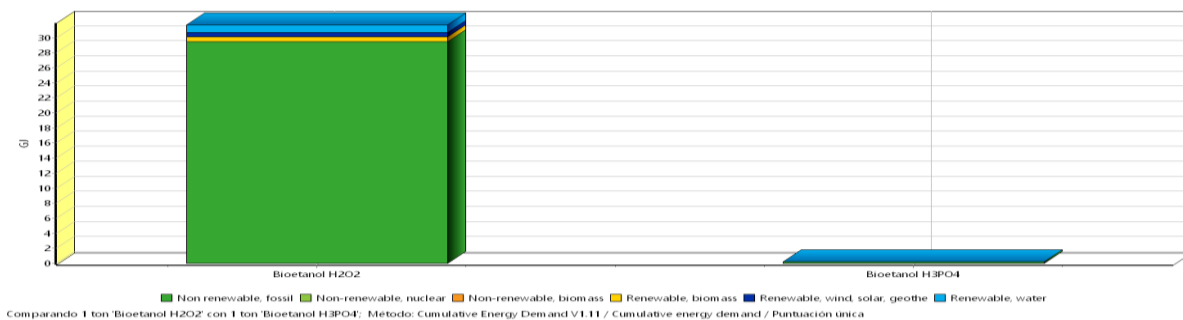
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

4.4.2.5 Demanda de Energía. Se utilizó el método de impacto ambiental Cumulative Energy Demand V1.11 para evaluar la demanda energética. En este análisis se puede notar la gran necesidad del uso de energía no renovable para la producción de bioetanol por el método de peróxido de hidrógeno (ver figura 54), mientras que el uso de energías es casi nulo para el pretratamiento con ácido fosfórico.

La energía relacionada con la contribución al proceso (ver figura 55) es alta para el pretratamiento con peróxido de hidrógeno ya que para esta requiere alta cantidad de energía para cada proceso.

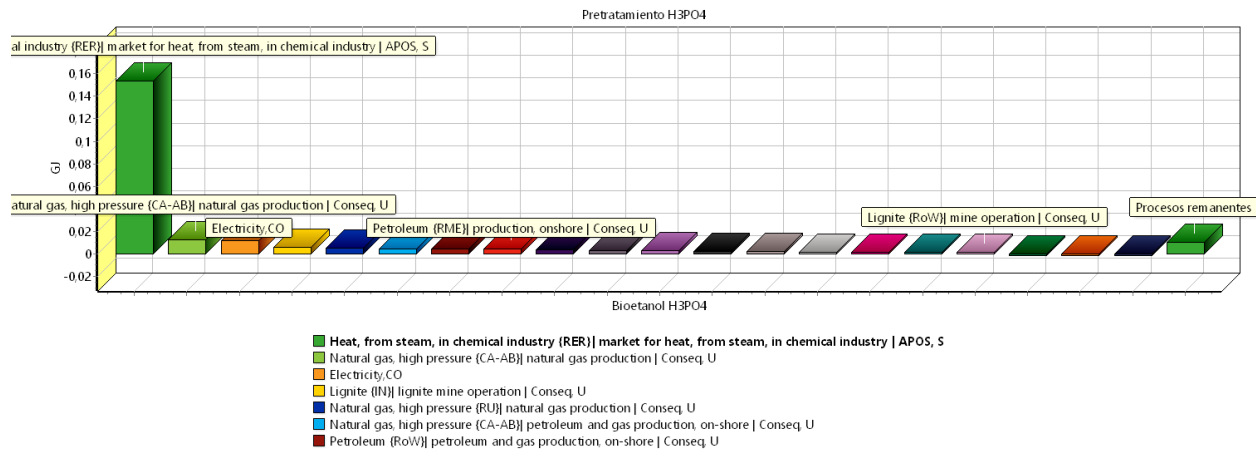
4.4.2.6 Cumulative Energy Demand V1.11.

Figura 54. Análisis comparativo de la demanda energética en los dos pretratamientos por categoría de impacto

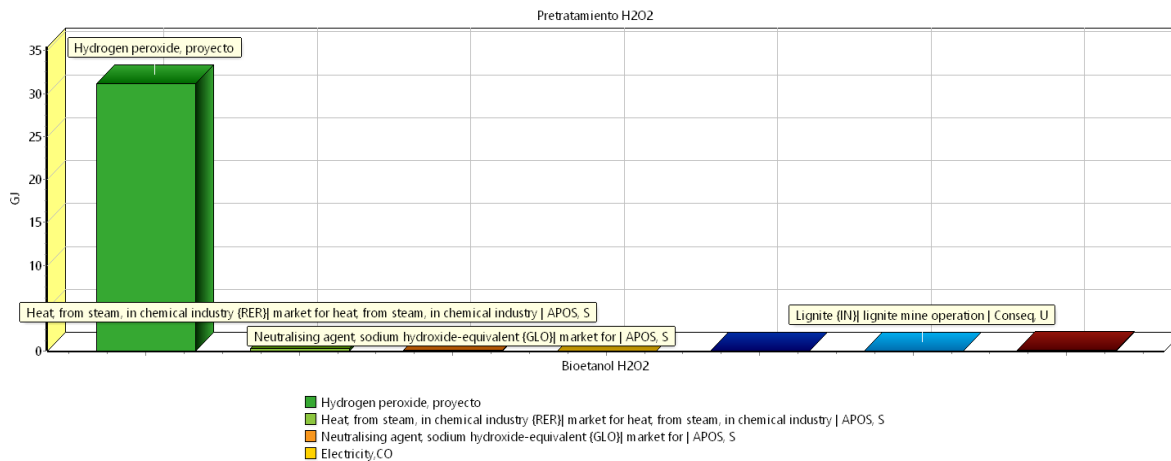


Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3 3

Figura 55. Análisis comparativo de demanda energética por contribución el proceso



Comparando 1 ton 'Bioetanol H2O2' con 1 ton 'Bioetanol H3PO4'; Método: Cumulative Energy Dem and V1.11 / Cumulative energy demand / Puntuacion unica

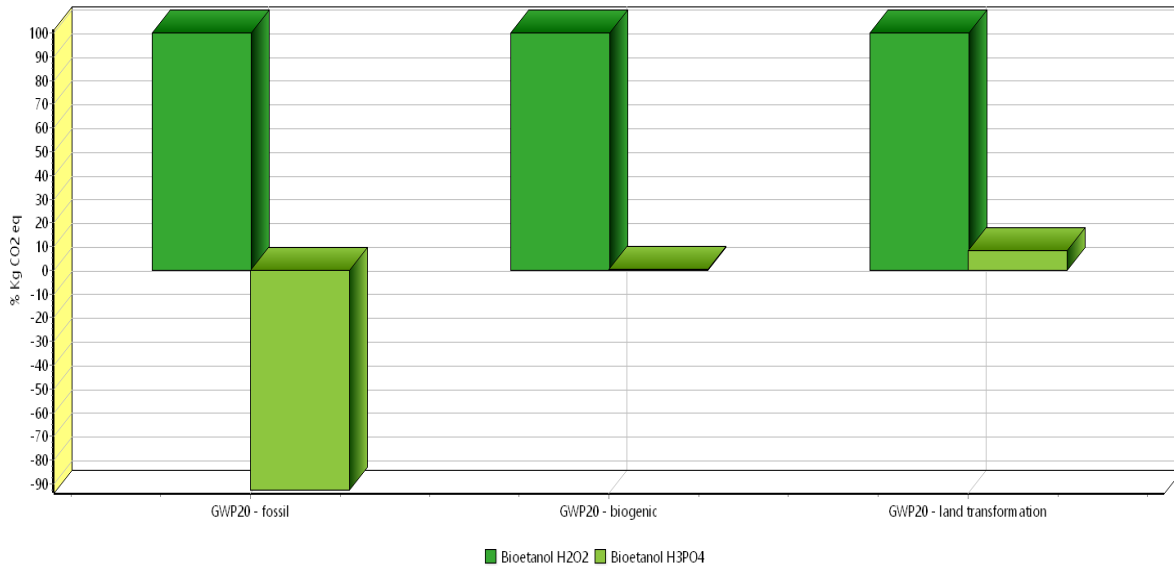


Comparando 1 ton 'Bioetanol H2O2' con 1 ton 'Bioetanol H3PO4'; Método: Cumulative Energy Dem and V1.11 / Cumulative energy demand / Puntuacion unica

Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

4.4.2.7 Huella de Carbono. El método IPCC 2021 fue utilizado para evaluar la huella de carbono a 20 años, 100 años y 500 años. Las figuras 56 al 58 muestran que el pretratamiento por ácido fosfórico tiene menor impacto ambiental con la cantidad de CO2 emitido al medio, esto se debe al tratar las emisiones en cada etapa del proceso como productos evitados o aprovechables. Sin embargo, para lo contrario con el pretratamiento por peróxido de hidrógeno, quien lidera los impactos negativos en cuanto a las emisiones de gases efecto invernadero.

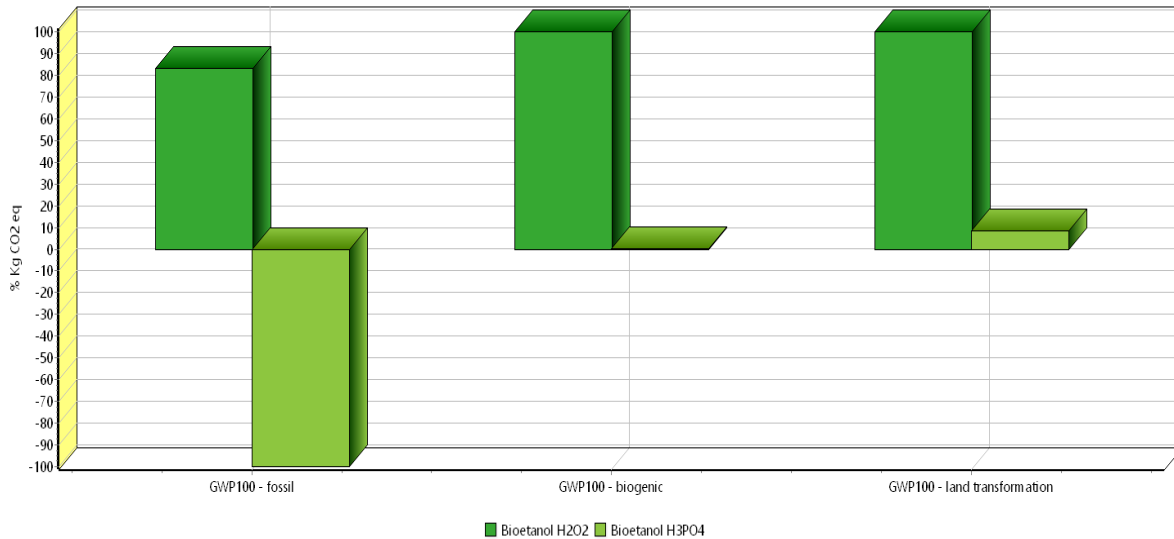
Figura 56. Huella de carbono a 20 años de los dos pretratamientos (IPCC 2021 GWP20 V1.00)



Comparando 1 ton 'Bioetanol H2O2' con 1 ton 'Bioetanol H3PO4'; Metodo: IPCC 2021 GWP20 V1.00 / Caracterización

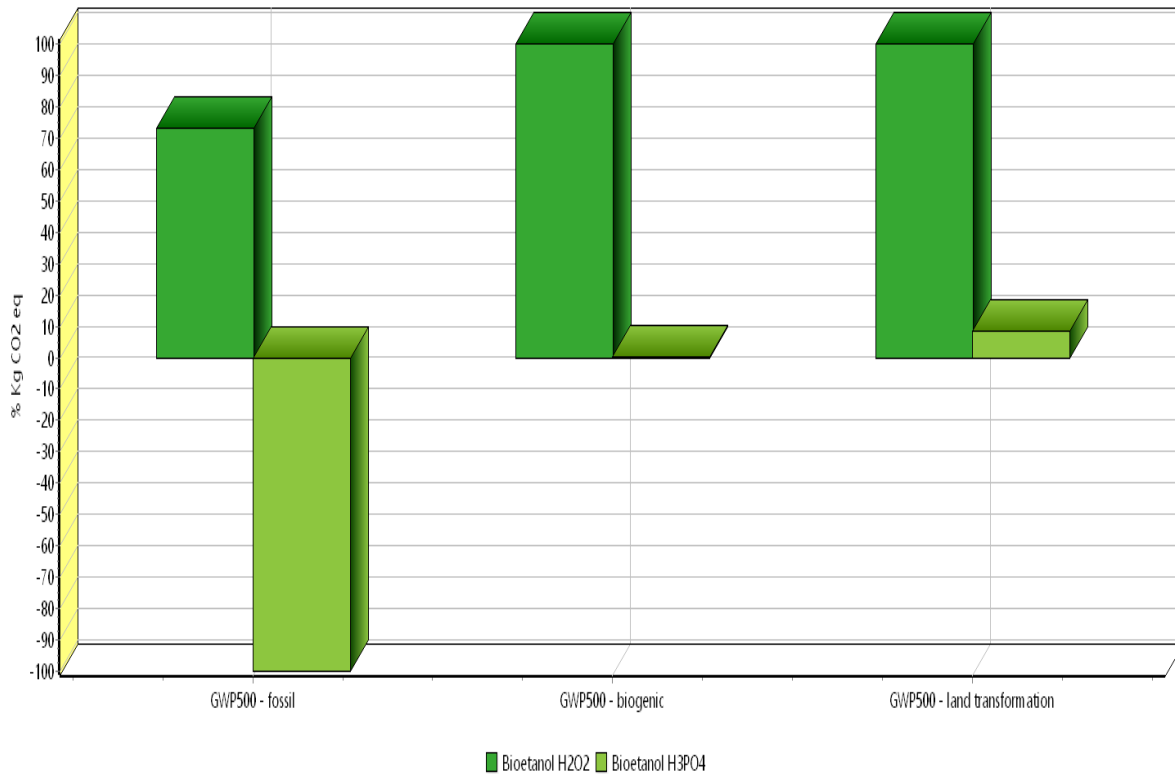
Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 57. Huella de carbono a 100 años de los dos pretratamientos (IPCC 2021 GWP100 V1.00)



Comparando 1 ton 'Bioetanol H2O2' con 1 ton 'Bioetanol H3PO4'; Metodo: IPCC 2021 GWP100 V1.00 / Caracterización

Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

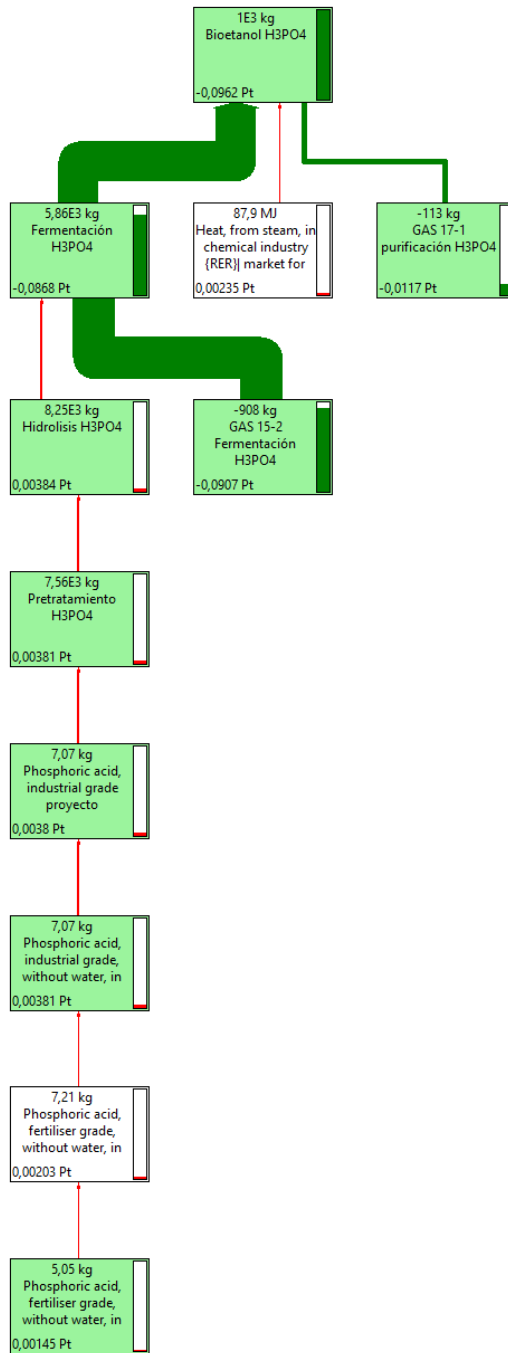
Figura 58. Huella de carbono a 500 años de los dos pretratamientos (IPCC 2021 GWP500 V1.00)

Comparando 1 ton 'Bioetanol H2O2' con 1 ton 'Bioetanol H3PO4'; Método: IPCC 2021 GWP500 V1.00 / Caracterización

Nota: Resultados obtenidos del software SIMAPRO 9.3.0.3

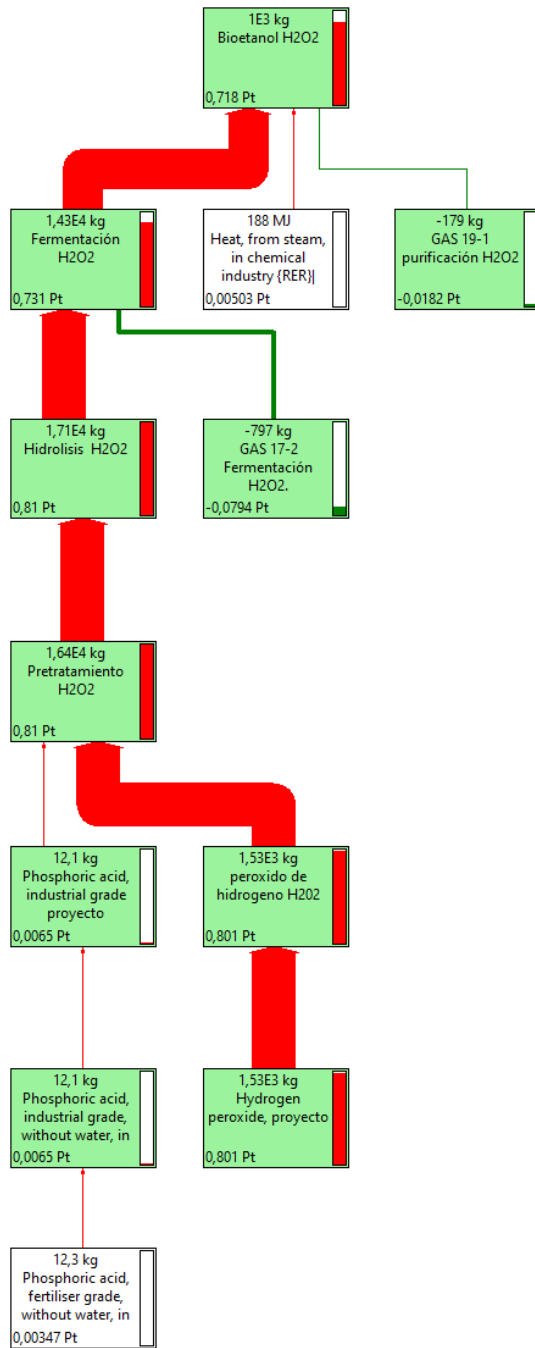
4.4.2.8 Análisis de Red. Se realizó el análisis de red para la producción de una tonelada de bioetanol con los dos pretratamientos en estudio. Se puede concluir que el impacto ambiental negativo generado en cada categoría evaluada por el método de pretratamiento peróxido de hidrógeno alcalino está directamente relacionado con uso del reactivo peróxido y el ácido fosfórico utilizado para neutralizar, a pesar de usar las emisiones en las etapas de fermentación y purificación como productos evitados no se ve una afectación positiva sobre este pretratamiento. Caso contrario al pretratamiento por ácido fosfórico el cual genera impactos positivos sobre el medio y especialmente al usar sus emisiones en cada etapa como productos deseados.

Figura 59. Análisis de red para el pretratamiento por ácido fosfórico puntuación única



Nota. Obtenido del software SIMAPRO 9.3.0.3

Figura 60. Análisis de red para el pretratamiento por peróxido de hidrógeno puntuación única



Nota. Obtenido del software SIMAPRO 9.3.0.3.

5 Conclusiones

La cienciometría realizada en este trabajo muestra que el pretratamiento del bagazo de caña es un tema que está causando interés en el sector industrial y académico. A pesar que China no es el mayor productor de caña de azúcar a nivel mundial, es el país líder en número de publicaciones anuales relacionadas con esta investigación. De los países latinoamericanos Brasil es el país líder en investigación en este estudio, mientras que Colombia solo ha publicado un artículo de investigación relacionada con los cuatro pretratamientos en estudio. La colaboración entre países y autores muestra una heterogeneidad de grupos, lo cual permite deducir muy poca relación entre los países y autores líderes.

De los dos pretratamientos potenciales analizados en la simulación de procesos, el pretratamiento por ácido fosfórico genera menos impactos negativos al medio. Sin embargo, la energía requerida en el reactor de pretratamiento es alta comparada con el reactor de pretratamiento por peróxido de hidrogeno debido a las condiciones de temperatura que trabaja el reactor de pretratamiento por ácido fosfórico

La evaluación de impacto ambiental de los pretratamientos con mayor potencial muestra que tomar las emisiones al agua, aire y suelo como productos evitados genera impactos positivos al medio en el pretratamiento con ácido fosfórico. Por otra parte, una de las causas de los impactos ambientales negativos generados en el pretratamiento por peróxido de hidrógeno alcalino es el uso de grandes cantidades de reactivos (peróxido de hidrógeno y ácido fosfórico para neutralizar) y dispositivos de ingeniería en la etapa de pretratamiento.

6 Recomendaciones

Realizar una evaluación energética de los pretratamientos por ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno alcalino teniendo en cuenta sus requerimientos energéticos desde un punto de vista de exergía o metodología de integración energética.

Se recomienda continuar la investigación del uso que se le podría dar a las emisiones que tratadas como productos evitados al medio.

Realizar un análisis técnico-económico (CAPEX y OPEX) al pretratamiento por ácido fosfórico diluido.

Agradecimientos

Agradezco al CRAI de la Universidad Santo Tomas Bucaramanga, quienes fueron un apoyo importante en la minería de datos con el software Vantage Point.

Referencias Bibliográficas

- A. Rezi and M. Allam,. (1995). Techniques in array processing by means of transformations . En *Control and Dynamic Systems Vol. 69* (págs. 133-180). San Diego: Academic Press.
- Aditi Wagle, M. J. (2022). Multi-stage pre-treatment of lignocellulosic biomass for multi-product biorefinery: A review . *Sustainable Energy Technologies and Assessments* .
- Alencar, B. R., Reis, A. L., de Souza, R. d., Morais, M. A., & Menezes, R. S. (2017). Recycling the liquid fraction of alkaline hydrogen peroxide in the pretreatment of corn stover. *Bioresource Technology*, 928 - 935.
- Alvarez-Vasco C, Z. X. (2014). Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of softwood: hemicellulose degradation pathways. *Bioresource Technology*, 150, 321/327.
- American Psychological Association. (s.f.). *Style and Grammar Guidelines*. Recuperado el 17 de enero de 2020, de Apastyle: <https://apastyle.apa.org/style-grammar-guidelines>
- Andrade Juan Manuel, R. P. (2017). Vigilancia tecnológica del sector agroindustrial. *ENTORNOS*, 30(2), 20-27.
- Angélica María Vele Salto, ,. M. (2021). Application of Ionic Liquids in Acid Hydrolysis of Lignocellulosic Material to Obtain Sugars. 10.
- Banerjee G, C. S. (2012). Scale-up and integration of alkaline hydrogen peroxide pretreatment, enzymatic hydrolysis, and ethanolic fermentation. *Biotechnol Bioeng*, 922-931.
- Barahona, P. (2018). *Etanol celulósico: Desarrollo de una tecnología óptima para la producción semi-continua*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Valladolid]: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/39472>.
- Bassante, J. C. (2018). *Evaluación de diferentes pretratamientos químicos a la biomasa de la cáscara de cacao para procesos de fermentación alcohólica*. Quito-Ecuador, Ecuador.

- Becerra, Ana, B. A. (2016). Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia.
- Broda, M., Yelle, D. J., & Serwańska, K. (2022). Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass—Challenges and Solutions. *Molecules*, 27.
- C.A. Cardona, J. Q. (2010). Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. *Bioresource Technology*.
- Cabrera E, M. M. (2014). Alkaline and alkaline peroxide pretreatments at mild temperature to enhance enzymatic hydrolysis of rice hulls and straw. *Bioresour Technol*, 1-7.
- Cabrera E, M. M. (2014). Alkaline and alkaline peroxide pretreatments at mild temperature to enhance enzymatic hydrolysis of rice hulls and straw. *Bioresource Technology*, 167, 1/7.
- Castellanos, O. (2011). *Análisis de tendencia: de la información hacia la innovación*. Bogotá-Colombia.
- Castillo, E. (2016). Producción de etanol celulósico a partir de las tusas de palma: perspectiva de Ecopetrol.
- Chambon, C. L. (2018). Pretreatment of South African sugarcane bagasse using a low-cost protic ionic liquid: a comparison of whole, depithed, fibrous and pith bagasse fractions. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 15.
- CRAI USTA Bucaramanga. (2020). *Informe de recursos y servicios bibliográficos*. Bucaramanga: Universidad Santo Tomás.
- Das, N., Jena, P., Padhi, D., Kumar Mohanty, M., & Sahoo, G. A. (2021). Comprehensive Review of Characterization, Pretreatment and Its Applications on Different Lignocellulosic Biomass for Bioethanol Production. *Biomass Conv. Bioref*, 1-25.

- Dias , M., Junquera, T., Rosell, C. E., Filho , R. M., & Bonomi , A. (2013). Evaluation Configuration for second generation integred with first generation bioethanol production from surcane . *Fuel Procesing Technology*, 3.
- Dutra, E., Santos, F., Alencar, B., Reis, A., de Fatima Rodrigues de Souza, R., & da Silva Aquino, K. (2018). Alkaline Hydrogen Peroxide Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: Status and Perspectives. *Biomass Conv. Bioref.*, 225–234.
- Erico M.M. Flores, G. C. (2021). Ultrasound-assisted biomass valorization to industrial interesting products: state-of-the-art, perspectives and challenges. *Ultrasonics Sonochemistry*, 72, 105455. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105455>.
- Espinosa, A., López, L., & Casdelo, N. (2021). PRETRATAMIENTO DE BIOMASAS LIGNOCELULÓSICAS: BREVE REVISIÓN DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS UTILIZADOS. *Centro Azúcar*, 48(3), 108-119. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n3/2223-4861-caz-48-03-108.pdf>.
- Fernanda LeitãoVaz, J. R. (2021). Chemical pretreatment of sugarcane bagasse with liquid fraction recycling. *Renewable Energy*.
- Floriane, B. C. (2015). Líquidos Iónicos: Métodos de Síntesis y Aplicaciones. *Conciencia Tecnológica*, (49), 52-56. <https://www.redalyc.org/pdf/944/94438997007.pdf>.
- Fontecha, L. (2011). *Evaluación de los pretratamientos con ácido sulfúrico diluido y AFEX en la biomasa lignocelulósica del tipo pasto gigante “Pennisetum Sp”*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7781>.
- Forero, S. J. (2017). Evaluación del desempeño del pretratamiento con peróxido de hidrógeno sobre mezclas de biomosas lignocelulosicas (bagazo de caña panelera y hojarasca). *ITECKNE*, 16(1), 21 - 28. <https://doi.org/10.15332/.v16i1.2158>.

Fortalecimiento de la capacidad en Energía Renovable para América Central. (2002). Manuales sobre energía renovable Biomasa.

Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. (2014). *Guía sobre declaración ambiental de producto y cálculo de huella de carbono*. Madrid-España.

Furkan H. Isikgora, C. R. (2015). Lignocellulosic Biomass: A Sustainable Platform for Production of Bio-Based Chemicals and Polymers.

G. Ramadoss, K. M. (2016). Mechanistic study on ultrasound assisted pretreatment of sugarcane bagasse using metal salt with hydrogen peroxide for bioethanol production, *Ultrason. Sonochem.* 28.

G. Ramadoss, K. M. (2016). Mechanistic study on ultrasound assisted pretreatment of sugarcane bagasse using metal salt with hydrogen peroxide for bioethanol production, *Ultrason. Sonochem.*

G. Ramadoss, K. M. (2016). Ultrasound assisted metal chloride treatment of sugarcane bagasse for bioethanol production, *Renewable Energy*.

Gheewala SH, D. B. (2013). Biofuels: economic, environmental and social benefits and costs for developing countries in Asia. *Wiley Interdiscip Rev Clim Change*, 497/511.

Goutami Banerjee, S. C. (2012). Scale-up and integration of alkaline hydrogen peroxide pretreatment, enzymatic hydrolysis, and ethanolic fermentation. *Biotechnology & Bioengineering*.

Guilherme A A, D. P. (2015). Evaluation of composition, characterization and enzymatic hydrolysis of pretreated sugar cane bagasse. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32 (1), 23-33. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150321s00003146>.

- Guillén, V. Y. (2014). *Modelado de la Fermentación de Hidrolizados de Bagazo de Caña de Azúcar por S. Cerevisae para la Producción de Bioetanol en un Biorreactor Minifors*. [Tesis de grado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas]: <https://dspace.uclv.edu.cu/server/api/core/bitstreams/ed745980-6f48-4f43-b930-b7b08a20d111/content>.
- Hasanov, M., & Kikas, T. (2020). The Role of Ionic Liquids in the Lignin Separation from Lignocellulosic Biomass. *Renewable Energy Solutions for Baltic-Nordic Region 2020*.
- Herrera, I., de la Rúa, C., & Lechón, Y. (2015). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN LA PLANTA DE BELLA UNIÓN DE LA EMPRESA ALCOHOLES DEL URUGUAY (ALUR)*. Bella Union-Uruguay: Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos-CIEMAT.
- Hongdan , Z., Shihang, H., Weiqi , W., Jiajie , Z., & Jun , X. (2019). Investigation of alkaline hydrogen peroxide pretreatment and Tween 80 to enhance enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse. *Biotechnology for Biofuels*, 3.
- INCONTEC. (2007). *Norma Técnica colombiana NTC-ISO 14040*.
- Ja Kyong Ko, J. H.-M. (2018). Largely enhanced bioethanol production through the combined use of lignin-modified sugarcane and xylose fermenting yeast strain. *Bioresour Technol.*, 256:312-320. doi: 10.1016/j.biortech.2018.01.123.
- Krishnan, M., & Blanco, M. (2000). Ethanol production from glucose and xylose by immobilized *Zymomonas mobilis* CP4(pZB5). *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 525-541.

- Leitão, F., da Rocha Lins, J., Ribeiro Alves, B., & Barbosa Silva, Í. (2021). Pretratamiento químico del bagazo de caña de azúcar con reciclaje de fracción líquida. *Energia Renovable*, 666-673.
- Madeleine J. Bussemaker, K. D. (2017). Supply Chain Optimisation for an Ultrasound-Organosolv Lignocellulosic Biorefinery: Impact of Technology Choices. *Waste Biomass Valor* , 8:2247–2261. DOI 10.1007/s12649-017-0043-6.
- Manali Kapoor, S. S. (2017). Pilot scale dilute acid pretreatment of rice straw and fermentable sugar recovery at high solid loadings. *Bioresource Technology*, 224, 688-693. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.032>.
- Miao, L. L. (November 8-12). A specification based approach to testing polymorphic attributes. *Formal Methods and Software Engineering: Proceedings of the 6th International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2004*. Seattle, WA, USA,.
- Montiel Rivas , J. L. (2017). *Diseño y simulación del proceso de obtención de etanol a partir de bagazo de caña*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]: <https://core.ac.uk/download/pdf/269023066.pdf>.
- Morales, H. (2014). *Producción de Bioetanol a Partir de Material Lignocelulósico de Moringa Oleífera*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]: https://redcol.minciencias.gov.co/vufind/Record/UNACIONAL_508996ad19d054dae5161732737f9cd5.
- Mun Chun Ho, V. Z. (2019). Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization – A review. *ELSEVIER-Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75-86.

- Mun Chun Ho, V. Z. (2019). Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11.
- Mun ChunHo, V. Z. (2019). Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization – A review.
- N. Sarkar, S. G. (2012). Producción de bioetanol a partir de residuos agrícolas: una visión general. *Renovar.Energia*, 37, 19-27.
- NVSN Murthy Konda, J. S.-M. (2014). Understanding cost drivers and economic potential of two variants of ionic liquid pretreatment for cellulosic biofuel production. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 7.
- O.M. Perrone, F. C. (2016). Ozonolysis combined with ultrasound as a pretreatment of sugarcane bagasse Effect on the enzymatic saccharification and the physical and chemical characteristics of the substrate.
- Oluwakemi , M., Scott M., D., & Hancock, J. (2015). Development of an estimation model for the evaluation of the energy requirement og dilute acid pretreatments of biomass. *Biomass and Bioenergy*, 72, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.11.024>.
- Omar Alberto Ávila Rojas, J. A. (2010). *Analisis de ciclo de vida e integración del proceso de producción de bioetanol de segunda generación a partir de bagazo de caña*. Bucaramanga-Santander.
- ORIANA, S., & ZIOMARA, G. (2013). *Evaluación de Pretratamiento con líquidos iónicos Próticos para la producción de Bioetanol de segunda generación*. [Tesis de grado, Universidad de Chile]:

https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/113670/cfcortes_ts.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Pablo Silva Ortiz, S. d. (2014). Exergy analysis of pretreatment Processes of bioethanol production based on sugarcane bagasse.

Perez-Pimienta et al. (2016). Evaluation of agave bagasse recalcitrance using AFEX™, autohydrolysis, and ionic liquid pretreatments. *Bioresour Technol.*, 211, 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.103>.

Priyanka Nath, P. D. (2021). Sequential pretreatment of sugarcane bagasse by alkali and organosolv for improved delignification and cellulose saccharification by chimera and cellobiohydrolase for bioethanol production. *King Abdulaziz City for Science and Technology 2021*, 11(2):59. doi: 10.1007/s13205-020-02600-y.

R. Sindhu, P. B. (2017). Development of a novel ultrasound-assisted alkali pretreatment strategy for the production of bioethanol and xylanases from chili post harvest residue.

R. Velmurugan, K. M. (2011). Utilization of sugarcane bagasse for bioethanol production: Sono-assisted acid hydrolysis approach. *Bioresour. Technol.* 102.

Rabelo, S., Amezquita Fonseca, N., Andrade, R., Maciel Filho, R., & Costa, A. (2011). Ethanol production from enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse pretreated with lime and alkaline hydrogen peroxide. *biomass and bioenergy* 35 (2 0 1 1) 2600 y 2607, 2-3.

Rajendran K, D. E. (2018). Updates on the pretreatment of lignocellulosic feedstocks for bioenergy production—a review. *Biomass Convers Biorefin* 2, 471–483.

Resano, D., Guillen, O. W., Ubillús, F. D., & Barranzuela, J. L. (2022). Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción. *Inf. tecnol. vol.33 no.2 La Serena abr. 2022*.

- Rick van Rijn, I. U. (2018). Techno-Economic Evaluation of Cellulosic Ethanol Production Based on Pilot Biorefinery Data: a Case Study of Sweet Sorghum Bagasse Processed via L+SScF. *Bioenerg. Res.* 11, 414–425 .
- Robert Wooley, M. R. (1999). Process Design and Costing of Bioethanol Technology: A Tool for Determining the Status and Direction of Research and Development.
- Rosa Silvia. (2015). *Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos*. Madrid-España.
- Roy, R., Rahman Sajjadur , M., & Raynie, D. E. (2020). Recent advances of greener pretreatment technologies of lignocellulose. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 6.
- S. Behera, R. A. (2014). Importancia del pretratamiento químico para la bioconversión de biomasa lignocelulósica. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91-106.
- S. Niju, M. S. (2019). Delignification of sugarcane bagasse using pretreatment strategies for bioethanol production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*.
- ScienceDirect. (2014). *Guía rápida de referencia*.
- Scopus. (s.f.). *Scopus-Guia de Referencia*. Elsevier.
- SENDELIUS, J. (2005). *Steam Pretreatment Optimisation for Sugarcane Bagasse in Bioethanol*.
[MSc thesis ER, JOUR AU :
[researchgate.net/publication/267793274_Steam_Pretreatment_Optimisation_for_Sugarcane_Bagasse_in_Bioethanol_Production/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/267793274_Steam_Pretreatment_Optimisation_for_Sugarcane_Bagasse_in_Bioethanol_Production/citation/download).
- Shady, S., Gwilym, W., & Amit, J. (2018). Emerging Technologies for the Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *School of Culinary Arts and Food Technology*.
- Shahabaldin Rezania, B. O. (2020). Different pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for. *Energy* 199.

- Shiyu Pan, H. M. (2022). Technoeconomic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: Current status, challenges and future outlook. *Industrial Crops & Products*, 188(15), 115684. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115684>.
- Silva, A., Giuliano, A., Errico, M., Rong, B., & Barletta, D. (2019). Economic value and environmental impact analysis of lignocellulosic ethanol production: assessment of different pretreatment processes. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 637–654. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-018-01663-z>.
- Simmons, B. (2020). Enhanced softwood cellulose accessibility by H₃PO₄ pretreatment: high sugar yield without compromising lignin. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.
- Sole, A. C. (2006). *Instrumentación Industrial*. Mexico: Alfaomega.
- Stefania Costa, I. R. (2018). Lignin Degradation Efficiency of Chemical Pre-Treatments on Banana Rachis Destined to Bioethanol Production. *Biomolecules*.
- Stoklosa RJ, d. P. (2017). Techno-economic comparison of centralized versus decentralized biorefineries for two alkaline pretreatment processes. *Bioresource Technology*, 9-17.
- Suárez Forero, S. J., Candela Soto, A. M., Henao Martínez, J. A., & Bayona Ayala, O. L. (2019). Evaluación del desempeño del pretratamiento con peróxido de hidrógeno sobre bagazo de caña de azúcar para remoción de lignina. *ITECKNE*, 15(1), 21 - 28. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v16i1.2158>.
- Superintendencia de Industria y Comercio. (2013). BIOETANOL-Biotecnología Aplicada.
- Universidad de Guanajuato. (2022). Evaluación de pretratamientos para la obtención de bioetanol a partir de residuos de brócoli. 8.
- UPME. (2014-2016). *Fundamentos para el desarrollo de una política nacional de Bioenergía*. bogota.

UPME. (2018). Fundamentos para el desarrollo de una política nacional de bioenergía. *UPME*, 66.

Victor Zhenquan Ong, T. Y. (2020). An application of ultrasonication in lignocellulosic biomass valorisation into bio-energy and bio-based products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 109924. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109924>.

Victor Zhenquan Ong, T. Y. (2020). An application of ultrasonication in lignocellulosic biomass valorisation into bio-energy and bio-based products .

Viñals Verde, B.-G. M.-Á. (2013). sobre los derivados de la caña de azúcar. *ICIDCA*, pp. 26 - 37.

Wigner, E. P. (2005). Theory of traveling wave optical laser . *Phys. Rev.*, 134, A635-A646.

Wooley, R. J., & Putsche, V. (1996). evelopment of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuels Components.

WOOLEY, R., & PUTSCHE, V. (1996). Development of an ASPEN PLUS physical property database for biofuels components. *National Renewable Energy Laboratory*, 1-38.

Xiaoqi Lin, K. J. (01 de Agosto de 2022). Review on development of ionic liquids in lignocellulosic biomass refining. *Journal of Molecular Liquids*, 12.

Yafetto, L. (2022). Application of solid-state fermentation by microbial biotechnology for bioprocessing of agro-industrial wastes from 1970 to 2020: A review and bibliometric analysis. *Heliyon*, 3-7.

Yang Huang, Q. C. (2021). Carbocation scavenger assisted acid pretreatment followed by mild alkaline hydrogen peroxide (AHP) treatment for efficient production of fermentable sugars and lignin adsorbents from hardwood biomass. *Industrial Crops & Products* .

Yapeng, S., Ruoyu, D., Hong, G., Ming, C., & Qinfeng, W. (2015). Fractional pretreatment of lignocellulose by alkaline hydrogen peroxide: Characterization of its major components. *Food and Bioproducts Processing*, 94:322–330. doi:10.1016/j.fbp.2014.04.001.

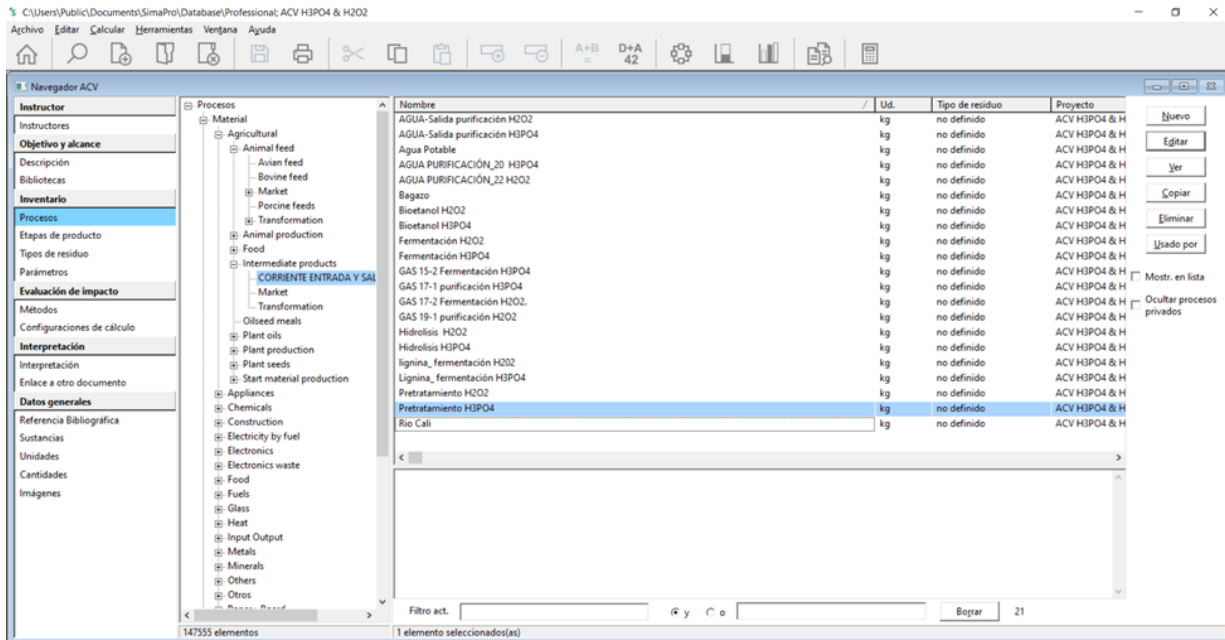
Zeba Usmani, e. a. (2020). Ionic liquid based pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced bioconversion. *Bioresource Technology*.

Zhang*, M. J. (2013). Effect of Ultrasound on Lignocellulosic Biomass as a Pretreatment for Biorefinery and Biofuel Applications.

Zilda Miguel Gomes-da Silva, L. G.-C.-J.-R.-S. (2022). *ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA*.

Apéndices

Apéndice A. Hojas de procesos creadas en SIMAPRO para los pretratamientos; ácido fosfórico y peróxido de hidrógeno



Nota. Obtenido de SIMAPRO 9.3.0.3