

**APROVECHAMIENTO DE LA CAÑA PANELERA DEL MUNICIPIO DE SANDONÁ (NARIÑO), EN LA PRODUCCIÓN CONJUNTA DE BIOETANOL DE PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN EN UN PROCESO DE SACARIFICACIÓN Y FERMENTACIÓN SIMULTANEO SSF, ACOMPAÑADA DE PRODUCTOS DE ALTO VALOR
(Resumen Analítico)**

***USE OF SUGARCANE FROM THE MUNICIPALITY OF SANDONÁ (NARIÑO), IN THE JOINT PRODUCTION OF FIRST AND SECOND GENERATION BIOETHANOL IN A SIMULTANEOUS SACCHARIFICATION AND FERMENTATION PROCESS SSF, ACCOMPANIED BY HIGH VALUE PRODUCTS.
(Analytical Summary)***

Autores (*Authors*): ERASO VALENCIA Hevelin Dayana, FAJARDO MARTINEZ Jose Andres

Facultad (*Faculty*): INGENIERÍA

Programa (*Program*): INGENIERÍA DE PROCESOS

Asesor (*Support*): MSC. IVÁN ALEXANDER ORTIZ CABRERA

Fecha de terminación del estudio (*End of the research*): MAYO 2024

Modalidad de Investigación (*Kind of research*): INVESTIGACIÓN

PALABRAS CLAVE

BAGAZO DE CAÑA.
PRETRATAMIENTO.
SSF.
BIOETANOL.
FURFURAL.

KEY WORDS

CANE BAGASSE.
PRETREATMENT.
SSF.
BIOETHANOL.
FURFURAL.

RESUMEN: El bioetanol es uno de los principales biocombustibles mencionados a ser protagonista en el nuevo sistema energético sostenible, ofreciendo ventajas sociales, económicas y ambientales sobre los combustibles fósiles, al ser una

fuelle renovable de energíaa. Su produccióon a partir de biomasa lignocelulósica requiere pretratamientos para aumentar la accesibilidad enzimática al romper parcialmente la hemicelulosa y lignina, hidrólisis enzimática de la celulosa en azúcares fermentables seguida de su fermentación a etanol o síntesis catalítica con el fin de elevar rendimientos de producción. El estudio describe un método integrado que utiliza una mezcla de bagazo de caña y jugo de caña para producir bioetanol de 1G y 2G por medio de la sacarificación y fermentación simultánea (SSF), además, aprovecha eficazmente el residuo rico en hemicelulosa del pretratamiento para producir furfural como un valioso subproducto, maximizando el uso de la biomasa en una estrategia prometedora para un sistema energético más sostenible. Las condiciones óptimas se dieron en el pretratamiento con NaOH a condiciones de 0,50 M, 90,15 °C y 2,07 h, alcanzando 0,14 g de lignina solubilizada y un costo de 240,94 COP/gLS, con un coeficiente de correlación ajustado (R2aj) del 98% para la lignina solubilizada por gramo de biomasa y de 85% del costo del reactivo en pesos colombianos por gramo de lignina solubilizado, La producción de bioetanol utilizando un sistema SSF se hizo con toma de muestras de producción de etanol cada 6 h con una relación S/L 18 g residuo de pretratamiento: 95 mL jugo de caña, pH 4,5, fermentado con levaduras *Saccharomyces cerevisiae* y sacarificado con enzimas celulasa con condiciones de 34°C, 120 rpm, 120 h; con un agotamiento casi total de la glucosa. La producción de bioetanol de 1G a partir de jugo de caña, alcanzó su máxima producción a las 42 h con una cantidad de 46,12 g/L (4,61% p/v) y un rendimiento de 73,38% basado en la cantidad de glucosa total producida. Por otro lado, la mayor cantidad de glucosa se produce a las 24 horas alcanzando 128,77 g/L. La producción de bioetanol de 1G y 2G, alcanzó su producción máxima a las 84 h con una cantidad de 51,60 g/L (5,16% p/v) y un rendimiento del 69,51% basado en la cantidad de glucosa total producida. Por otro lado, la mayor cantidad de glucosa se produce a las 48 h alcanzando 162,72 g/L. La SSF desempeñó un papel considerable en la optimización del proceso. La producción de bioetanol 2G generó un incremento de 5,48 g/L comparado con el bioetanol 1G, elevando la producción en un 11,88 %. Por otro lado, la corriente líquida del pretratamiento permitió la producción de furfural, lo que aportó beneficios para el aprovechamiento de hemicelulosas presentes, por su parte, se obtuvo que a 170 °C el rendimiento p/p fue de 35,8 (55,94 %mol) con el mayor rendimiento alcanzado.

ABSTRACT: *Bioethanol is one of the main biofuels mentioned to be a protagonist in the new sustainable energy system, offering social, economic and environmental advantages over fossil fuels, as it is a renewable source of energy. Its production from lignocellulosic biomass requires pretreatments to increase enzymatic accessibility by partially breaking down hemicellulose and lignin, enzymatic hydrolysis of cellulose into fermentable sugars followed by fermentation to ethanol or catalytic synthesis in order to increase production yields. The study describes an integrated method that utilizes a mixture of sugarcane bagasse and sugarcane juice to produce 1G and 2G bioethanol by simultaneous saccharification and*

*fermentation (SSF), and effectively utilizes the hemicellulose-rich residue from pretreatment to produce furfural as a valuable by-product, maximizing the use of biomass in a promising strategy for a more sustainable energy system. Optimal conditions were in NaOH pretreatment at 0,50 M, 90,15 °C and 2,07 h, achieving 0,14 g of solubilized lignin and a cost of 240,94 COP/gLS, with an adjusted correlation coefficient (R²_{aj}) of 98% for solubilized lignin per gram of biomass and 85% of the cost of the reagent in Colombian pesos per gram of solubilized lignin. Bioethanol production using an SSF system was done with ethanol production sampling every 6 h with an S/L ratio of 18 g pretreatment residue: 95 mL sugarcane juice, pH 4,5, fermented with *Saccharomyces cerevisiae* yeast and saccharified with cellulase enzymes at 34°C, 120 rpm, 120 h; with almost total glucose depletion. The production of 1G bioethanol from sugarcane juice reached its maximum production at 42 h with an amount of 46,12 g/L (4,61% w/v) and a yield of 73,38% based on the amount of total glucose produced. On the other hand, the highest amount of glucose is produced at 24 hours reaching 128,77 g/L. The production of 1G and 2G bioethanol reached its maximum production at 84 h with an amount of 51,60 g/L (5,16% w/v) and a yield of 69,51% based on the amount of total glucose produced. On the other hand, the highest amount of glucose is produced at 48 h reaching 162,72 g/L. SSF played a considerable role in process optimization. The production of 2G bioethanol generated an increase of 5,48 g/L compared to 1G bioethanol, raising production by 11,88 %. On the other hand, the liquid stream of the pretreatment allowed the production of furfural, which provided benefits for the utilization of hemicelluloses present, while at 170 °C the w/w yield was 35,8 (55,94 %mol) with the highest yield achieved.*

CONCLUSIONES: El bagazo de caña es un material promisorio para el aprovechamiento de sus polisacáridos celulosa y hemicelulosa, por medio de SSF, permiten la producción de bioetanol (2G) con el fin de aumentar su eficiencia y reducir costos de procesamiento. La técnica de cromatografía para la caracterización química de una biomasa resulta ser más detallada, precisa y confiable, siendo esta una técnica altamente selectiva y ofrece una mejor resolución, que una técnica gravimétrica debido a que la composición de la lignina es semejante a los otros polisacáridos. Puesto que no se encontró un método gravimétrico para determinar la lignina soluble en ácido y debido a que los procesos de hidrólisis, extractivos, cenizas y determinación de lignina insoluble (lignina klarson) son similares a los descritos por la NREL, estas cuantificaciones se realizaron como se describen anteriormente por las guías de la NREL. Por otra parte, el pretratamiento con NaOH fue el más efectivo a la hora de solubilizar la lignina, en el caso de producción de lignina las condiciones óptimas se dieron a 0,50 M, 90,15 °C y 2,07 h, alcanzando 0,14 g de lignina solubilizada y un costo de 240,94 COP/gLS con un coeficiente de correlación ajustado (R²_{aj}) del 98% para la lignina solubilizada por gramo de biomasa y de 85% del costo del reactivo en pesos colombianos por gramo de lignina solubilizado, sin embargo, la adición de H₂O₂ en el pretratamiento Mix permitió bajar condiciones en un pretratamiento con NaOH garantizando una buena solubilidad de lignina, reduciendo el costo del

pretratamiento con base en gramo de lignina solubilizada. Las condiciones óptimas en el pretratamiento Mix se dieron a 0,10 M, 76,69 °C y 2,73 h, alcanzando 0,10 g de lignina solubilizada y un costo de 124,05 COP/gLS, con un coeficiente de correlación ajustado (R2aj) del 86% para la lignina solubilizada por gramo de biomasa y de 99% y del costo del reactivo en pesos colombianos por gramo de lignina solubilizado. Para esta investigación es significativo que el pretratamiento (tratamiento químico) además de lograr una alta delignificación también pueda solubilizar hemicelulosas puesto que son la materia prima para la producción de furfural. La SSF desempeñó un papel considerable en la optimización del proceso. La producción de bioetanol 2G fue de 51,60 g/L, generando un incremento de 5,48 g/L comparado con el bioetanol 1G, elevando la producción en un 11,88 %. La corriente líquida del pretratamiento permitió la producción de furfural, lo que aportó beneficios para el aprovechamiento de hemicelulosas presentes, por su parte, se obtuvo que a una temperatura de 160°C el rendimiento p/p fue de 27,84 (43,50 %mol), a 170°C el rendimiento p/p fue de 35,8 (55,94 %mol) y a una temperatura de 180°C el rendimiento p/p fue de 33,57 (54,02 %mol). Siendo a 170°C la producción con mayor rendimiento alcanzado.

CONCLUSIONS: *Sugarcane bagasse is a promising material for the utilization of its polysaccharides cellulose and hemicellulose, by means of SSF, allowing the production of bioethanol (2G) in order to increase its efficiency and reduce processing costs. The chromatography technique for the chemical characterization of a biomass turns out to be more detailed, accurate and reliable, being a highly selective technique and offering better resolution than a gravimetric technique because the composition of lignin is similar to the other polysaccharides. Since no gravimetric method was found to determine acid soluble lignin and because the processes of hydrolysis, extractives, ash and determination of insoluble lignin (klarson lignin) are similar to those described by NREL, these quantifications were performed as previously described by NREL guidelines. On the other hand, NaOH pretreatment was the most effective at solubilizing lignin, in the case of lignin production the optimum conditions were at 0,50 M, 90,15°C and 2,07 h, reaching 0,14 g of solubilized lignin and a cost of 240,94 COP/gLS with an adjusted correlation coefficient (R2aj) of 98% for solubilized lignin per gram of biomass and 85% of the cost of the reagent in Colombian pesos per gram of solubilized lignin, however, the addition of H₂O₂ in the Mix pretreatment allowed lowering conditions in a pretreatment with NaOH, guaranteeing a good lignin solubility, reducing the cost of pretreatment based on gram of solubilized lignin. The optimal conditions in the Mix pretreatment were at 0,10 M, 76,69°C and 2,73 h, reaching 0,10 g of solubilized lignin and a cost of 124,05 COP/gLS, with an adjusted correlation coefficient (R2aj) of 86% for solubilized lignin per gram of biomass and 99% for the cost of the reagent in Colombian pesos per gram of solubilized lignin. For this research it is significant that the pretreatment (chemical treatment) in addition to achieving high delignification can also solubilize hemicelulosas since they are the raw material for the production of furfural. SSF played a considerable role in process optimization. The production of 2G bioethanol was 51,60 g/L, generating*

an increase of 5,48 g/L compared to 1G bioethanol, raising production by 11,88 %. The liquid stream of the pretreatment allowed the production of furfural, which provided benefits for the use of the hemicelluloses present, and at a temperature of 160°C the w/w yield was 27,84 (43,50 %mol), at 170 °C the w/w yield was 35,8 (55,94 %mol) and at a temperature of 180°C the w/w yield was 33,57 (54,02 %mol). At 170°C the production with the highest yield was achieved.

RECOMENDACIONES: Es esencial realizar un estudio profundo de los procesos de pretratamiento, hidrólisis enzimática y fermentación para maximizar el rendimiento de la producción de bioetanol, tanto de primera como de segunda generación. Además, se recomienda evaluar la viabilidad económica y el impacto ambiental de implementar estas tecnologías a escala industrial, considerando factores como disponibilidad de materia prima, costos de inversión y operación. Así mismo, es crucial buscar estrategias para aprovechar integralmente los residuos generados a partir de los flujos líquidos ricos en lignina, como obtener productos de alto valor de las fracciones lignocelulósicas, entre las que se encuentran sustancias fenólicas como vainillina, ácido vainílico, ácido homovanílico, acetosiringona, ácido siríngico, siringaldehído, siringol y similares, como resultado de la degradación de la lignina y hemicelulosa. Por otro lado, se sugiere la implementación de nuevas cepas de levadura genéticamente modificadas capaces de sintetizar glucosa, así como la implementación de enzimas como peptona, β -glucosidasa, entre otras, para elevar la desintegración de celulosa a glucosa y evaluar el efecto de las mismas en elevar rendimientos de producción de bioetanol y estudiar el efecto de nanopartículas capaces de tolerar elevados rendimientos de bioetanol e inhibir la generación de subproductos no deseados. Se recomienda así mismo realizar un análisis económico profundo con la finalidad de determinar la relación S/L para aprovechar la mayor cantidad de biomasa. Se recomienda hacer un diseño experimental en la producción de furfural con valores de temperatura entre 170 °C y 180 °C ya que el rendimiento es muy similar, por lo cual una temperatura optima debería estar en este rango. Finalmente, se sugiere analizar el marco regulatorio actual y proponer políticas públicas que incentivan el desarrollo y adopción de biocombustibles avanzados en el país.

RECOMMENDATIONS: *An in-depth study of the pretreatment, enzymatic hydrolysis and fermentation processes is essential to maximize the yield of bioethanol production, both first and second generation. In addition, it is recommended to evaluate the economic feasibility and environmental impact of implementing these technologies on an industrial scale, considering factors such as raw material availability, investment and operating costs. It is also crucial to seek strategies to take full advantage of the residues generated from lignin-rich liquid flows, such as obtaining high-value products from lignocellulosic fractions, including phenolic substances such as vanillin, vanillic acid, homovanillic acid, acetosyringone, syringic acid, syringaldehyde, syringol and similar substances, as*

a result of the degradation of lignin and hemicellulose. On the other hand, the implementation of new genetically modified yeast strains capable of synthesizing glucose is suggested, as well as the implementation of enzymes such as peptone, β -glucosidase, among others, to increase the disintegration of cellulose to glucose and evaluate their effect on increasing bioethanol production yields and study the effect of nanoparticles capable of tolerating high bioethanol yields and inhibiting the generation of undesired by-products. It is also recommended to carry out an in-depth economic analysis in order to determine the S/L ratio to take advantage of the greatest amount of biomass. It is recommended to carry out an experimental design in the production of furfural with temperature values between 170 °C and 180 °C since the yield is very similar, and therefore an optimum temperature should be in this range. Finally, it is suggested to analyze the current regulatory framework and propose public policies that encourage the development and adoption of advanced biofuels in the country.