

Residuos de yuca y plátano como fuente de azúcares fermentables

Cassava and plantain residues as a source of fermentable sugars

Jesús Adrián Vera Bravo¹, Ronny Adalberto Zambrano Zambrano¹, Wilmer Ponce², Alexandra Córdova Mosquera¹, María Antonieta Riera^{1*}

Resumen

Los residuos de yuca y plátano son biomásas lignocelulósicas, con potencial de revalorización mediante esquemas de biorrefinación basados en procesos fermentativos. La producción de azúcares es la etapa previa al proceso de fermentación, de allí su importancia en estudiarlas. En este trabajo previa caracterización de cáscaras de yuca (CY) y cáscaras de plátano (CP), se realizó un pretratamiento químico, con el fin de evaluar su efectividad en la obtención de azúcares reductores totales (ART). Se planteó un diseño de experimentos factorial 2³, cuyos factores fueron: tipo de hidrólisis (ácida, alcalina), concentración del agente hidrolizante (1, 2% v/v) y tiempo de reacción (30, 60 min). El mayor contenido de ART para la CP fue de 2.35 g/L y se obtuvo al trabajar con 1 % de NaOH. En la CY se alcanzó una concentración de ART de 1.95 g/L al usar H₂SO₄ al 2%. Para ambos residuos, los mejores resultados se encontraron con un tiempo de reacción de 60 minutos. A través del ANOVA se conoció que los factores por sí solos, no ejercen influencia significativa sobre la producción de ART, aunque se demostró que existe interacción entre estos. La relación que existe entre los métodos de pretratamiento empleados en la producción de ART, es un paso preliminar a procesos fermentativos a través de los cuales es posible obtener una variedad de bioproductos vía biotecnológica.

Palabras Clave: Biomasa lignocelulósica, hidrólisis química, residuos agrícolas

Abstract

Cassava and banana residues are lignocellulosic biomass, with potential for revaluation through biorefining schemes based on fermentative processes. The production of sugars is the stage prior to the fermentation process, hence its importance in studying them. In this research, previous characterization of cassava peels (CY) and banana peels (CP), a chemical pretreatment was carried out, in order to evaluate its effectiveness in obtaining total reducing sugars (ART). A 2³ factorial design of experiments was proposed, whose factors were: type of hydrolysis (acid, alkaline), concentration of the hydrolyzing agent (1.2% v/v) and reaction time (30, 60 min). The highest ART content for the CP was 2.35 g/L and was obtained by working with 1% NaOH. In CY, an ART concentration of 1.95 g/L was reached when using 2% H₂SO₄. For both residues, the best results were found with a reaction time of 60 minutes. Through the ANOVA it was known that the factors by themselves do not exert a significant influence on the production of ART, although it was shown that there is an interaction between them. The relationship that exists between the pretreatment methods used in the production of ART, is a preliminary step to fermentative processes through which it is possible to obtain a variety of bioproducts via biotechnology.

Keywords: Lignocellulosic biomass, chemical hydrolysis, agricultural waste.

Recepción: 09-Enero-2023

Aceptación: 05-Junio-2023

¹Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador

^{1,*}Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. Dirección electrónica: maria.riera@utm.edu.ec

² Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Estación Experimental Portoviejo. Ecuador

1. Introducción

Los residuos agroindustriales son recursos renovables, un tipo de biomasa, disponible en grandes cantidades y rica en polisacáridos. Es una fuente de almacenamiento potencial de azúcares fermentables, aprovechable como materia prima alternativa en procesos biotecnológicos [1, 2, 3]. De acuerdo a su composición, la biomasa puede ser: Lignocelulósica, rica en azúcar, almidón, aceite y proteína. Según su origen, puede clasificarse en: agrícola, forestal, acuática, subproductos, residuos y desechos. En este último punto se encuentran los subproductos agrícolas o residuos de cultivos, que se generan en la producción, cosecha y procesamiento de productos agrícolas, tales como paja y cáscaras de cereales o frutas, además de los subproductos animales de la ganadería [4].

Las características fisicoquímicas de estos, indican su potencial de uso para la generación de energía mediante la combustión de la biomasa, producción de vectores energéticos (biogás, bioetanol, biodiésel, biohidrógeno) o en la obtención de moléculas plataforma para la manufactura de biomateriales, bioquímicos, entre otros [5]. A nivel mundial, se generan anualmente millones de toneladas de residuos agrícolas, cuya disposición y manejo es una preocupación para los entes involucrados. Una estrategia rentable, ecológica y sostenible para la gestión de estos residuos, es su conversión en productos útiles [6].

Ecuador es un país con una economía agrícola, cuyos residuos generados por dicha actividad, pueden ser revalorizados a través de la obtención de nuevos productos. Entre los principales cultivos se registran 38 rubros cultivables, donde se encuentran el plátano y la yuca [7]. El plátano (*Musa paradisiaca*), tiene alto contenido de almidón y material lignocelulósico. La yuca por su parte es uno de los cultivos más importantes para la seguridad alimentaria del país, con algunas aplicaciones en la industria textil, alimentación animal y fabricación de papel. En ambos casos, se genera durante la cosecha biomasa residual (hojas, tallo, etc.) considerada como desecho [8, 9, 10].

La transformación de estos residuos en productos, incluyen procesos de tratamiento previo de tipo físico, químico, biológico o una combinación de estos. La hidrólisis es uno de los pretratamientos que se utiliza para el fraccionamiento de los componentes mayoritarios de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina); con el fin de convertir las cadenas poliméricas en azúcares menos complejas (mono y disacáridos). Dependiendo del agente hidrolizante que se utilice en el pretratamiento, se puede hablar de una hidrólisis ácida, alcalina, con líquido iónico, microondas, ultrasonido, explosión de vapor, agua caliente líquida, a base de amoníaco, biológico y electrohidrólisis [11].

Los resultados de investigaciones previas, muestran el potencial de la hidrólisis para remover la lignina y descomponer la celulosa y hemicelulosa, en azúcares fermentables. Di-

ferentes pretratamientos químicos se aplicaron en hojas y tallos de yuca, para evaluar su incidencia en la producción de azúcares reductores totales durante una posterior etapa de hidrólisis enzimática [12]. De manera similar, se han evaluado tres pretratamientos (mecánico, mecánico-químico y mecánico-térmico) en residuos del plátano, para la obtención de jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática. Independientemente del tipo de pretratamiento que se aplique, se reportan incrementos en la concentración de azúcares alcanzando hasta 5,91 g/L y 3,7 g/L de glucosa para los residuos del banano y yuca, respectivamente [12, 13].

El interés actual existente en el uso de biomásas para brindar una solución ambiental, a la vez que se obtienen productos con valor agregado, motivó la realización de esta investigación. Es por ello, que su propósito fue el de evaluar métodos de pretratamiento químico en residuos de cáscara de yuca y plátano para la extracción de azúcares fermentables, las cuales son moléculas plataforma para los procesos de biorrefinación. Este trabajo servirá para futuras investigaciones, donde se pretenda utilizar la biomasa en esquemas de biorrefinación, para su posterior revalorización.

2. Materiales y métodos

La secuencia experimental que se llevó a cabo en esta investigación, se expone en la figura 1 y se describe a continuación.

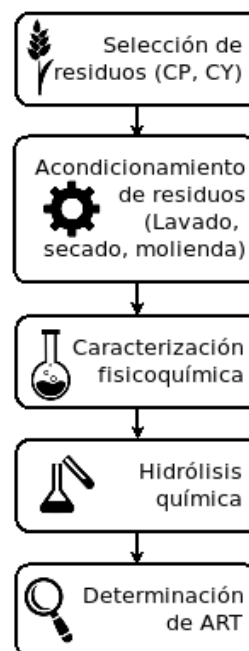


Figura 1: Diagrama de flujo de la secuencia experimental.

2.1. Selección y preparación de los residuos

Las cáscaras de plátano (CP) y yuca (CY), se obtuvieron de los residuos generados en mercados locales, restaurantes y

productores de snacks localizados en el cantón Portoviejo, provincia de Manabí, Ecuador. Estas fueron sometidas a un lavado, secado en estufa marca Memmer durante 48 horas (BP a 50 °C, CP a 60 °C), luego fueron molidas en un molino marca FLAM-MC001 y finalmente tamizadas en un tamiz N° 20.

2.2. Caracterización de los residuos

Los residuos se caracterizaron en cuanto a humedad, cenizas, celulosa, hemicelulosa, lignina, amilosa y amilopectina. La humedad se determinó por gravimetría, según lo descrito en la norma ASTM D4442-20 [14]. El contenido de cenizas se calculó siguiendo la metodología establecida en la norma TAPPI T-211 [15]. La hemicelulosa se cuantificó de acuerdo a lo señalado en la norma TAPPI T-212 [16].

El contenido de celulosa y lignina Klason se determinó siguiendo lo descrito por Domínguez-Domínguez et al. [17]. Para la celulosa se tomó 1g de muestra, se agregaron 15 mL de CH_3COOH al 80% (w/w) y 1,5 mL de HNO_3 , en agitación durante 20 minutos. Se filtró y se lavó con C_2H_5OH , se secó en una estufa marca Memmer (130°C, 1h) y se pesó. Se introdujo en una mufla marca Termolyne (545 °C, 2h), se enfrió y se pesó. Los resultados se obtuvieron usando equ 1.

$$\%Celulosa = \frac{(PS - PI)}{PM} * 100\% \quad (1)$$

Donde PS, PI y PM son el peso seco, peso incinerado y peso de la muestra respectivamente.

Para determinar la cantidad de lignina se tomó 1 g de muestra, se agregaron 70 mL de solución al 1,25% (w/w) de H_2SO_4 con agitación constante durante 2 horas, se filtró y lavó con agua destilada. Se añadieron 30 mL de H_2SO_4 al 72% (w/w) con agitación constante durante 4 horas. Se filtró y lavó con agua destilada, se secó a 130 °C y se pesó. Finalmente se incineró a 545 °C durante 2 horas. El cálculo se realizó utilizando equ 2

$$\%Lignina = \frac{(PS - PI)}{PM} * 100\% \quad (2)$$

El contenido de amilosa se calculó por espectrofotometría con una longitud de onda de 620 nm, según lo expresando en la Norma ISO 6647-1 [18]. La cantidad de amilopectina, se obtuvo por diferencia porcentual respecto a la amilosa.

2.3. Tratamiento de los residuos

Cada uno de los residuos se sometió a una hidrólisis química, bajo un diseño factorial 2³ (tabla 1). Para la hidrólisis ácida (Ac) se utilizaron soluciones de H_2SO_4 y en el caso de la hidrólisis alcalina (Al) se trabajó con soluciones de NaOH. Se tomaron 2 g de muestra (CP, CY), a la cual se incorporaron 30 mL del reactivo según el tipo de hidrólisis y se dejó

durante el tiempo de reacción establecido, a una temperatura de 75 °C. Posteriormente, se enfrió y se separó por medio de papel filtro CHM de 125 mm. Una vez que se separaron los sólidos del líquido, se cuantificaron los azúcares reductores totales (ART) presentes en la disolución [19].

Tabla 1: Diseño de experimentos.

| Hidrólisis | Concentración (%v/v) | Tiempo de reacción (min) |
|------------|----------------------|--------------------------|
| Ac | 1 | 30 |
| Ac | 1 | 60 |
| Ac | 2 | 30 |
| Ac | 2 | 60 |
| Al | 1 | 30 |
| Al | 1 | 60 |
| Al | 2 | 30 |
| Al | 2 | 60 |

2.4. Determinación de ART

La cantidad de azúcares reductores obtenida luego de la hidrólisis, se determinó a través del método de ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), usando glucosa como patrón [20]. Para la preparación del reactivo, se pesaron 5 g de DNS, 150 g de tartrato de Na-K y 8 g de NaOH. El NaOH se disolvió en 200 mL de agua destilada y se añadió en agitación el tartrato de Na-K. Se adicionó agua destilada hasta completar 400 mL y luego se incorporó el ácido 3,5 dinitrosalicílico. Se dejó en agitación durante 8 horas, se enrasó a 500 mL y se filtró. La curva estándar de glucosa se construyó tomando soluciones de 0.4 - 1.6 g/L, a las cuales se les aplicó el método DNS. Luego se llevaron al espectrofotómetro y se leyó la absorbancia respectiva, a una longitud de onda 540 nm.

Para medir la concentración de ART, se tomó 0,5 mL de la muestra del residuo hidrolizado y se adicionó 0,5 mL del reactivo DNS. Luego se agitó y se llevó a ebullición durante 5 minutos. Se enfrió a temperatura ambiente y se añadió 5 mL de agua destilada, manteniendo la agitación. Se leyó la absorbancia en el espectrofotómetro con una longitud de onda de 540 nm.

2.5. Análisis estadístico

Cada una de las experimentaciones llevadas a cabo en la investigación se realizaron por triplicado. Los resultados de la caracterización de los residuos fueron sometidos a un análisis estadístico descriptivo (media, desviación estándar). Asimismo se realizó un ANOVA, para determinar la incidencia que tienen los factores evaluados en la variable respuesta. Tanto el análisis estadístico de los datos como las representaciones gráficas, se realizaron usando el software Rstudio versión 4.1.0.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización de residuos

El valor promedio y la desviación estándar para cada uno de los parámetros evaluados en la caracterización de los residuos (CP y CY), se exponen en la tabla 2.

Tabla 2: Caracterización de los residuos.

| Variable | CP ($\bar{X} \pm \sigma$) | CY ($\bar{X} \pm \sigma$) |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Humedad, % | 13,70 ± 0,56 | 15,67 ± 0,45 |
| Cenizas, % | 9,00 ± 1,41 | 8,67 ± 1,53 |
| Amilosa, % | 17,07 ± 0,25 | 20,60 ± 0,44 |
| Amilopectina, % | 82,93 ± 0,25 | 79,40 ± 0,44 |
| Celulosa, % | 29,00 ± 3,61 | 28,67 ± 1,53 |
| Hemicelulosa, % | 26,67 ± 1,53 | 6,67 ± 2,08 |
| Lignina, % | 19,17 ± 0,68 | 19,75 ± 0,64 |

En trabajos con cáscara de plátano, se reportó una humedad de 26,11 % y cenizas de 12,68 %, superior a la encontrado en esta investigación [21, 22]. En estudios con la cáscara de yuca, registraron un contenido de humedad entre 11-12 % y 0,20-0,40 % de cenizas [23]. Las diferencias entre los valores obtenidos, podrían atribuirse a las características edafoclimáticas y al tipo del manejo de los cultivos [24], así como a las variaciones meteorológicas y climáticas estacionales, del lugar de procedencia[25].

Para el contenido de amilosa se registran valores de 22,65-29,31 % para la amilosa de la cáscara de plátano [26]. Por su parte, para la cáscara de yuca se registra entre 16,39-21,61 % de amilosa y 78,39-83,61 % de amilopectina [27, 28]. El contenido de amilosa afecta las propiedades funcionales del almidón, y una modificación de este puede conducir a características deseadas para determinados productos como mayor cristalinidad, solubilidad, viscosidad, poder de hinchamiento, formación de geles fuertes y resistentes al cizallamiento [27, 29].

Respecto al contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, se reportan valores de 19,33-20,90 %, 7,92-11,43 % y 18,11-21,12 % para la cáscara de plátano [30, 31] y de 11,80-43,63 %, 10,38-38,80 % y 7,20-7,65 % para la cáscara de yuca respectivamente [32, 33, 34]. La biomasa lignocelulósica está compuesta principalmente de dos polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) y lignina. La celulosa y la hemicelulosa se convierten en azúcares fermentables a partir de la transformación de la hexosa (glucosa, galactosa, etc.) y la pentosa (xilosa, arabinosa, etc.) [35]. Por ello, se espera que mientras mayor sea el contenido de celulosa y hemicelulosa en la biomasa residual, mayor sea la cantidad de azúcares fermentables que se obtengan en la hidrólisis.

3.2. Cuantificación de los ART

Para cada tratamiento aplicado a los residuos, se determinó la concentración de los azúcares reductores. La curva patrón

de glucosa que se utilizó, se presenta en la figura 1. Así mismo, los resultados de ART para los hidrolizados de los residuos se presentan a continuación en las figuras 3 y 4.

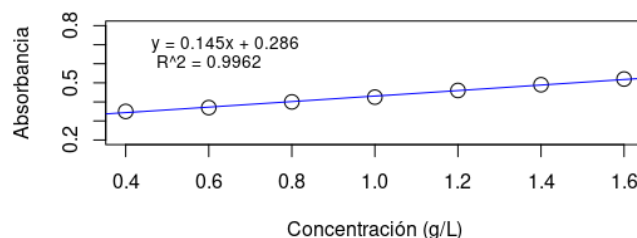


Figura 2: Curva patrón de glucosa.

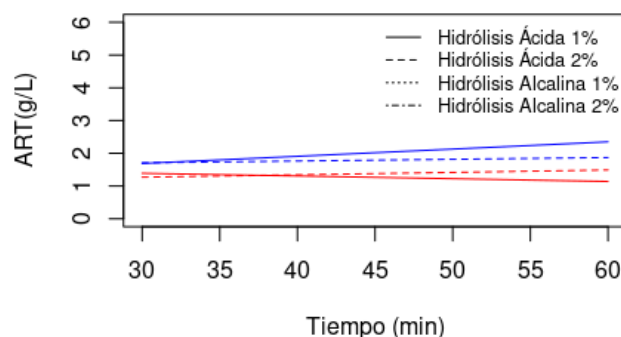


Figura 3: Concentración de ART (g/L) Vs. tiempo de reacción para CP.

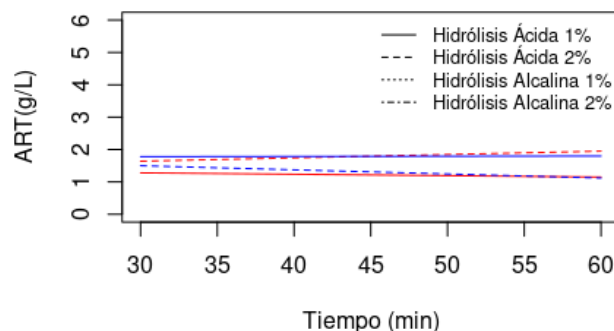


Figura 4: Concentración de ART (g/L) Vs. tiempo de reacción para CY.

La mayor concentración de ART en la hidrólisis ácida fue de 1,49 ± 0,06 g/L para la cáscara de plátano y de 1,95 ± 0,08 g/L para la cáscara de yuca, la cual se obtuvo al utilizar una concentración de 2 % de H₂SO₄. En lo referente al tratamiento alcalino, la máxima cuantificación de ART se obtuvo al emplear 1 % de NaOH, alcanzando concentraciones de 2,35 ± 0,06 g/L y 1,80 ± 0,07 g/L, para la cáscara de plátano y cáscara de yuca. En ambos casos, los mejores resultados se registraron con tiempo de reacción de 60 minutos.

En una investigación similar, se obtuvo una concentración de azúcares reductores de 1.93 g/L y 1.98 g/L para el almidón

de cáscara de banano y cáscara de yuca respectivamente, al realizar una hidrólisis enzimática [28]. Una concentración de 3.09 g/L, mayor a la reportada en esta investigación, se obtuvo para la cáscara de yuca mediante la combinación de hidrólisis térmica e hidrólisis enzimática [36]. Del mismo modo, se registró una concentración de 5.70 g/L de azúcares reductores en cáscara de plátano, al emplear un método de hidrólisis enzimática con la enzima celulosa y un tiempo de reacción de 4 horas [30].

La menor producción de ART, puede asociarse con la menor deslignificación de la biomasa. Estudios previos demuestran, que una dosis química más alta del reactivo usado en la hidrólisis, aumenta los contenidos de ART. Una situación similar sucede con el tiempo de reacción, puesto que al extender el tiempo de residencia de 30 a 60 minutos se notó un incremento considerable en la concentración de azúcares reductores [35].

Altas concentraciones de ART favorecen el proceso de fermentación alcohólica para la producción de vino blanco, así como la fermentación láctica para la obtención de ácido láctico [37, 38]. El azúcar de segunda generación es el componente principal de las biorrefinerías que producen de manera sostenible [39]. Su producción es el paso previo a la fermentación, con la cual es posible obtener una variedad de bioproductos y con ello revalorizar la biomasa.

3.3. Análisis estadístico

Se aplicó un ANOVA, para determinar si existían diferencias significativas entre las medias de cada una de las variables consideradas en el diseño de experimentos planteado: T: tipo de hidrólisis, C: concentración (C), tiempo (t) (tablas 3 y 4).

Tabla 3: Resultados del ANOVA para CP.

| Factor | Suma cuadrado | Valor F | p-valor |
|--------|---------------|---------|----------|
| T | 2,048 | 43,212 | 2,1E-6 |
| C | 0,019 | 0,395 | 0,537 |
| t | 0,234 | 4,939 | 0,038 |
| T:C | 0,182 | 20,575 | 3,37E-4 |
| T:t | 0,271 | 30,629 | 4,53E-5 |
| C:t | 3E-4 | 0,038 | 0,848 |
| T:C:t | 0,353 | 39,887 | 1,031E-5 |

Tabla 4: Resultados del ANOVA para CY.

| Factor | Suma cuadrado | Valor F | p-valor |
|--------|---------------|---------|----------|
| T | 0,009 | 0,089 | 0,768 |
| C | 0,020 | 0,192 | 0,666 |
| t | 0,007 | 0,068 | 0,797 |
| T:C | 1,691 | 503,435 | 4,68E-13 |
| T:t | 0,105 | 31,366 | 2,85E-5 |
| C:t | 0,001 | 0,279 | 0,849 |
| T:C:t | 0,267 | 79,416 | 2,111E-8 |

Para los residuos de CP, todos los factores evaluados (excepto

la concentración del reactivo), además de las respectivas interacciones, reportaron un p-valor $\leq 0,05$ indicando su incidencia sobre la producción de los ART. En cuanto a CY, sólo la interacción T:C, T:t y T:C:t, resultó ser significativa sobre la obtención de azúcares. De acuerdo con García y Peralta [40], un mayor tiempo de reacción facilita la liberación de azúcares reductores. Del mismo modo, un tratamiento más intenso sobre el residuo provoca un mayor rompimiento de la estructura lignocelulósica, lo que a su vez favorece la liberación de una mayor cantidad de ART [40].

4. Conclusiones

La hidrólisis química es un procedimiento que se aplica en la deslignificación de la biomasa. Este es un pretratamiento que se emplea en procesos de biorrefinación, donde se extraen azúcares para posteriores procesos de fermentación. Dentro de las condiciones establecidas en esta investigación, se determinó que es posible alcanzar una producción cercana a 2 g/L de ART para cada tipo de residuo. La mayor concentración de azúcares reductores depende del tipo de biomasa utilizada, puesto que los mejores resultados para la cáscara de plátano se obtuvieron con la hidrólisis alcalina, mientras que para la cáscara de yuca se registraron al trabajar con la hidrólisis ácida. Con ambos pretratamientos independientemente del residuo empleado, se alcanzó una mayor producción a los 60 minutos, lo cual indica que la concentración de ART aumenta al incrementar el tiempo de reacción. Aunque se demostró la utilidad de hidrólisis química para obtener azúcares fermentables, según lo consultado bibliográficamente, es posible que dichos resultados se puedan mejorar al emplear hidrólisis enzimática, térmica o una combinación de estos métodos.

Referencias

- [1] D. Chiaramonti, M. Prussi, S. Ferrero, L. Oriani, P. Ottonello, P. Torre y F. Cherchi, "Review of pretreatment processes for lignocellulosic ethanol production, and development of an innovative method", *Biomass and Bioenergy*, vol. 46, pp. 25-35, 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.04.020
- [2] E. Z. Hoşgun y B. Bozan, "Effect of Different Types of Thermochemical Pretreatment on the Enzymatic Hydrolysis and the Composition of Hazelnut Shells", *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, no. 7, pp. 3739-3748, 2020. DOI: 10.1007/s12649-019-00711-z
- [3] K. Przybysz Buzala, H. Kalinowska, P. Przybysz y E. Małachowska, "Conversion of various types of lignocellulosic biomass to fermentable sugars using kraft pulping and enzymatic hydrolysis", *Wood Science and Technology*, vol. 51, no. 4, pp. 873-885, 2017. DOI: 10.1007/s00226-017-0916-7

- [4] J. Sánchez, M. D. Curt, N. Robert, N. y J. Fernández, “Biomass Resources”, in *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy*, C. Lago, N. Caldés and Y. Lechón (Eds.), Elsevier, pp. 25-111, 2019. DOI: 10.1016/B978-0-12-813056-8.00002-9
- [5] Z. A. Zeidabadi, S. Bakhtiari, H. Abbaslou y A. R. Ghanizadeh, “Synthesis, characterization and evaluation of biochar from agricultural waste biomass for use in building materials”, *Construction and Building Materials*, vol. 181, pp. 301-308, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.271
- [6] O. Awogbemi D. V. Kallon, “Pretreatment techniques for agricultural waste”, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 6, 100229, 2022. DOI: 10.1520/D4442-20
- [7] MAGAP. “Cifras agroproductivas”. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas> (accedido el 30/03/2022)
- [8] R. D. Flor Blanco, “Evaluación de la composición de las biomásas residuales de plátano verde (*Musa spp*) y papa (*Solanum tuberosum*) antes y después del proceso de extracción de almidón”, Trabajo de grado, Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador, 2017. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7568>
- [9] A. Haro Velasteguí, A. Borja Arévalo, A. y S. Triviño Bloisse, “Análisis sobre el aprovechamiento de los residuos del plátano, como materia prima para la producción de materiales plásticos biodegradables”, *Dominio de Las Ciencias*, vol. 3, no. 2, 2477-8818, 2017.
- [10] F. Hinostroza, F. M. Cardenas, H. Alvarez y G. Cobefia, “Manual de la yuca”. Ecuador: INIAP Archivo Histórico, 1995.
- [11] G. P. Naik, A. K. Poonia y P. K. Chaudhari, “Pretreatment of lignocellulosic agricultural waste for delignification, rapid hydrolysis, and enhanced biogas production: A review”. *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 98, no. 10, pp. 100147, 2021. DOI: 10.1016/j.jics.2021.100147
- [12] L. Niño López, A. Acosta Cárdenas y R. Gelves Zambrano, “Evaluación de pretratamientos químicos para la hidrólisis enzimática de residuos lignocelulósicos de yuca (*Manihot esculenta Crantz*)”. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, vol. 69, pp. 317-326, 2013.
- [13] H. R. Bonilla, O. Tinoco Gómez y K. Dávila Dávila, “Hidrólisis enzimática de residuos agroindustriales del banano para la obtención de jarabe glucosado aplicando tres pretratamientos”. *Industrial Data*, vol. 18, no. 1, pp. 101-107, 2015.
- [14] *ASTM International*, ASTM D4442-20, Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials, 2020. DOI: 10.1520/D4442-20
- [15] *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, TAPPI T 211 om-16. Ash in Wood, Pulp, Paper and Paperboard: Combustion at 525 Degrees C, 2016.
- [16] *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, TAPPI T 212 om-12. One Percent Sodium Hydroxide Solubility of Wood and Pulp, 2012.
- [17] M. M. Domínguez-Domínguez, A. Álvarez-Castillo, M. Granados-Baeza y F. Henández-Campos, “Estudio de la cinética del pretratamiento e hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar”, *textitRevista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 13, no. 4, pp. 200-211, 2012.
- [18] *International Organization for Standardization*, Norma UNE-EN-ISO 6647-1:2021 Rice- Determination of amylose content -Part 1, 2021.
- [19] L. P. Quintero Mora, Y. Martínez Castilla, J. A. Velasco Mendoza, A. Arévalo Rodríguez, Y. A. Muñoz y N. A. Urbina Suárez, “Evaluación de residuos de papa, yuca y naranja para la producción de etanol en cultivo discontinuo utilizando *Saccharomyces cerevisiae*”, *Revista ION*, vol. 28, pp 43-53, 2015.
- [20] D. Bello-Gil, E. Carrera-Bocourt, Y. Díaz-Maqueira, “Determinación de azúcares reductores totales en jugos mezclados de caña de azúcar utilizando el método de ácido 3,5 dinitrosalicílico”, *Icidca*, vol. 40, pp. 45-50, 2006.
- [21] D. V. Melo Sabogal, Y. Torres Grisales, J. A. Serna Jiménez, L. S. Torres Valenzuela, “Aprovechamiento de pulpa y cáscara de plátano (*musa paradisiaca spp*) para la obtención de maltodextrina”, *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 13, no. 2, pp. 76-85, 2015. DOI: 10.18684/BSAA
- [22] R. Vicente Flores, “Aprovechamiento de la cáscara residual de la *Musa balbisiana* para la obtención de bioplástico en el mercado APECOLIC - Comas - 2018”, Trabajo de grado, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2018. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/24754>
- [23] Y. Sudaryanto, S. B. Hartono, W. Irawaty, H. Hindarso y S. Ismadji, “High surface area activated carbon prepared from cassava peel by chemical activation”, *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 5, pp. 734-739, 2006. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.04.029
- [24] M. Farrell y R. Rivas, “Efecto de las precipitaciones y las características edáficas en el análisis de la separabilidad espectral de girasol, maíz y soja”, *Terra Latinoamericana*, vol. 32, no. 3, 2014.

- [25] R. Kayiwa, H. Kasedde, M. Lubwama y J. B. Kirabira, "The potential for commercial scale production and application of activated carbon from cassava peels in Africa: A review", *Bioresource Technology Reports*, vol. 15, no. 100772, 2021. DOI: 10.1016/j.biteb.2021.100772
- [26] G. J. H. Schmitz, L. Freschi, R. C. Ferrari, F. H. G. Peroni-Okita y B. R. Cordenunsi-Lysenko, "Exploring the significance of photosynthetic activity and carbohydrate metabolism in peel tissues during banana fruit ripening", *Scientia Horticulturae*, vol. 295, no. 110811, 2022. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110811
- [27] P. Fronza, A. L. Costa, A. S. Franca y L. S. de Oliveira, "Extraction and Characterization of Starch from Cassava Peels", *Starch - Starke*, no. 2100245, 2022. DOI: 10.1002/star.202100245
- [28] Y. Román, N. Techeira, J. Yamarte, Y. Ibarra y M. Fasendo, "Caracterización físico-química y funcional de los subproductos obtenidos durante la extracción del almidón de musáceas, raíces y tuérculos", *Interciencia: Revista de Ciencia y Tecnología de América*, vol. 40, no. 5, pp. 350-356, 2015.
- [29] F. Zhu, "Underutilized and unconventional starches: Why should we care?", *Trends in Food Science & Technology*, vol. 100, pp. 363-373, 2020. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.04.018
- [30] R. D. Badaraco Ocaña, "Cinética de sacarificación y fermentación para producción de bioetanol a partir de cáscara de banano maduro mediante pretratamiento de secado", Trabajo de grado, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, 2019. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/14088>
- [31] L. Tejada Benítez, C. Tejada Tovar, W. Marimón Bolívar y Á. Villabona Ortiz, "Estudio de modificación química y física de biomasa (*Citrus sinensis* Y *Musa paradisiaca*) para la adsorción de metales pesados en solución", *Revista Luna Azul*, vol. 39, pp. 124-142, 2014.
- [32] E. Hartulistiyoso, O. Farobie y M. Zaky, "Delignification of Cassava Peel as Bioethanol Raw Material using Combined Alkali and Microwave Heating Methods", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1038, no. (1), pp. 12021, 2022. DOI: 10.1088/1755-1315/1038/1/012021
- [33] A. Mohd Aripin, A. S. Mohd Kassim, Z. Daud y M. Z. Mohd Hatta, "Cassava Peels for Alternative Fibre in Pulp and Paper Industry: Chemical Properties and Morphology Characterization", *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 5, no. 1, 2013.
- [34] J. G. Reales, H. I. Castaño y J. E. Zapata, "Evaluación de tres métodos de pretratamiento químico sobre la deslignificación de tallos de yuca", *Información Tecnológica*, vol. 27, no. 3, pp. 11-22, 2016.
- [35] R. I. Nazli, O. Gulnaz, E. Kafkas y V. Tansi, "Comparison of different chemical pretreatments for their effects on fermentable sugar production from miscanthus biomass", *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021. DOI: 10.1007/s13399-021-01558-y
- [36] M. D. Cojitambo Gaona, "Obtención de bioetanol a partir de residuos de yuca (*Manihot esculenta*) y zanahoria amarilla (*Daucus carota*) mediante enzimas celulolíticas", Trabajo de grado, Universidad UTE, Quito, Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/21016>
- [37] M. Arias Zabala, L. Henao Navarrete y Y. Castrillón Gutiérrez, "Producción de ácido láctico por fermentación de mucílago de café con *Lactobacillus Bulgaricus NRRL-B548*", *Dyna*, vol. 76, no. 158, pp. 147-153, 2009.
- [38] R. Robles Calderón, O. Feliciano Muñoz y J. H. Chirre Flores, "Estudio del consumo de azúcares reductores durante la fermentación alcohólica del mosto de uva Italia para la obtención de vino blanco", *Industrial Data*, vol. 19, no. 2, pp. 104-110, 2016. DOI: 10.15381/idata.v19i2.12842
- [39] C. E. R. Reis, N. Libardi Junior, H. B. S. Bento, A. K. F. de Carvalho, L. P. de Souza Vandenberghe, C. R. Soccol, T. M. Aminabhavi y A. K. Chandel, "Process strategies to reduce cellulase enzyme loading for renewable sugar production in biorefineries", *Chemical Engineering Journal*, vol. 451, no. 138690, 2023. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138690
- [40] E. García y D. Peralta, "Hidrólisis enzimática de bagazo de caña (*Saccharum sp hibrido*) para la producción de azúcares simples", *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, vol. 1, no. 18, pp. 119-131. DOI: 10.5281/zenodo.6481849