

ARK: <https://n2t.net/ark:/87558/tekhne.27.2.3>

Optimización de procesos en la reutilización de residuos agrícolas: un aporte para la generación de bioproductos.

Elizabeth Ramírez-Iglesias¹

ec.ramirezi@uea.edu.ec¹

orcid.org/0000-0002-9082-9394¹

Universidad Estatal Amazónica¹, Ecuador

Resumen

El aprovechamiento de residuos obtenidos en procesos industriales es fundamental para reducir la contaminación ambiental. En países donde la producción agrícola es una actividad de gran importancia, la cantidad de desechos derivados de estos procesos es muy grande, por lo cual disminuir esa cantidad resulta un importante beneficio. El objetivo de este trabajo es presentar un proceso de optimización para la reutilización de desechos de procesos agrícolas, tales como la cascarilla de arroz y las tusas de maíz para la obtención de furfural, compuesto químico de gran importancia industrial por sus múltiples aplicaciones, y además por ser un agente bioactivo. Este proceso contempla diversas variables con la finalidad de obtener los mejores resultados, dando como resultado que las condiciones que la industria debería aplicar para obtener un mayor rendimiento son que la molienda debe ser muy fina para obtener partículas muy pequeñas; la concentración de la acidez debe estar alrededor del 15 % ; el periodo de tiempo en reposo alrededor de 12 horas para partículas pequeñas y 24 h para partículas intermedias, lo cual dependerá del material usado para la síntesis, al igual que la velocidad de agitación, y empleando una temperatura entre 200-250 °C, facilitando así la hidrólisis de las pentosas, donde el proceso de producción del furfural se verá enriquecido con altos porcentajes de producción a largo plazo.

Palabras clave: bioproductos; reutilización, contaminación; furfural.

Enhancing Agricultural Waste Reuse Processes: A Contribution to Bioproduct Generation.

Abstract

The use of wastes obtained from industrial processes is essential to reduce environmental pollution. In countries where agricultural production is a very important activity, the amount of waste derived from these processes is very large, so reducing this amount is an important benefit. The objective of this work is to present an optimization process for the reuse of agricultural process wastes, such as rice husks and corn stover, to obtain furfural, a chemical compound of great industrial importance due to its multiple applications, and also because it is a bioactive agent. This process contemplated several variables in order to obtain the best results, giving as a result that the conditions that the industry should apply to obtain a higher yield are that the milling should be very fine to obtain very small particles; the concentration of acidity should be around 15 %; the resting time period should be around 12 hours for small particles and 24 h for intermediate particles, which will depend on the material used for the synthesis, as well as the agitation speed, and using a temperature between 200-250 °C, thus facilitating the hydrolysis of the pentoses, where the furfural production process will be enriched with high percentages of production in the long term.

Keywords: bioproducts; reuse, contamination; furfural

Otimização dos processos de reutilização de resíduos agrícolas: uma contribuição para a produção de bioproductos.

Resumo

A utilização de resíduos de processos industriais é essencial para reduzir a poluição ambiental. Nos países onde a produção agrícola é uma atividade muito importante, a quantidade de resíduos derivados destes processos é muito grande, pelo que a redução desta quantidade é um benefício importante. O objetivo deste trabalho é apresentar um processo de otimização para a reutilização de resíduos provenientes de processos agrícolas, como a casca de arroz e a palha de milho, para a obtenção de furfural, um composto químico de grande importância industrial devido às suas múltiplas aplicações, e também por ser um agente bioativo. Este processo contemplou diversas variáveis de forma a obter os melhores resultados, resultando que as condições que a indústria deve aplicar para obter um maior rendimento são que a moagem deve ser muito fina para obter partículas muito pequenas; a concentração de acidez deve ser de cerca de 15 %; o tempo de repouso deve ser de cerca de 12 horas para partículas pequenas e 24 h para partículas intermédias, o que dependerá do material utilizado para a síntese, bem como da velocidade de agitação, e utilizando uma temperatura entre 200-250 °C, facilitando assim a hidrólise das pentoses, onde o processo de produção de furfural será enriquecido com elevadas percentagens de produção a longo prazo.

Palavras-chave: bioproductos; reutilização, contaminação; furfural

I. INTRODUCCIÓN

La sustitución de materias primas procedentes del petróleo por otras procedentes de la biomasa es cada día más necesario; el uso del petróleo y de otras fuentes de C no renovables (carbón y gas natural) para obtener combustibles y productos químicos ha generado impactos ambientales asociados y, por otro lado, también se plantea la posible limitación de reservas y su futuro agotamiento. Las emisiones de CO₂ debido al empleo de combustibles fósiles, y el uso masivo de recursos no renovables y muy limitados, son dos aspectos ambientales que han preocupado al mundo a nivel internacional desde hace algunas décadas.

El furfural es un compuesto químico de gran importancia industrial por sus múltiples aplicaciones y además, por ser un agente bioactivo; el cual puede obtenerse, a partir de los residuos de materias vegetales, o subproductos de la agricultura. Es el aldehído más simple derivado del furano, y para su producción se requiere materias primas ricas en pentosanos [1].

Entre los materiales más ampliamente utilizados para la producción de furfural se destacan mazorcas de maíz, bagazo de caña, cascarilla de arroz, residuo de pulpa de papel, bambú, kenaf, cascarillas de cereales, trigo, cáscaras de frutos secos, semillas de algodón y madera (dura y blanda) [2].

En este trabajo, la selección de los materiales a emplear en la optimización de procesos de reutilización de desechos agrícolas fueron la cáscara de arroz y las tusas de maíz, tomando en cuenta la problemática ambiental que estos producen.

El arroz es el segundo cereal más consumido a nivel mundial, detrás del trigo. Es una fuente alimenticia básica para más de la mitad de la población mundial (aproximadamente 3500 millones de personas). Es un cultivo que se adapta fácilmente a diferentes condiciones climáticas y del suelo, lo que permite cultivarlo diferentes regiones del planeta, teniendo cada una de estas regiones una variedad específica, y los problemas asociados al manejo de los desechos de este cultivo están relacionados con el contexto geográfico y sociocultural donde se desarrolla. El problema de la cascarilla de arroz ha sido ambiental derivado reportado en diversos trabajos [3], [4]. Según la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) [5] el desecho de la cáscara que no puede ser aprovechado (cerca del 65%) es quemado a cielo abierto, circunstancia que produce gases tóxicos y material particulado, influyendo en la fauna y la flora del lugar y en la calidad del aire.

Por otro lado, el maíz es un cereal muy abundante y consumido a nivel mundial. La calidad nutricional y la integridad de los granos de maíz están influenciadas por muchos factores, incluyendo la genética, el medio ambiente y el procesamiento del grano, los procedimientos de cocción, la nixtamalización y la fermentación. La composición proximal del maíz y los productos de este contienen un porcentaje de carbohidratos en el rango de 44,8-69,6%, 11,6-20% de humedad, 4,5-9,87% de proteína, 2,17-4,43% de grasa, 2,10-26,77% de fibra y 1,10-2,95% de cenizas. Es una buena fuente de agua y ofrece aproximadamente 120 Kcal por cada 100 gramos[6]; [7]; [8]. Es un producto que se cultiva en casi todo el mundo y durante el proceso de cosecha se generan residuos tales como tusas,

hojas y tallos que pueden ser utilizados como fuentes de energía [9]. Es importante que se desarrollen a un mayor ritmo los biocombustibles que se elaboran con desechos, ya que el mayor peso solo se da el aprovechamiento al producto alimenticio, dejando a un lado los residuos como lo es la tusa de maíz, desconociéndose un uso alternativo a la misma [10].

La mayoría de estos residuos son quemados para ser utilizados como abono, pero en ocasiones estos residuos terminan en vertimientos de aguas residuales, provocando así una contaminación ambiental y un riesgo para la población [11].

El uso alternativo que se ha planteado para estos residuos se relaciona directamente con las energías alternativas, ya que estos pueden transformarse en biocombustibles a través de procesos termoquímicos, por lo que el estudio de estas transformaciones ha sido de gran interés en los últimos años en diferentes países, teniendo en cuenta que es una alternativa a los combustibles fósiles, ya que a estos se les atribuye problemas del calentamiento global [12].

El furfural, el fenol y el etanol son los mayores productos comerciales o semi comerciales derivados de materiales hemicelulósicos, pero la mayor ventaja del furfural es que proviene de recursos renovables. Este compuesto ha sido producido por casi unos 90 años o más, de manera que no es un producto nuevo; sin embargo, emergen nuevas y más eficientes tecnologías de proceso, creando posibilidades de nuevos productos para una industria química preocupada de su dependencia en materia prima y energía proveniente de recursos no renovables [13]; [14]; [15].

El furfural se produce a partir de residuos agrícolas que contienen pentosanos, que son hidrolizadas a furfural y otros subproductos. El contenido de pentosanos se mide mediante la conversión de éstas a furfural, y una posterior cuantificación del producto obtenido, generalmente por precipitación con ácido [16].

Los pentosanos son hemicelulosas (carbohidratos complejos) que están presentes dentro de la celulosa en muchos tejidos de plantas leñosas; y se hidrolizan a pentosas, en catálisis en medio ácido acuoso, y esta pentosa se deshidrata a furfural en un proceso unificado, utilizándolo en la industria química como un producto intermedio en la síntesis de otros productos químicos, como nylon, lubricantes y solventes, adhesivos, medicinas y plásticos. Se produce principalmente por hidrólisis ácida de materiales ricos en celulosa o hemicelulosa utilizando soluciones de ácidos (generalmente minerales) para romper los polisacáridos en azúcares [17].

Los rendimientos potenciales de pentosanos dependerán de la tecnología de extracción utilizada. [18].

Se ha señalado que el bagazo de caña y las tusas de maíz son los dos materiales más comúnmente utilizados en plantas de producción de furfural. Dichos materiales procedentes de la transformación agroindustrial, representan más del 98% del total de furfural producido, lo que significa que no hay costos elevados directos para la adquisición de materias primas, ya que estas se recolectan en puntos centrales con volúmenes relativamente grandes.

El contenido de pentosanos se mide mediante la conversión de éstas a furfural y una posterior cuantificación del producto obtenido, generalmente

por precipitación con ácido [18], siendo la mayor ventaja del furfural su procedencia a partir de recursos renovables.

De las muchas aplicaciones reales y potenciales de furfural, su tratamiento se limita a unos pocos campos donde este se utiliza de manera directa. Se ha indicado que el furfural es un fungicida muy eficaz, destacando que bajas concentraciones de furfural (0.5%) son suficientes para prevenir por completo el crecimiento de moho *Penicillium*. Por otro lado, también se observó que es particularmente eficaz en la inhibición del crecimiento del carbón del trigo (*Tilletia foetens*) al tratarlo una solución acuosa de furfural de 0.05%, mientras que, en el tratamiento utilizado en semillas, controla la afección por el hongo, pero no disminuye su poder de germinación de forma significativa, por lo cual se señala como no tóxico [19].

Los casos en que el furfural se emplea como insumo para la síntesis de otras sustancias químicas son más numerosos. Por un lado, el alcohol furfurílico es el derivado más importante del furfural, llegando a alcanzar el 65% de todo el furfural producido, existiendo una buena demanda de este producto en la fabricación de resinas de fundición; este se fabrica mediante un proceso de hidrogenación (reducción catalítica) [20]. Puede ser utilizado como disolvente, pero es más a menudo se utiliza como ingrediente en la fabricación de diversos productos químicos tales como: adhesivos, agentes humectantes, revestimiento anti-corrosión, solventes, diluyente, alcohol tetrahidrofurfurílico, resinas de furanos, en especial resinas de fundición [20]; [21].

La aplicación de furfural como extractor se basa en un fenómeno llamado "conjugación intermolecular", que significa que cuando las moléculas con dobles

enlaces conjugados, como el furfural entran en contacto con otras moléculas que contienen dobles enlaces, forman un sistema conjugado ampliado de dobles enlaces, y esta ampliación libera la energía análoga a la formación de enlaces intramoleculares [22]. En consecuencia, el furfural enlaza a las moléculas que contienen dobles enlaces, a la vez que desconoce las moléculas sin dobles enlaces; es por esta razón, que el furfural se utiliza para eliminar compuestos aromáticos a partir de aceites lubricantes; para mejorar la relación entre la viscosidad y la temperatura; para eliminar compuestos aromáticos de los combustibles diesel a fin de mejorar las características de ignición; y para obtener compuestos no saturados (compuestos con dobles enlaces) a partir de aceites vegetales como el aceite de soja para generar los denominados "aceites secantes" adecuados para pinturas y barnices, ya que sólo los compuestos con doble enlace son capaces de realizar un "secado" por oxidación con aire [21].

El objetivo de este trabajo es presentar un proceso de optimización para la reutilización de desechos de procesos agrícolas, tales como la cascarilla de arroz y las tusas de maíz para la obtención de furfural, compuesto químico de gran importancia industrial por sus múltiples aplicaciones, y además por ser un agente bioactivo.

ii. MATERIALES Y MÉTODOS

Material-Desechos agroindustriales

Los desechos agroindustriales empleados en esta experiencia fueron tusas de maíz y cascarilla de arroz.

Tusas de maíz

La tusa de maíz es uno de los desechos agrícolas más abundante en los lugares donde se desarrolla este cultivo. Es un material orgánico con un apreciable porcentaje de lignina y posee una gran cantidad de pentosas, el cual, por ser considerado como desecho, se convierte en el presente trabajo se considera como una buena fuente para la síntesis del furfural [23].

Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es un subproducto generado del proceso de molienda del grano de arroz proveniente de los campos de cultivo. Esta se encuentra en la parte exterior del grano de arroz maduro compuesta por dos glumas denominadas palea y lemma, unidas por dos estructuras que tienen forma similar a un gancho. Tiene una naturaleza fuerte, leñosa y abrasiva; por lo cual, es resistente a factores ambientales, protegiendo al grano de arroz de sufrir deterioro durante el tiempo de desarrollo de la planta de arroz, a causa del ataque de insectos o de hongos. Esta tiene varias aplicaciones incluyendo elaboración de abonos; obtención de papel y de pulpa, en materiales de construcción, como combustible; obtención de productos de silicio y en conversión de la biomasa, donde se obtienen azúcares que pueden ser convertidos a otros químicos orgánicos, como el furfural [24].

2.- Procedimientos para la obtención de furfural

El proceso de obtención de furfural comprende una serie de etapas imprescindibles que se indican a continuación [25].

Montaje de destilación:

Tiene como función obtener el furfural a partir del material seleccionado la deshidratación de pentosanos por efecto de adición de ácido sulfúrico. Con este montaje se obtiene un líquido incoloro que contiene el compuesto por efecto de la condensación de los vapores generados por el calentamiento de la solución de ácido sulfúrico y el material empleado. Luego este destilado obtenido se neutraliza con carbonato de sodio y se sobresatura con sal.

-Extracción con solvente:

El proceso de extracción líquido- líquido se realiza con el fin de aislar el compuesto obtenido que se encuentra en disolución acuosa, usando para esto un solvente orgánico que tenga gran afinidad con el compuesto, (a menudo se emplea éter etílico), y que por efecto de la diferencia de densidades se logra identificar la fase orgánica contenida en el embudo de separación, lo que es una pieza fundamental para este proceso.

- Proceso de secado con sulfato de sodio:

El proceso de secado con sulfato de sodio se realiza con el fin de absorber los restos de agua que no fueron totalmente separados por la extracción con solvente, debido a que el sulfato de sodio se encuentra anhidro, el cual posteriormente se filtra para obtener así la solución orgánica pura.

- Filtración por evaporación:

Al ser imposible separar el soluto del solvente por medio de otros métodos, se recurre a el método de

evaporación, donde el solvente que tiene un bajo punto de ebullición se elimina con gran facilidad de la solución evaporándose.

-Análisis por RMN (Espectroscopia de resonancia magnética nuclear)

Técnica de investigación que aprovecha las propiedades magnéticas de ciertos núcleos atómicos para determinar las propiedades físicas o químicas de los átomos o moléculas que los contienen.

1.- Síntesis del furfural a partir de tusas de maíz

A través de diferentes ensayos se planteó obtener el mecanismo óptimo para obtener un alto porcentaje de rendimiento en la síntesis de furfural a partir de las tusas de maíz como materia prima.

En el Cuadro 1 se muestran las condiciones para la síntesis de furfural a partir de las tusas de maíz, donde se empleó un día como tiempo de reposo.

Cuadro 1 Síntesis del furfural a partir de tusas de maíz con tiempo en reposo de un día

Ensayo (N°)	Tusas de maíz en trozos pequeños (g)	Volumen de solución de H ₂ SO ₄ (ml)	Concentración del ácido (%)	Tipo en reposo (días)
1	20	200	15	1
2	20	200	20	1
3	20	200	30	1

Para la síntesis de furfural a partir de tusas de maíz, se emplearon soluciones de H₂SO₄ a diferentes concentraciones de 15, 20 y 30 %. El proceso se inició agregando 20 gr de tusas de maíz (partido en trozos de aproximadamente 1 cm) en balones de 250 ml y 200 ml de solución de H₂SO₄ en las diferentes concentraciones, con un día como período de reposo para que ocurriera la hidrólisis. Posteriormente, se procedió a realizar un proceso de destilación de la solución. A continuación, se neutralizó el destilado con bicarbonato de sodio y se saturó con sal común. El próximo paso consistió en realizar una extracción líquido-líquido, utilizando tres porciones de éter dietílico (30 ml), seguido por el secado del destilado a través de la adición de sulfato de magnesio anhidro. Posteriormente, se realizó el filtrado de la solución al vacío para extraer todo el líquido posible, evaporando el éter hasta tener un residuo aceitoso con un color entre verde y amarillo. Como último paso, se determinó la masa del producto final, para lo cual se tomó una muestra (una gota) con una pipeta Pasteur y se pasó a un tubo de RMN, al cual se añadió cloroformo deuterado (5 ml), para estudiar el espectro obtenido del RMN y determinar si el producto es el deseado.

Una segunda experiencia se realizó siguiendo los pasos descritos anteriormente, solo que empleando una molienda más fina (trozos de aproximadamente 0.5 cm), y descartando la concentración de 30%, del ácido (Cuadro 2).

Cuadro 2. Síntesis del furfural a partir de tusas de maíz empleando una molienda más fina

Ensayo (N°)	Tusas de maíz en trozos pequeños (g)	Volumen de solución de H ₂ SO ₄ (ml)	Concentración del ácido (%)	Tipo en reposo (días)
4	20	200	10	1
5	20	200	15	1
6	20	200	20	1

Con el objeto de minimizar los obstáculos impuestos por la molienda de las tusas de maíz, se realizó un tercer ensayo, aumentando la velocidad del agitador mecánico (multipruebas TE-148) y el tiempo de agitación en el proceso (Cuadro 3).

Cuadro 3. Síntesis del furfural a partir de tusas de maíz variando las condiciones de molienda de la muestra, el tiempo y la velocidad de agitación

Ensayo (N°)	Tusas de maíz en trozos pequeños (g)	Volumen de solución de H ₂ SO ₄ (ml)	Concentración del ácido (%)	Tipo de agitación	Tiempo de agitación (horas)
7	150	1500	15	Mecánica	24

Se procedió a preparar 1500 ml de 1 solución de H₂SO₄ a una concentración de 15%, la cual fue agregada a un reactor al cual se había agregado 150 gramos de tusas de maíz molidas, el cual fue colocado en agitación mecánica por 24 horas, siguiendo el mismo procedimiento realizado anteriormente.

En cada uno de los ensayos se compararon los resultados de cada tratamiento, determinando el de mejor rendimiento.

2- Síntesis del furfural a partir de cascarillas de arroz

Para optimizar la síntesis del furfural a partir de cascarillas de arroz, se estableció un método de obtención buscando alcanzar el mejor porcentaje de rendimiento posible, donde las variables evaluadas fueron concentración del ácido, tiempo y agitación. El cuadro 4 muestra las condiciones del ensayo para la obtención de furfural a partir de cascarillas de arroz, variando concentración del ácido y el tiempo de reposo en el proceso.

Cuadro 4 Síntesis del furfural a partir de cascarillas de arroz empleando diferentes concentraciones del ácido y tiempo de reposo en el proceso

Ensayo (N°)	Tusas de maíz en trozos pequeños (g)	Volumen de solución de H ₂ SO ₄ (ml)	Concentración del ácido (%)	Tiempo en reposo (días)
1	20	100	10	1
2	20	100	20	1
3	20	100	30	1
4	20	100	10	6
5	20	100	20	6
6	20	100	30	6

Para la síntesis de furfural a partir de cascarillas de arroz, se emplearon 20 gr de cascarilla de arroz (molida), utilizando balones de 250 ml, y con 100 ml de solución de H₂SO₄ en las diferentes concentraciones, y un día para que ocurriera la hidrólisis. Posteriormente, se procedió a realizar un proceso de destilación de la solución con agitación o hasta que comenzó a subir la espuma en el balón.

A continuación, se neutralizó el destilado con bicarbonato de sodio y se saturó con sal común. El próximo paso consistió en realizar una extracción líquido-líquido, utilizando tres porciones de 30 ml de éter dietílico, seguido por el secado del destilado añadiéndole sulfato de magnesio anhidro. Posteriormente, se realizó el filtrado de la solución al vacío para extraer todo el líquido posible, evaporando el éter hasta tener un residuo aceitoso con un color entre verde y amarillo. Como último paso, se determinó la masa del producto final, y se tomó una muestra (una gota) con una pipeta Pasteur, pasándola a un tubo de RMN, al cual se añadió cloroformo deuterado (5 ml), estudiando posteriormente el espectro obtenido del RMN para determinar si el producto es el deseado.

Otro ensayo adicional fue realizado utilizando como variable la molienda, el tipo de agitación y el volumen de la solución (Cuadro 5 y 6).

Cuadro 5 Síntesis del furfural a partir de cascaras de arroz, manejando como variable la molienda, la concentración del ácido (30 %) la agitación y el volumen de la solución (750 ml)

Ensayo (N°)	Cascarillas de arroz sin moler (g)	Volumen de solución de H ₂ SO ₄ (ml)	Concentración del ácido (%)	Tipo de agitación	Tiempo de agitación (horas)
7	150	750	30	Mecánica	12

Cuadro 6. Síntesis del furfural a partir de cascaras de arroz, manejando como variable la molienda, la concentración del ácido (15 %) la agitación y el volumen de la solución (1500 ml)

Ensayo (N°)	Cascarillas de arroz sin moler (g)	Volumen de solución de H ₂ SO ₄ (ml)	Concentración del ácido (%)	Tipo de agitación	Tiempo de agitación (horas)
8	50	1500	15	Mecánica	12

Para los ensayos señalados se empleo el procedimiento descrito previamente.

iii RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de la optimización de la síntesis del furfural, contempló diversas variables con la finalidad de obtener los mejores resultados. Las variables evaluadas fueron la molienda, la concentración de la acidez, el periodo de tiempo en reposo y la agitación, empleando dos materiales diferentes que son discutidos a continuación.

1.- Síntesis de furfural a partir de tusas de maíz

La síntesis del furfural a partir de las tusas de maíz posee un problema central que reside en la molienda, ya que, por su consistencia dura, es difícil convertir en pequeñas partículas las tusas de maíz, y solo se consiguió llevar a trozos muy pequeños. Los porcentajes de rendimiento al realizar la síntesis de furfural a partir de tusas de maíz empleando diferentes concentraciones de ácido y un día como tiempo de reposo, lo que se puede observar en el cuadro 7.

Cuadro 7. Porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de tusas de maíz al emplear diferentes concentraciones de ácido y un día como tiempo de reposo

Ensayo (N°)	Valor teórico (g)	Resultado experimental (g)	% de rendimiento
1	4.36	0.70	16.05
2	4.36	1.02	23.39
3	4.36	0.60	13.76

Aunque el mayor porcentaje de rendimiento se puede observar en el tratamiento 2, sin embargo, esto no necesariamente coincide con el espectro de la caracterización del producto. En el tratamiento 1 el espectro muestra una señal grande, pero las señales del furfural no se presentan en ninguna parte de este espectro, por lo cual se sobrentiende que el producto obtenido no es ese. El resultado arrojado en el espectro del ensayo 2, se detectaron en mínima proporción las señales del furfural, mientras que las impurezas están a gran escala y entorpecen la síntesis. Las impurezas son indefinidas, parecen señales de éter, pero mezcladas con algún otro compuesto desconocido observándose igualmente señales de grasa.

En la Fig. 1 se muestran los resultados en relación al espectro del producto obtenido del ensayo 4 (30 %) en la síntesis de furfural a partir de tusas de maíz con tiempo de reposo de 1 día.

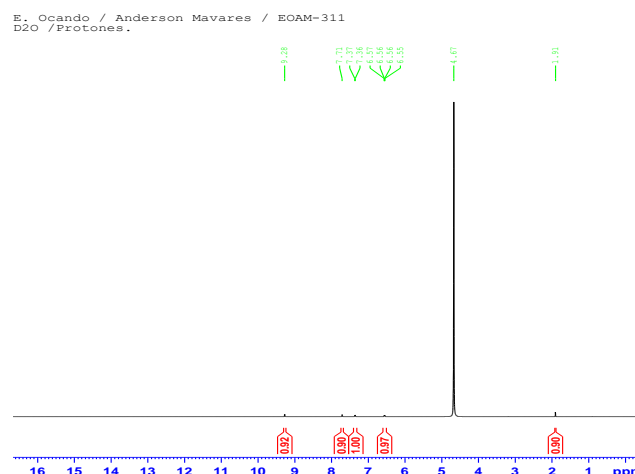


Fig. 1 Espectro del producto obtenido del ensayo 4 (30 %) en la síntesis de furfural a partir de tusas de maíz con tiempo de reposo de 1 día.

En este caso, la muestra se trató con agua deuterada ya que no era soluble en cloroformo, donde se podían observar dos fases como resultados de la síntesis. En estos resultados es evidente la presencia de una señal extraña en una pequeña proporción, con cuatros picos, ubicados en la dimensión del furfural.

Los resultados obtenidos demuestran lo fundamental que es la molienda sin importar la acidez o la agitación, ya que si la materia no está en menor tamaño, no sucederá la transformación de las pentosas y por ende, no se formará el furfural a partir de este material, donde el hecho de que las partículas no estuviesen molidas totalmente, impidió el contacto entre la materia prima y la solución acida, por lo que la hidrólisis ocurrió en menor cantidad, facilitando el contacto entre otros compuestos y formando sustancias irrelevantes para la obtención del furfural.

En la síntesis referida, no todas las pentosas consumidas necesariamente van a terminar como furfural, la razón es que, además de la

deshidratación, pueden tener lugar dos reacciones de la pentosa en subsecuencia, involucrando ambas el producto furfural; una reacción de furfural con él mismo, comúnmente llamada "resignificación de furfural"; y una reacción de furfural con un intermedio en la conversión pentosa a furfural, llamada comúnmente "condensación de furfural" [26].

La molienda, la disolución del ácido y una constante agitación van a definir el éxito en el proceso de síntesis del furfural, ya que estas variables van a permitir con mayor facilidad la hidrólisis de las pentosas, y con la ayuda de una fuente de calor, el proceso de producción del furfural se verá enriquecido con altos porcentajes de producción a largo plazo. Sin embargo, es la molienda la que se puede señalar como la variable fundamental que va a definir el proceso de obtención del furfural, sin importar la acidez o la agitación, ya que, si la materia no está en menor tamaño, no se producirá la transformación de las pentosas y, por ende, no se formará el furfural.

Grandes empresas químicas y biotecnológicas de trayectoria, así como empresas emergentes, se encuentran abocadas al desarrollo y comercialización de bioproductos, principalmente biocombustibles, empleando diversas fuentes de biomasa renovable, como es el furfural. Sin embargo, se ha planteado un debate ético en relación al uso de biomasa vegetal en sustitución del petróleo, debido a los argumentos relativos a la seguridad alimentaria. Adicionalmente, se ha señalado que los altos costos de producción y la viabilidad del proceso han sido argumentos empleados en contra. Sin embargo, en este trabajo se ha empleado como materia prima, fuentes de carbohidratos que no distorsionan el comercio de

alimentos ni constituyen una amenaza a la biodiversidad. Diversos trabajos de investigación han referido el uso de este proceso donde se ha empleado a biomasa lignocelulósica proveniente de tucas de maíz, que vienen de un cultivo de elevada capacidad de producción, y que representa una abundante fuente de residuos que no son empleados por el sector agroalimentario, y cuyo uso se presenta como una fuente de materia prima a tener en cuenta como consecuencia de su abundancia, su elevada disponibilidad, bajo costo y posibilidad de eliminarlo como agente contaminante[26], [27], [28].

En la actualidad, existen retos muy complejos relativos al sector ambiental, donde diversos sectores como el energético y el de salud, se encuentran íntimamente interrelacionados. En relación a ese punto, entre los objetivos de desarrollo sostenible a alcanzar, está el relacionado con la energía asequible y no contaminante, por lo cual todos los estudios relacionados con la producción y el uso de biocombustibles ha tomado una gran relevancia dentro de la sociedad, debido a que, al generarse de la transformación de la biomasa, pueden estar disponibles prácticamente en cualquier lugar del planeta a partir de diversos materiales. Sin embargo, el uso y producción de biocombustibles como aporte al desarrollo sostenible ha generado una discusión desde un enfoque multidisciplinario, donde debe destacar un análisis de los principios éticos en la producción de biocombustibles. Como es conocido, los biocombustibles pueden generarse a partir de insumos comestibles y no comestibles, lo cual puede afectar la seguridad alimentaria; por ello, la investigación en los procesos de producción de

biocombustibles debe considerar que la biomasa empleada sea de mínima afectación a la población, con especial interés en el aspecto alimenticio. De allí, que para que estos puedan ser empleados sin conflictos éticos profundos se requiere cumplir con características específicas que favorezca su uso en un contexto determinado, con precios competitivos, y con un mínimo impacto ambiental. Por eso es tan importante investigar acerca de la producción de biocombustibles a partir de residuos derivados de otros procesos industriales, lo que favorecería que en su producción fueran observados principios éticos relacionados con justicia, no maleficencia y beneficencia. Por esta razón, es importante que desde la bioética se haga un análisis relacionado con la implementación de esta biotecnología, buscando la manera de encontrar un punto de equilibrio entre la innovación tecnológica y el desarrollo sostenible para el territorio geográfico donde se desarrolla la producción de biocombustibles [29], [30].

En el cuadro 8 se pueden observar los porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de tusas de maíz al emplear una molienda más fina, donde se puede señalar que en los tres tratamientos se obtiene un rendimiento similar.

Cuadro 8. Porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de tusas de maíz al emplear una molienda más fina

Ensayo (N°)	Valor teórico (g)	Resultado experimental (g)	% de rendimiento
4	4.36	1.36	31.19
5	4.36	1.48	33.94
6	4.36	1.22	27.98

En la Fig. 2 se observan varias señales de gran dimensión, pero las importantes (las del furfural) están bien definidas y se expresan exactamente como en los demás espectros. Las otras señales son indiferentes, que corresponden al éter que falto por evaporarse y grasa que no afecta en nada la reacción.

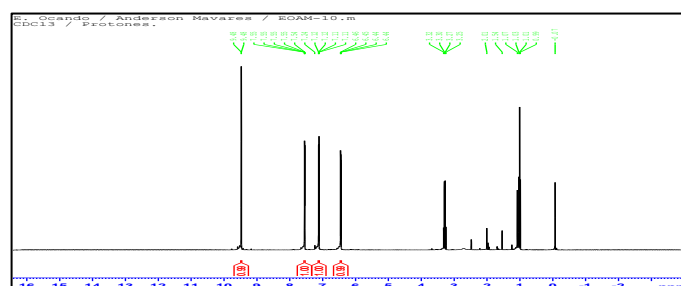


Figura 2 Espectro del producto obtenido del ensayo 4 (10 %) en la síntesis de furfural a partir de tusas de maíz en trozos pequeños con tiempo de reposo de 1 día.

En la Fig. 3 se puede observar que sucede lo mismo que en el espectro anterior, con la diferencia de que las señales de éter están en menor proporción, lo cual es buena señal, porque el rendimiento no varía.

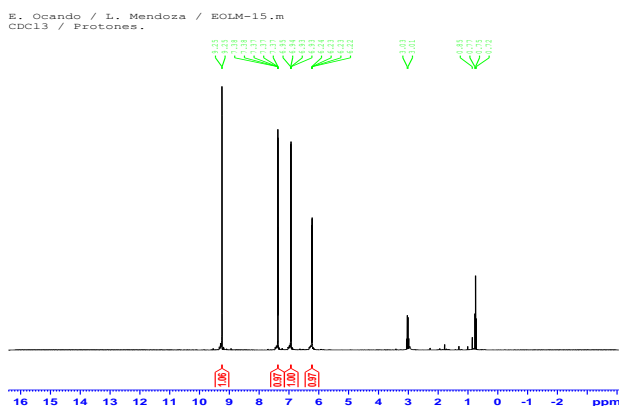


Fig.3 Espectro del producto obtenido del ensayo 5 (15 %) en la síntesis de furfural a partir de tusas de maíz en trozos pequeños con tiempo de reposo de 1 día.

En la Fig. 4, las señales del furfural se ven definidas, no se observan señales de grasa ni de éter, y aunque hay ciertas impurezas están en mínima proporción, lo cual es irrelevante para la síntesis. A pesar de haber obtenido un mejor rendimiento, los resultados son bajos para lo que se esperaba, destacando que la molienda se ha convertido en el problema central a resolver para la síntesis, ya que es un proceso necesario para reducir lo más posible las partículas de las tusas del maíz.

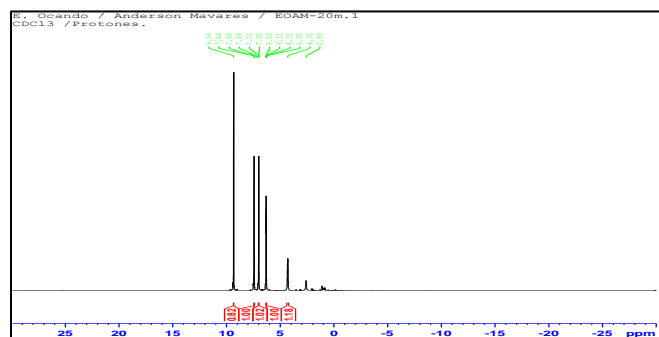


Fig. 4 Espectro del producto obtenido del ensayo 6 (20 %) en la síntesis de furfural a partir de tusas de maíz en trozos pequeños con tiempo de reposo de 1 día.

En el cuadro 9 se pueden observar los porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de tusas de maíz al emplear una concentración de 15 % del ácido, y una agitación mecánica.

Cuadro 9 Porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de tusas de maíz al emplear 15 % como concentración del ácido y agitación mecánica.

Ensayo (N°)	Valor teórico (g)	Resultado experimental (g)	% de rendimiento
7	32.72	12.34	37.71

La concentración de 15 % sigue siendo la más beneficiosa a la hora de seleccionar el ensayo más exitoso, destacando que la agitación magnética no es tan beneficiosa como la mecánica para aumentar la cantidad del producto.

El espectro del producto obtenido a partir de este ensayo puede observarse en la Fig. 5, siendo este el espectro más puro y exacto que se derivó de los ensayos realizados. Se observa claramente en forma ascendente desde las señales del heterociclo hasta las del aldehído, donde las señales están muy definidas, claras y concisas, demostrando que el producto es casi en un 100% el deseado.

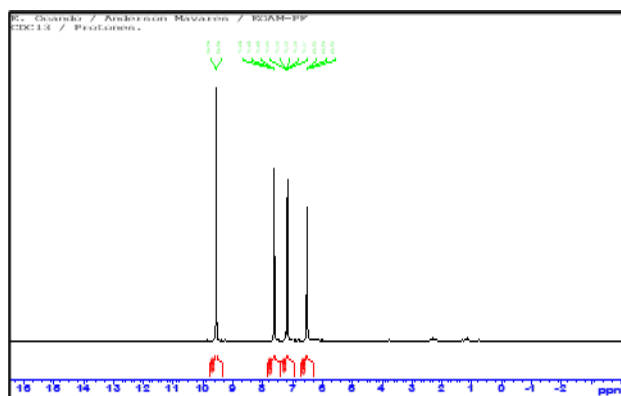


Fig.5 Espectro del producto obtenido del ensayo al 15 % y agitación mecánica en la síntesis de furfural a partir de tusas de maíz en trozos pequeños con tiempo de reposo de 1 día.

Este ensayo arrojó el mejor resultado, con mayor cantidad de producto obtenido, aunque el porcentaje no pasa del 40%, se sabe que está cerca de un 100% al basarse en la teoría industrial de [18].

Por otro lado, es importante destacar que la agitación es una excelente alternativa para hidrolizar la mayor cantidad de pentosas posibles, definiéndose como la tercera variable fundamental de la síntesis después de la molienda y la acidez.

En resumen, el cuadro 10 muestra las condiciones ideales para la síntesis del furfural a partir de tusas de maíz de acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos.

Cuadro 10. Condiciones más adecuadas para la síntesis del furfural a partir de tusas de maíz según lo planteado de acuerdo a los resultados obtenidos.

Variables	Condiciones
Tiempo	24
Molienda	Muy fina, partículas pequeñas
Agitación	Velocidad máxima
Concentración	15 %
Volumen	10 ml por cada gramo
Temperatura de la fuente de calor	Entre 200 a 250 °C

Las experiencias realizadas con los ensayos anteriores indican que se debe descartar la variable referida al tiempo prolongado como determinante, siendo la variable determinante la molienda, ya que, por la consistencia dura de la tusa de maíz, fue difícil convertir en pequeñas partículas este material, solo alcanzando a obtener trozos muy pequeños.

2.- Síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz

En el cuadro 11 se muestran los porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de cascarilla de arroz tomando como valor teórico el resultado estequiométrico.

Cuadro 11 Porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de cascarilla de arroz tomando como valor teórico el resultado estequiométrico

Ensayo (N°)	Valor teórico (g)	Resultado experimental (g)	% de rendimiento
1	2.62	0.37	14.12
2	2.62	0.64	24.43
3	2.62	1.15	43.89
4	2.62	0.42	16.03
5	2.62	0.70	26.72
6	2.62	0.81	30.92

Estos resultados indican que los mejores rendimientos se obtuvieron al emplear 30 % de concentración del ácido, tanto para un día como para 6 días de reposo.

En los espectros obtenidos con el ensayo 1 y 2, no se observa una señal bien definida para el furfural, acompañado de señales de grasa y de éter, sin embargo, en el 2 se observa una mayor definición.

En la Fig. 6 se muestra el espectro del producto obtenido del ensayo 3 (Concentración de 30% de H_2SO_4) y un día de reposo para la síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz.

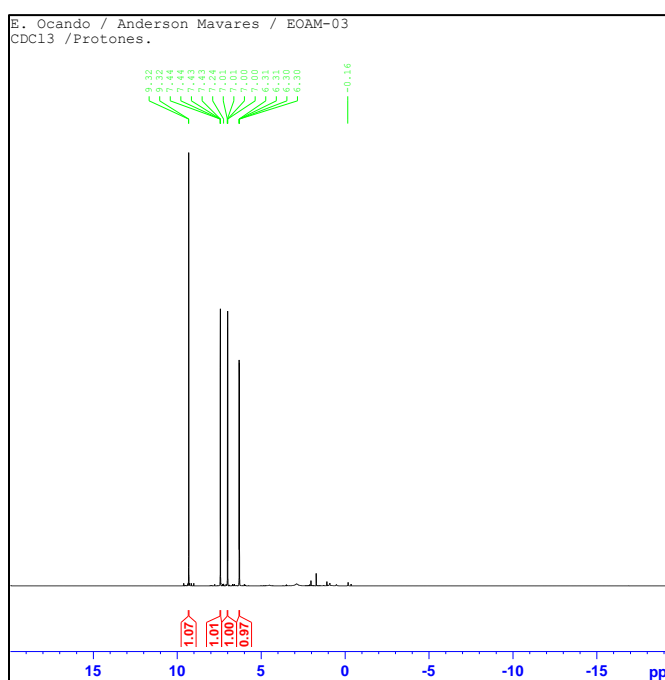


Fig. 6 Espectro del producto obtenido del ensayo 3 (Concentración de 30% de H_2SO_4) y un día en reposo para la síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz

La molécula del furfural contiene cuatro átomos de hidrogeno, por ello una buena manera de caracterizarlo es a través de un espectro de RMN. En la imagen anterior se observan las señales emitidas por el espectro y captadas por los protones. Se pueden observar señales más definidas, los que nos induce a decir que no hay interferencia en el contacto entre la resonancia y el núcleo del átomo. Las impurezas están en menor cantidad, por lo cual el espectro es casi furfural puro. Se ha señalado que una señal es definida cuando el área es de uno o aproximado a uno, lo cual puede observarse en los números rojos que están debajo de las señales.

En la Fig.7 se muestra el espectro del producto obtenido del ensayo 4 (Concentración de 10% de H_2SO_4) y seis días de reposo para la síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz.

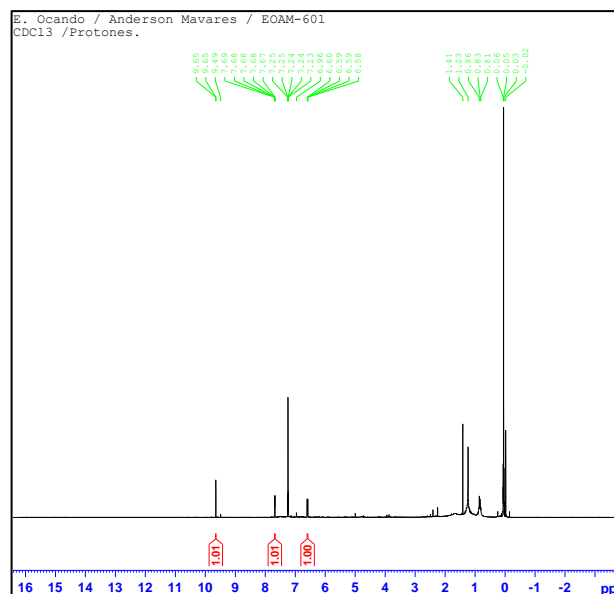


Fig. 7 Espectro del producto obtenido del ensayo 4 (Concentración de 10% de H_2SO_4) y seis días de reposo para la síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz

Los resultados del ensayo 4 indican que en este espectro las señales del furfural pueden ser observadas, pero en mínima proporción. Las mayores señales son de grasa (la más grande de todas) y de éter (la que está al lado de la grasa). Igualmente, para el ensayo 5, en el espectro vuelven a aparecer las señales definidas de la molécula del furfural, donde se ve con mayor intensidad la perteneciente al grupo funcional de este heterociclo, donde las impurezas son mínimas, y en este caso no hay señales de grasa, mientras que las señales pequeñas son de éter residual que no se terminó de evaporar en la síntesis.

En la Fig. 8 se muestra el espectro del producto obtenido del ensayo 6 (seis días en reposo a una concentración de 30% de H_2SO_4) para la síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz.

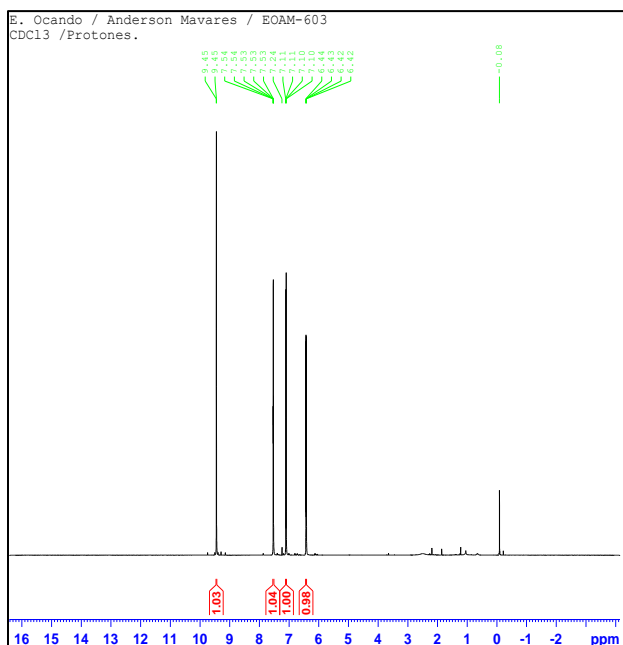


Figura 8 Espectro del producto obtenido del ensayo 6 (seis días en reposo a una concentración de 30% de H_2SO_4) para la síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz

En este espectro se observan las señales definidas del furfuraldehído, son grandes y están ubicadas exactamente como las anteriores. Se ven pequeñas señales una de grasa y otra de éter pero son irrelevantes porque se ve que el producto mayoritario es el furfural. Las señales están bien definidas y su área es cercana a uno. En síntesis, el espectro arroja un resultado satisfactorio sobre la producción del furfural en estas condiciones

En esta serie de seis resultados paralelos, se observó que, en la mayoría de las síntesis, el producto obtenido es el furfural. Comparando un resultado con otro se puede decir que los ensayos 3 y 6 fueron lo más puros, mientras que, en los otros, la cantidad de impurezas es mayor. Sin embargo, el que dio mayor cantidad de furfural expresado en gramos fue el ensayo 3.

Recordando que se trabajó manipulando dos variables como lo son la concentración del ácido y el tiempo en reposo, se puede decir que la acidez es el factor más influyente entre estas dos, ya que a pesar de que hubo un lapso de tiempo bastante amplio entre los dos, la cantidad de furfural obtenido no es muy diferente entre ambos periodos, lo que lleva a descartar esta variable por si sola e induce a trabajar a mayor concentración para obtener mejores resultados. Sin embargo, al trabajar a esa concentración de ácido, se detalla que la cantidad de líquido obtenido después de la destilación es poco comparado con la anterior, ya que se produce una espuma que sube apresuradamente, lo que obliga a detener la destilación.

En el cuadro 12 se muestran los porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de cascarilla de arroz tomando como valor teórico el resultado estequiométrico con 30 % de

concentración del ácido y 12 horas de agitación mecánica.

Cuadro 12 Porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de cascarilla de arroz con 30 % de concentración del ácido y 12 horas de agitación mecánica tomando como valor teórico el resultado estequiométrico

Ensayo (N°)	Valor teórico (g)	Resultado experimental (g)	% de rendimiento
7	19.64	2.23	12.16

En la Fig.9 se muestra el espectro del producto obtenido del ensayo 7 (concentración de 30% de H₂SO₄ y agitación mecánica por 12 horas) para la síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz.

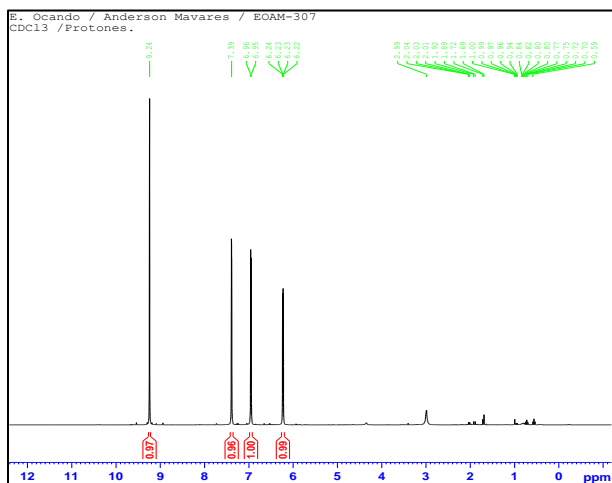


Fig.9 Espectro del producto obtenido del ensayo 7 (30 % de concentración del ácido y 12 horas de agitación mecánica) para la síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz

En este espectro de RMN, se ven las señales definidas de la molécula del furfural como se observó en los ensayos anteriores. La señal del aldehído es la más grande y de mayor ímpetu, mientras que la de los protones del heterociclo salen en menor proporción, pero igual de definidas. Se observan mínimas impurezas, como en el caso anterior, donde las señales emitidas parecen de éter residual y de grasa.

En esta síntesis, se puede evidenciar un bajo porcentaje de rendimiento, a pesar de que el espectro define al furfural como el producto mayoritario, pero la cantidad de producto obtenido es muy baja con relación a la cantidad de materia prima tratada.

Al evaluar las variables, se definió la molienda de la materia prima a procesar como la fundamental e influyente, ya que mientras más pequeña sea la partícula, más fácil será el contacto entre el ácido y la fuente de pentosas, lo que permitirá con mayor facilidad la hidrólisis de los pentosanos. Al igual que la molienda, la acidez también ha sido considerada una variable que interviene de manera determinante en la síntesis, de allí que sobre esos puntos se realizaron ajustes determinantes para la optimización del proceso.

En el cuadro 13 se muestran los porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de cascarilla de arroz con 15 % de concentración del ácido, 1500 ml de volumen de ácido y 24 horas de agitación mecánica tomando como valor teórico el resultado estequiométrico.

Cuadro 13. Porcentajes de rendimiento obtenidos durante la síntesis del furfural a partir de cascarilla de arroz con 15 % de concentración del ácido, 1500 ml como volumen del ácido y 24 horas de agitación mecánica tomando como valor teórico el resultado estequiométrico

Ensayo (N°)	Valor teórico (g)	Resultado experimental (g)	% de rendimiento
8	19.64	7.46	37.48

En la Fig. 10 se muestra el espectro del producto obtenido del ensayo 8 (con 15 % de concentración de H₂SO₄, 1500 ml de H₂SO₄ y 24 horas de agitación mecánica) para la síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz.

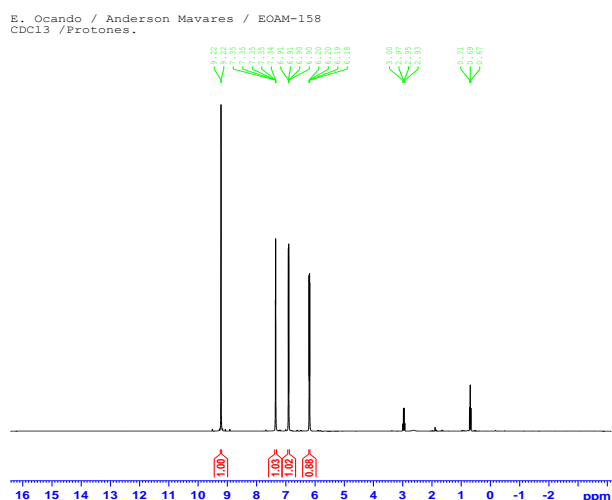


Fig. 10 Espectro del producto obtenido del ensayo 8 (con 15 % de concentración de H₂SO₄, 1500 ml de H₂SO₄ y 24 horas de agitación mecánica) para la síntesis de furfural a partir de cascarilla de arroz.

En este espectro de RMN, se ven las señales definidas de la molécula del furfural como se observó en los ensayos anteriores, donde la señal del aldehído es la más grande y de mayor ímpetu, mientras que la de los protones del heterociclo sale en menor proporción pero igual de definida, y con mínimas impurezas, como en el caso anterior.

A lo largo del proceso de la optimización de la síntesis del furfural, se fueron descartando variables y agregando nuevas con la finalidad de obtener los mejores resultados. Las variables evaluadas fueron la molienda, la concentración de la acidez, el periodo de tiempo en reposo, la agitación y el volumen del ácido, donde a medida que se realizaban los ensayos se iban definiendo las condiciones adecuadas para obtener el mejor rendimiento a lo largo del proceso.

A partir del análisis de los resultados, se derivó que las condiciones que la industria debería aplicar para obtener un mayor rendimiento en la síntesis de furfural a partir de la cascarilla de arroz se muestran en el cuadro 14.

Cuadro 14 Variables y condiciones en la cual debería plantearse la síntesis del furfural en cascarillas de arroz para un proceso de optimización.

Variables	Condiciones
Tiempo	12 horas
Molienda	Muy fina, partículas pequeñas
Agitación	Velocidad media
Concentración	15 %
Volumen	10 ml por cada gramo de cáscara
Temperatura de la fuente de calor	Entre 200 a 250 °C

Campos y colaboradores [31] indican que el sistema bifásico $H_2O/CPME$ utilizando H_2SO_4 como catalizador permite la conversión selectiva de pentosas lignocelulósicas en furfural, mejorando el rendimiento total de furfural hasta valores cercanos al 100%. Adicionalmente, si se combina el efecto CPME la velocidad de reacción de formación de furfural a partir de pentosas hemicelulósicas se acelera notablemente, y se requieren tiempos de reacción mucho más cortos para producir furfural con rendimientos tan altos [32].

Durante el proceso productivo del arroz se generan varios residuos de los cuales el salvado o polvo de arroz y la cabecilla, se consideran subproductos valiosos al utilizarse como alimento animal por el valor nutritivo que poseen, mientras que la paja de arroz o restos de la planta después de la cosecha, tales como la cascarilla o cáscara de arroz, y las impurezas o residuos del secado, obtenidas en el procesamiento industrial de secado y limpieza del grano, por diversas razones no son reutilizados, lo que acarrea problemas de seguridad ambiental, que provienen de un renglón importante en el plano económico del sector agroalimentario [4]. Se estima que la actividad agroindustrial del arroz a nivel mundial genera alrededor de 731 millones de toneladas de paja arroz [33] y más de 113 millones de toneladas métricas de cáscara [34].

El incremento en la producción de arroz en muchos países del mundo ha causado un aumento en la generación de residuos agrícolas, los cuales frecuentemente se disponen mediante la quema a cielo abierto, por ser una práctica tradicional y frecuentemente utilizada por los agricultores, sin embargo, los efectos más relevantes producidos por el fuego incluyen modificaciones en las propiedades

físicas, químicas y alteraciones biológicas en el suelo, efectos que dependen de la intensidad, recurrencia y duración de la quema [35]. De allí, que cualquier alternativa para utilizar los residuos de este cultivo resulta de gran valor, tanto para procesos agroindustriales, como para el ambiente [36]; [37]; [38].

iv CONCLUSIONES

-El furfural es considerado un compuesto muy importante que se puede obtener para fortalecer la industria del petróleo de una manera ecológica, ya que se obtiene a través de desechos agrícolas tales como las tusas del maíz o las cascarillas del arroz.

-La síntesis del furfural obtenido a partir de las tusas de maíz, no es diferente a las de las cascarillas de arroz, donde la única diferencia es la materia prima. Las experiencias realizadas indicaron que se debe descartar la variable referida al tiempo prolongado como determinante, siendo la variable determinante la molienda, donde por la consistencia dura de la tusa de maíz, es difícil convertir en pequeñas partículas este material, solo alcanzando a obtener trozos muy pequeños, mientras que se obtuvieron mejores resultados con la cascarilla de arroz, debido a la facilidad para su pulverización.

-A pesar de haber tenido obstáculos con la molienda de las tusas de maíz, las condiciones son parecidas entre las materias agrícolas empleadas, determinando que la molienda y la concentración del ácido son las variables determinantes en el proceso de síntesis de furfural.

v.- REFERENCIAS

- [1] Silva Sanches Jorqueira ,D; Franzo de Lima ,L; Moya , S.F. ; Vilcocq, L ; Richard , D; Fraga , M. A; Soeiro Suppino, R.(2023). Critical review of furfural and furfuryl alcohol production: Past, present, and future on heterogeneous catalysis. Applied Catalysis A: General. Volume 665(5). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2023.119360> [Get rights and content](#)
- [2]Wondu Business and Technology Services. (2006). Furfural chemicals and biofuels from Agriculture. Sidney, Australia: Rural Industries Research and Development Corporation. 06/127, Sydney, 39. Disponible en : https://www.academia.edu/37028320/Furfural_Chemicals_and_Biofuels_from_Agriculture_A_report_for_the_Rural_Industries_Research_and_Development_Corporation. Consultado el 9 de junio 2012].
- [3] Prada, A., y Cortés, C. E. (2010). La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: Una alternativa de aprovechamiento integral. *Orinoquia*, 14(2 sup), 155–170. Disponible: <https://orinoquia.unillanos.edu.co/index.php/orinoquia/article/view/103> (Consultado el 30 de junio de 2024).
- [4] Santos Hernández, N; Miranda Caballero, A; Ipsán Pedrera, N; Ribet Molleda, Y. (2015) El vertimiento de cascarilla de arroz y el medio ambiente. *Avances*, 17(2), 165-174. Disponible en : <https://www.redalyc.org/pdf/6378/637867040004.pdf> (Consultado el 10 de junio de 2023).
- [5] Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). (2014). La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 6 pp. Disponible en : <http://www.cec.org/files/documents/publications/11405-la-quema-de-residuos-agr-colas-es-una-fuente-de-dioxinas-es.pdf> (Consultado el 11 de abril de 2024)
- [6] Enyisi, S.I; Umoh,V; Whong, C; Abdullahi,I; Alabi, O.(2014). Chemical and nutritional value of maize and maize products obtained from selected markets in Kaduna State, Nigeria. *African J Food Sci Technol*. 5(4):2141–5455. Disponible en : <https://www.interestjournals.org/articles/chemical-and-nutritional-value-of-maize-and-maize-products-obtained-from-selected-markets-in-kadunastate-nigeria.pdf> (Consultado el 17 de abril de 2024).
- [7] Hoyos Gómez, G. (Editora) (2018). Algunos componentes generales, particulares y singulares del maíz en Colombia y México. Universidad de Antioquia. Facultad de Ciencias Agrarias. Medellín. Colombia. 209 pp. Disponible: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/biogenesis/article/view/336208/20791740> (Consultado el 30 de junio de 2024).
- [8] Urango, L.A. (2018) Componentes del maíz en la nutrición humana. Escuela de Nutrición y Dietética. Universidad de Antioquia, Colombia. Disponible en : <https://revistas.udea.edu.co/index.php/biogenesis/article/view/336229/20791758>(Consulta do el 30 de junio de 2024).

- [9] Martillo Aseffe, J; Lesme Jaén, R; Oliva Ruiz, L; Martínez González, A; Silva Lora, E: E. (2019). Análisis de ciclo de vida del aprovechamiento energético de los residuos (tusa) de la cosecha de maíz (*Zea mays*) en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Tecnología Química*, 39(3). p. 655-672. Disponible en <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222461852019000300655&lng=es&nrm=iso>. accedido en 30 jun. 2024.
- [10] Red IBEROMASA. (2020). Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético. *Trabajos de investigación 2020. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED)*, 286 p. Disponible en :https://iberomasacyted.blogs.upv.es/files/2022/03/Cuadernos_Red_Iberomasa_Trab_inv_2019_k5.pdf (Consultado el 12 de mayo de 2024).
- [11] Riera, M; Mero, M; Párraga, M.A. (2024). Residuos revalorizables: una oportunidad de desarrollo manabita. *Revista ESPAMCIENCIA ISSN 1390-8103*, 15(1), 12-20. DOI: https://doi.org/10.51260/revista_espa_mciencia.v15i1.466
- [12] Vassilev, S.V; Vassileva, C.G; V.S. Vassilev, V:S. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *FUEL The science and technology of Fuel and Energy*, Vol 158: 330-350. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article>
- </abs/pii/S0016236115005578> (Consultado el 01 de abril de 2024)
- [13] García-Domínguez, M.T; García-Domínguez, J:C; Feria, M:J; Gómez-Lozano ,D:M; López , F; Díaz, M.(2013). Furfural production from *Eucalyptus globulus*: Optimizing by using neural fuzzy models. *Chemical Engineering Journal*. Volume 221 (1) 185-192. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.01.099>
- [14] Amaya, J; y W. Quiroga, W; Rincón, P; López, F. (2022) El furfural como molécula plataforma: sus aplicaciones en la actualidad y futuro prometedor. *Conference: LatinXChem*. DOI: [10.13140/RG.2.2.31976.96005](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31976.96005)
- [15] Torroba, A. (2024). Biocombustibles líquidos: fundamentos y evolución reciente. En : *Estado y perspectivas de los biocombustibles en América. Informe de situación y perspectivas de bioeconomía en América Latina y el Caribe*, IICA, 100-106. Disponible en : <file:///C:/Users/isele/Downloads/BVE24034051e.pdf> (Consultado el 7 de mayo de 2024)
- [16] Aristizábal, M.V; Parra, R.D; Pisarenko, Y.A; Cardona, C.A.(2015). Análisis de la estática para la síntesis de furfural por destilación reactiva. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, N° 13, 56-63. Disponible en : <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/1603/1259> (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [17] Liaño Abascal, N; Guerra Rodríguez, L. E; M. Pérez Colas, M; González Suárez , E. (2023). Pellets de bagazo de caña, una

- oportunidad energética. Centro Azúcar Vol 50, No. 2. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612023000200022 (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [18] Zeitsch, K. (2000). The chemistry and technology of furfural and its many by-products. Amsterdam, Elsevier. 1st Edition, Volume 13 - February 9, 2000. ISBN: 978044450351
- [19] Amaya Juárez, F.R; Flores Solano, O.D. (2011). Estudio de ingeniería sostenible para la obtención de furfural como subproducto de la agroindustria del maíz. Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de Ingeniero Químico. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de El Salvador. 160 p. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14492/17647> (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [20] Rodríguez Pareja, L. (2021) Oxidación de alcohol furfúrico, furfural y 5-hidroximetilfurfural con H₂O₂ y catalizadores de Ru heterogéneos. Trabajo Fin de Grado en Química, Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Almería, 84 p. Disponible en: <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/13218/RODRIGUEZ%20PAREJA%2c%20LUCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [21] De Queiroz Nóbrega, R. (2021). Síntese e caracterização de carvão ativado do resíduo do cacau (*Theobroma cacao*) para a remoção de furfural. Dissertação apresentada ao Mestre em Engenharia Química. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal da Paraíba. Centro de Tecnologia. 90 p. Disponible en: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/21698?locale=pt_BR (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [22] Báez Mejía, L. (2014). Obtención y caracterización del furfural a partir del Olole. Trabajo de Titulación. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Veracruzana, México. Disponible en: https://www.academia.edu/33014353/UNIVERSIDAD_VERACRUZANA_INGENIERIA_QUIMICA_EXPERIENCIA_RECEPCIONAL_NOMBRE_DE_LA_TESIS_OBTENCION_Y_CARACTERIZACION_DEL_FURFURAL_A_PARTIR_DEL_OLOTE_PRESENTA (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [23] Forero Sandoval, J.D. (2014) La Tusa del maíz: una fuente de energía renovable. Revista Universitas Científica 63: 62-65. 2. Disponible: <https://www.upb.edu.co/es/documentos/doc-tusamaiz-inv-1464115042847.pdf> (Consultado el 01 de abril de 2024).
- [24] Vargas, J; Alvarado, P; Vega-Baudrit, J; M. Porras, M. (2013). Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. Revista Científica. Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, vol. 23(1): 86-101. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Jose-Vega-Baudrit/publication/307631222_Caracterizacion_de

- [l subproducto cascarillas de arroz en busqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos/links/57cda7f408ae057987aab5e3/Caracterizacion-del-subproducto-cascarillas-de-arroz-en-busqueda-de-posibles-aplicaciones-como-materia-prima-en-procesos.pdf](#) [Consultado el 01 de abril 2024].
- [25] Cardona Ramírez, S.P; Guarín González. J.D. (2017). Síntesis de furfural. Informe de laboratorio de Química Orgánica, Código CBS 00242Revista de Química Orgánica, número 1: 1-9.
- [26]Alonso Fagúndez, N. (2017). Oxidación catalítica selectiva de furfural a anhídrido y/o ácido maleico. Memoria para aspirar al grado de Doctor. Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Departamento de Física de Materiales. 105 pp. Disponible en : https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/680457/alonso_fagundez_noelia.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Consultado el 01 de abril 2024].
- [27]Fonseca, S.D; Rodríguez, H.A; Camargo, G. (2017). Caracterización de residuos de maíz del Municipio de Ventaquemada, Colombia. Avances en Ciencias e Ingeniería, 8(2), 29-36. Disponible en : <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323652282004> [Consultado el 01 de abril 2024].
- [28] Cárdenas Rosado, M. J. Jordán Vásquez.(2023) Diseño de un proceso para la obtención de furfural como líquido orgánico portador de hidrógeno (LOHC) a partir de residuos agroindustriales. Proyecto Integrador para la obtención del título de Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. Guayaquil, Ecuador. Feria IDEAR. Disponible en : https://idear.espol.edu.ec/sites/default/files/posters/edicion_x/Poster_IngQu%C3%ADmica_Ana%20C%C3%A1rdenas-Melanny%20Jordan.pdf(Consultado el 30 de junio de 2024)
- [29] Wilches Flórez, A.M. (2011). Biocombustibles: ¿son realmente amigables con el medio ambiente? Revista Colombiana de Bioética. Vol. 6 (1), 89-102. Disponible en : <https://www.redalyc.org/pdf/1892/189219032007.pdf> (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [30] Gutiérrez-Antonio, C. (2022). Una perspectiva ética en la producción de Biocombustibles. Estancias, año 2, núm. 4, 301- 316. Disponible en : <https://revistas.uaq.mx/index.php/estancias/article/view/1054> (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [31] Campos Molina, M.J; Mariscal, R; Ojeda,M; López Granados, M. (2012). Cyclopentyl methyl ether: A green co-solvent for the selective dehydration of lignocellulosic pentoses to furfural. Bioresource Technology. Volume 126,321-327. doi: 10.1016/j.biortech.2012.09.049. Epub 2012 Sep 24. PMID: 23128237. (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [32]Campos Molina, M.J. (2015). Nuevos procesos catalíticos para la obtención de furfural. Memoria para aspirar al grado de Doctor. Universidad Autónoma de Madrid, Instituto de

- Catálisis y Petroleoquímica (CSIC). Facultad de Ciencias, 89-102. Disponible en: https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/666376/campos_molina_maria_jose.pdf (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [33] Zhao, R; Zhenya, Z; Ruiqin, Z. (2010). Methane production from rice straw pretreated by a mixture of acetic_propionic acid. *Bioresource Technology*. 101, 990-994 p. doi: 10.1016/j.biortech.2009.09.020. Epub 2009 Oct 4. PMID: 19804968.
- [34] Jun, Y; Zhang, J; He, J; Liu, Z; Yu, Z. (2009). Combinations of mild physical or chemical pretreatment with biological pretreatment for enzymatic hydrolysis of rice hull. *Bioresource Technology*, 100, 903-908. Disponible en : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.025> (Consultado el 30 de junio de 2024)
- [35] Garzón Tovar, P.A. (2023). Evaluación de alternativas de producción más limpia para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz. Monografía para optar por el título de Especialista en Gestión Ambiental. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías, especialización en Gestión Ambiental, Bogotá. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9208/4/24423-2023-1-GA.pdf> (Consultado el 30 de junio de 2024).
- [36] Añanca, P. Córdova, D. Correa, J. Palacios, E. Pascual, D. (2020). Diseño del proceso productivo de envases biodegradables a base de cascarilla de arroz y hojilla de algarrobo en la región Piura. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4619/PYT_Informe_Final_Proye
- cto_BioEnvases.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Consultado el 30 de Junio de 2024).
- [37] Aviporto. (2023). Cascarilla de arroz para cama de animales. CAMAGAN. <https://www.aviporto.com/camagan.html> (Consultado el 30 de Junio de 2024).
- [37] Lozano, C. (2020). Alternativas de usos de la cascarilla de arroz (Oriza sativa) en Colombia para el mejoramiento del sector productivo y la industria. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/33698/cllozanor.pdf?sequence=1> (Consultado el 30 de Junio de 2024).