

ESTUDIO DE LA MOLIENDA COMO PRETRATAMIENTO DE HARINA DE YUCA  
INTEGRAL PARA SU USO EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE JARABES DE  
GLUCOSA

LIZETH NATHALIE CAMPOS PUENTES  
ORLANDO ANDRÉS AGUILAR PATIÑO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2014

ESTUDIO DE LA MOLIENDA COMO PRETRATAMIENTO DE HARINA DE YUCA  
INTEGRAL PARA SU USO EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE JARABES DE  
GLUCOSA

LIZETH NATHALIE CAMPOS PUENTES  
ORLANDO ANDRÉS AGUILAR PATIÑO

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Químico

Director:  
CARLOS JESÚS MUVDI NOVA  
Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2014

*A Dios porque nunca me ha dado lo que deseo, siempre me ha dado algo mejor, me ha puesto en el lugar donde debo estar, con las personas que debo estar y me ha llenado de infinitas bendiciones.*

*A mi mamá, mi papá, mi hermana y Nicolás porque por ustedes me levanto cada día, me han enseñado a ser feliz y han hecho todo lo que soy.*

*A Orlando por permitirme compartir este camino, este triunfo y alcanzar juntos esta meta.*

*A Nania, Celeste, la Coste, Elo, Silvi, Ximena, Lina, Erika, Yeimy, Saily, Genny, Richard, William, David, Freddy, José y todas las personas que me han permitido llamarlos amigos, su amistad es un gran tesoro para mí.*

*Y finalmente, ERA GOL DE YEPES*

*Nathalie Campos*

*A Dios le agradezco todas las cosas que ha puesto en mi camino, los obstáculos y enseñanzas que me han ayudado a ser una mejor persona.*

*A mi mamá, que desde el cielo guía todos los días mis pasos y me protege.*

*A mi papá y mi hermano, que son por quienes lucho día a día, porque son las personas que más amo en este mundo y porque siempre me han enseñado a caerme y levantarme de nuevo durante 23 años.*

*A toda mi familia Aguilar y familia Patiño. Son mi orgullo.*

*A Andrea Ayala y Jose Villarreal, que han sido mi apoyo incondicional. Su amistad es muy valiosa.*

*A Nathalie por ser la mejor compañía en este proyecto y por aguantarme tanto.*

*A los primíparos de décimo, Estefy, Genny, Fredy, Fernanda, Carolina, Saily, Silvia, David, William, Richard, Eloísa, Stephie, Xime, Lina, Erika. A ustedes por hacer de esta etapa de la vida algo para siempre recordar. Los quiero mucho.*

***Orlando Andrés Aguilar Patiño***

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestros más sinceros agradecimientos a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Química por ser nuestro segundo hogar durante más de 5 años y brindarnos el espacio para adquirir nuestro conocimiento profesional.

Al Dr. Carlos Jesus Muvdi por sus enseñanzas y conocimiento, y por ser el mejor guía para desarrollar nuestro proyecto.

A todos los que integran el equipo de trabajo del CICTA, por su amistad y por brindarnos el espacio para desarrollar nuestros experimentos.

A PROMITEC S.A.S por permitirnos usar sus instalaciones. A la Dra. Blanca, el ingeniero Luis Carlos y Loufrantz, por siempre tener la mejor disposición para lo que requeríamos.

A Don Eduardo y Don Wilson, por ayudarnos en el desarrollo de nuestras prácticas.

A nuestras familias y amigos, por siempre apoyarnos y nunca dejarnos decaer.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	17
<b>1. METODOLOGÍA</b>	23
1.1. Fase 1: Adecuación de materia prima y caracterización	23
1.2. Fase 2: Efecto del tamaño de partícula en las características de los hidrolizados.	24
1.3. Fase 3: Análisis de la clarificación del hidrolizado	25
1.4. Materiales, insumos y equipos	26
1.5. Métodos experimentales y de análisis	26
<b>2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	27
2.1. Caracterización de la harina y el almidón de yuca	27
2.2. Influencia de la molienda en la composición de los retenidos	29
2.3. Influencia de la molienda en los hidrolizados y sus filtrados	33
2.4. Análisis de la clarificación en filtro prensa de hidrolizados de harina de yuca integral utilizando dos medios filtrantes.	37
<b>3. CONCLUSIONES</b>	41
<b>4. TRABAJOS FUTUROS</b>	42
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	43
<b>ANEXOS</b>	52

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Composición proximal de la harina de yuca (base seca).	19
<b>Tabla 2.</b> Composición en base seca de la harina de yuca elaborada en las instalaciones de la empresa Promitec y el laboratorio CICTA y harinas de yuca utilizadas por otros autores.	27
<b>Tabla 3.</b> Porcentaje de humedad, cenizas, proteína, contenido LHC (Lignina, hemicelulosa y celulosa) y almidón para las fracciones de harina de yuca retenidas en cada malla. (en base húmeda)	29
<b>Tabla 4.</b> Caracterización de los filtrados en filtro prensa con tela de drill super ocho y tela de lienzo, alimentación con presión a 25 psi, temperatura de filtración= 70°C e hidrólisis realizada con una concentración de 10%p/v (harina de yuca integral/agua).	39

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Tejidos de la raíz de yuca.	18
<b>Figura 2.</b> Esquema general del molino de bolas. Fuente: Peñaloza, 2008.	21
<b>Figura 3.</b> Cuadro metodológico.	23
<b>Figura 4.</b> Distribución de tamaño de partícula de la harina de yuca integral (a) y el almidón (b)	28
<b>Figura 5.</b> Apariencia de la harina de yuca elaborada.	28
<b>Figura 6.</b> Porcentaje de retención en mallas de 35, 45, 70, 120,170 y 400 mesh para 0, 1, 2,5 y 4 horas de molienda.	30
<b>Figura 7.</b> Porcentaje de ceniza a), proteína b), contenido LHC c) y almidón d) para la harina de yuca integral sin tamizar y las fracciones de harina de yuca integral retenidas en las mallas de <70, 70-120, 120-170, 170-400 y >400 mesh para tiempos de molienda de 0, 1, 2,5 y 4h (datos en Anexo 1).	32
<b>Figura 8.</b> Hidrolizado de almidón (a) y de harina de yuca integral (b), filtrado de hidrolizados de almidón (c) y de harina de yuca integral (d), restos de cáscara encontrados en algunos hidrolizados (e) y materia no hidrolizada de la fracción sin tamizar de harina de yuca sin molienda (f).	34
<b>Figura 9.</b> Viscosidad [cP] de los hidrolizados para las fracciones de harina de yuca integral retenidas en las mallas de 70, 120, 170, 400 mesh, fondo y sin tamizar, y almidón para tiempos de molienda de 0, 1, 2,5 y 4h.	35
<b>Figura 10.</b> Turbidez [NTU] de los filtrados para las fracciones de harina de yuca integral retenidas en las mallas de 70, 120, 170, 400 mesh, fondo y sin tamizar, y almidón para tiempos de molienda de 0, 1, 2,5 y 4h.	36
<b>Figura 11.</b> Variación de flujo (L) en el tiempo (min) en filtro prensa usando como medio filtrante Drill super ocho y lienzo, alimentación con presión a 25	

psi, temperatura de filtración= 70°C e hidrólisis realizada con una concentración de 10%p/v (harina de yuca integral/agua). 37

**Figura 12.** Determinación de las constantes  $\alpha$  (Resistencia específica de la torta) y  $R_m$  (resistencia del medio filtrante) para el medio filtrante de Drill super ocho y lienzo en filtro prensa, alimentación con presión a 25 psi, temperatura de filtración= 70°C e hidrólisis realizada con una concentración de 10%p/v (harina de yuca integral/agua). a) Gráfica para hallar la ecuación (1). b) Ecuaciones para el cálculo de las constantes. c) Resultados de las constantes. 38

**Figura 13.** Clarificado de hidrolizado de harina de yuca en filtro prensa con medio filtrante de Drill super ocho (izquierda) y lienzo (derecha), alimentación con presión a 25 psi, temperatura de filtración= 70°C e hidrólisis realizada con una concentración de 10%p/v (harina de yuca integral/agua). 39

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<b>Anexo A.</b> Equivalencias mesh	52
<b>Anexo B.</b> Caracterización de los retenidos para 1, 2,5 y 4 h de molienda en molino de bolas	53

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE LA MOLIENDA COMO PRETRATAMIENTO DE HARINA DE YUCA INTEGRAL PARA SU USO EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE JARABES DE GLUCOSA\*

**AUTORES:** Lizeth Nathalie Campos Puentes, Orlando Andrés Aguilar Patiño\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Harina de yuca integral, molino de bolas, filtro prensa, hidrólisis enzimática, equivalentes dextrosa, material lignocelulósico.

Los jarabes de glucosa se obtienen mediante hidrólisis enzimática de almidón. Buscando disminuir costos se desea reemplazar el almidón de yuca por harina de yuca integral en este proceso. Sin embargo, al realizar hidrólisis con harina de yuca se presenta características fisicoquímicas no deseadas en los hidrolizados como aumento de la viscosidad y de material no hidrolizado.

Se estudió la influencia de la molienda como pretratamiento a la harina de yuca integral con el fin de mejorar las características fisicoquímicas de los hidrolizados. Se trabajaron 3 fases: en la primera fase se caracterizó la harina de yuca integral elaborada, incluyendo análisis de lignina (1,81%), celulosa (4,69%) y hemicelulosa (4,00%) y se determinó la distribución de tamaño de partícula para harina y almidón, caracterizando cada fracción retenida de la harina. En la segunda fase se estudió la influencia del tiempo de molienda (1, 2,5 y 4h) en las características de los hidrolizados (Viscosidad, turbidez, materia no hidrolizada retenida -MNHR-, ED, glucosa) de harina sin tamizar y distintos tamaños de partícula o fracciones retenidas (<70, 70-120, 120-170, 170-400 y >400 mesh), encontrando las mejores condiciones para la siguiente fase. En la tercera fase se evaluó en escala piloto la clarificación de hidrolizados utilizando un filtro prensa, analizando dos medios filtrantes (Drill super ocho y lienzo).

Los resultados muestran que a partir de 1h de molienda el 70,93% de la harina de yuca integral presenta un tamaño inferior a 120 mesh (125  $\mu$ m), con lo que se logra disminuir la viscosidad de 4,5 cP a 2,4cP. Es posible obtener hidrolizados de harina de yuca integral con ED superiores a 80%. Utilizando filtro prensa y drill super ocho como medio filtrante se logra clarificar hidrolizados al 10% p/v (harina/agua).

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova Ingeniero Químico, Msc., PhD.

## ABSTRACT

**TITLE:** GRINDING STUDY AS PRETREATMENT OF INTEGRAL CASSAVA FLOUR FOR USING IN THE PRODUCTION OF GLUCOSE SYRUP \*

**AUTHORS:** Lizeth Nathalie Campos Puentes, Orlando Andrés Aguilar Patiño\*\*

**KEY WORDS:** integral cassava flour, ball mill, filter press, enzymatic hydrolysis, dextrose equivalent, lignocellulosic material.

Glucose syrups are obtained by enzymatic hydrolysis of starch. Seeking to reduce costs, it desires to replace cassava starch for integral cassava flour in this process. However, by performing hydrolysis with cassava flour undesirable physicochemical characteristics as increased viscosity and no hydrolyzate particles are presented.

The influence of the grinding was studied as a pretreatment to integral cassava flour, in order to improve the physicochemical properties of the hydrolysates. Three phases were worked: in the first phase the whole processed cassava flour was characterized, including lignin analysis (1.81%), cellulose (4.69%) and hemicellulose (4.00%) and the particle size distribution for either, starch and flour was determined, characterizing each flour fraction retained. In the second phase the influence of milling time (1, 2.5 and 4 h) in hydrolysates characteristics of unsifted flour and different particle sizes or fractions retained (viscosity, turbidity, no hydrolyzate particles -MNHR-, ED, glucose) was studied, finding the best conditions for the next phase. In the third phase was evaluated clarification hydrolyzed using a filter press in pilot scale, analyzing two filter media (Drill Super Eight and Canvas).

The results show that after 1 hour of milling the 70.93% of the integral cassava flour presents a less than 120 mesh (125 microns) in size, which is able to decrease the viscosity of 4.5 cP to 2,4cP. Hydrolysates may be obtained from integral cassava flour with an ED higher than 80%. Using filter press and drill super eight filter medium, is possible to clarify hydrolysates with a concentration of 10% w / v (flour / water).

---

\*Undergraduate project

\*\* Faculty of physicochemical engineering. School of Chemical Engineering. Research Center for Food Science and Technology. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova, Msc., PhD.

## INTRODUCCIÓN

Los jarabes de glucosa son líquidos viscosos que contienen maltosa, dextrinas y dextrosas y se clasifican según su contenido de ED (Equivalentes dextrosa; parámetro para medir la conversión de almidón en azúcares reductores en el proceso de hidrólisis (Becerra, 2011)).

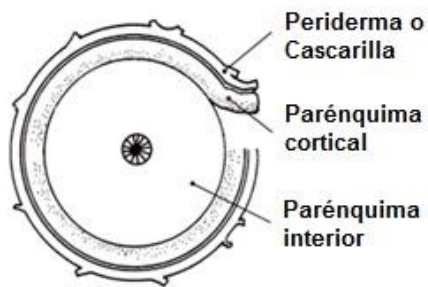
Actualmente existe una preferencia por estos jarabes sobre productos tradicionales como el azúcar (Aguilar *et al.*, 2010), pues son usados en la industria alimenticia para mejorar propiedades como dulzura, brillo, textura y viscosidad (Arango, 2008). También son usados para la producción de jarabes fructosados por su poder edulcorante 2 veces superior al azúcar. Estos jarabes contienen menos calorías (Salcedo *et al.*, 2009) (Oyola, 2006) lo que contribuye a la disminución de problemas de salud (Hernández *et al.*, 2008). Además, los jarabes de glucosa se usan en la industria farmacéutica para la producción de jarabes de maltosa, usados en la fabricación de antibióticos, vacunas y maltitol (Gaouar *et al.*, 1998).

El almidón es la materia prima utilizada en la obtención de los jarabes de glucosa. Este se encuentra en semillas de cereales y leguminosas, tubérculos, raíces, frutas y hojas (Aristizabal & Sánchez, 2007) (Alarcón & Dufour, 1998). El almidón se presenta en unidades semicristalinas (gránulos) características en cuanto forma, tamaño y estructura según su fuente de obtención (Rodríguez *et al.*, 2006). Está conformado por dos biopolímeros: la amilosa y la amilopectina. La primera es un polisacárido lineal de glucosa unidas por enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1-4) y la segunda es un polisacárido formado tanto por enlaces  $\alpha$  (1-4) como por enlaces  $\alpha$  (1-6) (Hernández *et al.*, 2008) (Rodríguez *et al.*, 2006) (Cobana, 2007). Dependiendo de su fuente la relación en porcentaje amilosa/amilopectina varía entre 10 y 44% (Freitas *et al.*, 2003) (Aryee *et al.*, 2005).

El 85% del almidón se obtiene del maíz (Johnson *et al.*, 2009), pero debido a su creciente demanda se han evaluado otras fuentes de obtención como el trigo (Bettge *et al.*, 2000), el arroz (Aristizabal *et al.*, 2013) la avena (Aquino *et al.*,

2006), el frijol (Corzo *et al.*, 2000), el plátano (Hernández *et al.*, 2008), la papa (Alvis *et al.*, 2008), el ñame y la yuca (Freitas *et al.*, 2003). La yuca (*Manihot Sculenta Crantz*) es la segunda fuente más usada en la obtención del almidón después del maíz (Aristizabal & Sánchez, 2007) por el alto contenido de este compuesto (Leaes *et al.*, 2013) (Benítez *et al.*, 2008) (Aryee *et al.*, 2006). En la Figura 1 se observan los tejidos que conforman la raíz de yuca. El almidón se encuentra almacenado esencialmente en la parénquima interior o pulpa (correspondiendo al 50 a 70% del peso seco de este tejido (Leaes, 2013)). Los demás componentes de la raíz son fibra de celulosa (1 a 2%), cenizas o minerales (1,5 a 2,5%), grasas (0,5 a 1%) y proteínas (2%), que están contenidos principalmente en el parénquima cortical y la cascarilla (Alarcón & Dufour, 1998).

**Figura 1. Tejidos de la raíz de yuca.**  
Fuente: Alarcón & Dufour, 1998



La yuca presenta importantes ventajas gracias a su adaptación a suelos pobres en nutrientes, resistencia a enfermedades y rendimiento del cultivo (Giraldo, 2006) (Alarcón & Dufour, 1998). En Colombia para el periodo 2000-2009 se encontraron rendimientos de producción en un rango de 7,4 a 14,0 Ton/Ha (Aguilera, 2012). Debido a

estas ventajas, en la última década la yuca ha sido temática de investigaciones en campos como los biocombustibles, fibras poliméricas, cosméticos y sustitutos de grasa (Flores, 2004).

El proceso central para la obtención de jarabes de glucosa es la hidrólisis, esta puede ser ácida o enzimática; teniendo esta última mayores rendimientos respecto al contenido ED (superior al 95%) (Singh, 1998). La hidrólisis por vía enzimática consta de dos etapas, la licuefacción y la sacarificación, en las cuales se usan  $\alpha$ -amilasas y glucoamilasas para romper los enlaces glucosídicos del almidón (Leaes *et al.*, 2013) (Pontoh & Low, 1995) (López & Hall, 1997) (Johnson *et al.*, 2009) (Morales *et al.*, 2007) (Salcedo *et al.*, 2009).

Después de la hidrólisis continúa la clarificación, con el fin de remover impurezas y material no hidrolizado. Tradicionalmente se utilizan filtros prensa o filtros rotatorios al vacío con tierras diatomeas para ayudar en la filtración y se realiza en varias etapas (Acevedo & Parra, 2013) (Mera & Carrera, 2005).

El uso del almidón de yuca en este proceso se ve restringido por la poca oferta comercial de esta materia prima, que ocasiona aumentos en los precios de compra, y por su manufactura, que demanda un alto consumo de agua y energía (Breuninger *et al*, 2009). Una fuente alternativa de almidón puede ser la harina de yuca, porque presenta precios inferiores al almidón (1 kg de harina se adquiere por \$569,5 mientras que 1kg de almidón por \$2158,7 (DANE, 2011) (Fundación Mitsubini, 2000)) debido a que su proceso de obtención requiere pocas etapas y equipos (Charoenkul *et al.*, 2011). Incluso se puede pensar en una harina con menor grado de procesamiento adquirida directamente de los campesinos de la región (molida y secada), que disminuiría aun más el precio de venta (acercándose al precio de la yuca lavada sin procesar 1kg= \$380 (DANE, 2011)) pero haría que se encuentren restos de cáscara y corteza (harina de yuca integral) presentando una composición como la mostrada en la Tabla 1.

Al utilizar esta harina integral en el proceso de hidrólisis se presentarán inconvenientes como la alta viscosidad y el contenido de sólidos no hidrolizados (López & Hall, 1997); problemas ocasionados por la presencia de compuestos considerados inhibidores enzimáticos (Sánchez, 2013) como fibra (3,4%), proteínas (1,56%), minerales (2%) y hemicelulosa (1,45%).

**Tabla 1. Composición proximal de la harina de yuca (base seca).**

**Fuente: Ceballos & de la cruz, (2002).**

	Almidón	Proteína cruda	Extracto etéreo	Ceniza	Fibra detergente neutra	Fibra detergente ácida	Hemicelulosa
<b>Contenido (%)</b>	92,40	1,56	0,88	2,00	3,40	1,95	1,45

Solo se encontró el estudio de Sánchez (2013) sobre el uso de la harina de yuca en la producción de jarabes de glucosa. Otros trabajos como el de López & Hall (1997) y Castaño *et al.* (2011) utilizaron harina de yuca sin cáscara en proceso de

hidrólisis con propósitos diferentes. El primero para el estudio y optimización de variables de operación en la sacarificación con reactor de membranas de fibra hueca. Y el segundo para el estudio del proceso de producción de etanol integrando las etapas de hidrólisis enzimática (licuefacción y sacarificación) y fermentación. En estos trabajos los autores encontraron que realizando un pretratamiento adecuado a la harina se mejoraban los resultados obtenidos; como por ejemplo, leve disminución de la viscosidad y menor contenido de materia no hidrolizada (Sánchez, 2013), aumento de la actividad enzimática en la sacarificación (López & Hall, 1997) y mayor rendimiento en el proceso de obtención de etanol (Castaño *et al.*, 2011).

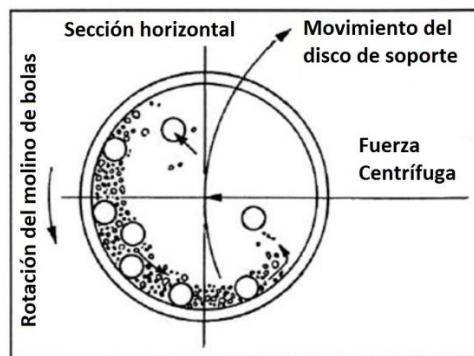
De acuerdo a esto, se podría considerar que al aplicar un pretratamiento a la harina de yuca para la obtención de jarabes de glucosa se podrían superar los inconvenientes que se presentan al trabajar con esta materia prima.

En la investigación de Sánchez *et al.*, (2010) se buscaba producir bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica (ésta presenta una fuerte estructura hemicelulosa-celulosa-lignina). Los autores evaluaron diferentes tipos de pretratamiento y encontraron que la molienda permite un mayor rendimiento de la hidrólisis. Esto es posible por la fractura y exposición de la celulosa, que aumenta la superficie específica y reduce el grado de polimerización. También, Tester *et al.*, (1994) utilizaron un molino de bolas para producir fractura en almidones de maíz y trigo, y demostraron que esta molienda convirtió el 66% del almidón en un material más digerible por enzimas.

Debido a estos resultados, el pretratamiento planteado en este trabajo fue la molienda. Se espera que los gránulos de almidón en la harina de yuca se fracturen facilitando, al igual que ocurre en la celulosa, su interacción con las enzimas. Además Bettge *et al.*, (2000) demuestran que la susceptibilidad a la fractura mecánica del almidón no depende de su fuente sino del contenido de amilosa. Por tanto la molienda podría tener una influencia significativa sobre el almidón de yuca al igual que en los almidones de maíz y trigo.

La molienda es una operación de reducción de tamaño parecida a la trituración pero maneja tamaños de partícula menores a 1 in. Un equipo utilizado para este proceso es el molino de bolas, que consta de un cuerpo cilíndrico de eje horizontal donde se encuentran bolas libres (fabricadas en acero al carbono o inoxidable). Estas bolas al girar crean un efecto de cascada que impacta el material que se encuentra en la cámara mediante fricción (Industrias I, 2012) (Peñaloza, 2008). En la Figura 2, se observa el corte transversal del molino de bolas, el movimiento de los cuerpos molidores (bolas), el material y la fuerza centrífuga generada por el movimiento rotatorio.

**Figura 2. Esquema general del molino de bolas. Fuente: Peñaloza, 2008.**



Según Flores, (2004) los gránulos de almidón pequeños pueden ser hidrolizados más rápidamente que los gránulos más grandes. El tamaño de los fragmentos tiende a disminuir con el incremento del tiempo de molienda. Este tiempo no puede ser desmedido ya que se presentaría contaminación del sustrato (debido al desgaste de las bolas del molino que se va a usar), pero tampoco puede ser muy corto de manera que no se logre un tamaño de partícula uniforme. Además se encontró que una mayor fractura en los gránulos del almidón disminuye la viscosidad de la pasta formada. Es importante señalar que esta molienda no es capaz de alterar las fibras y la cáscara (Romanoff & Rodríguez, 1986) lo cual podría incidir en las características del hidrolizado.

Un proceso que complementa a la molienda, es el tamizado. Con este procedimiento se realiza una separación adecuada de las partículas de un material según su tamaño usando cribas o mallas. Romanoff & Rodríguez, (1986)

encontraron que al usar cribas de alrededor de 120 mesh se logra una separación eficiente.

El proceso para la obtención de jarabes de glucosa no estaría completo sin la etapa de clarificación. El objeto de la clarificación del hidrolizado de almidón es remover sólidos suspendidos, proteínas y grasas que consisten en una pequeña cantidad de almidón no hidrolizado y enzimas. Este proceso se realiza en varias etapas para garantizar la mayor retención (Mera & Carrera, 2005).

Para la clarificación del hidrolizado de harina de yuca, una primera etapa de clarificación es la remoción de los sólidos gruesos. Castellanos *et al*, (2004) estudió cuatro opciones en esta etapa: Floculación, centrifugación, filtración y sedimentación. Encontrando los mejores resultados utilizando la filtración. A nivel industrial esta etapa puede llevarse a cabo utilizando filtros prensa, entre otros.

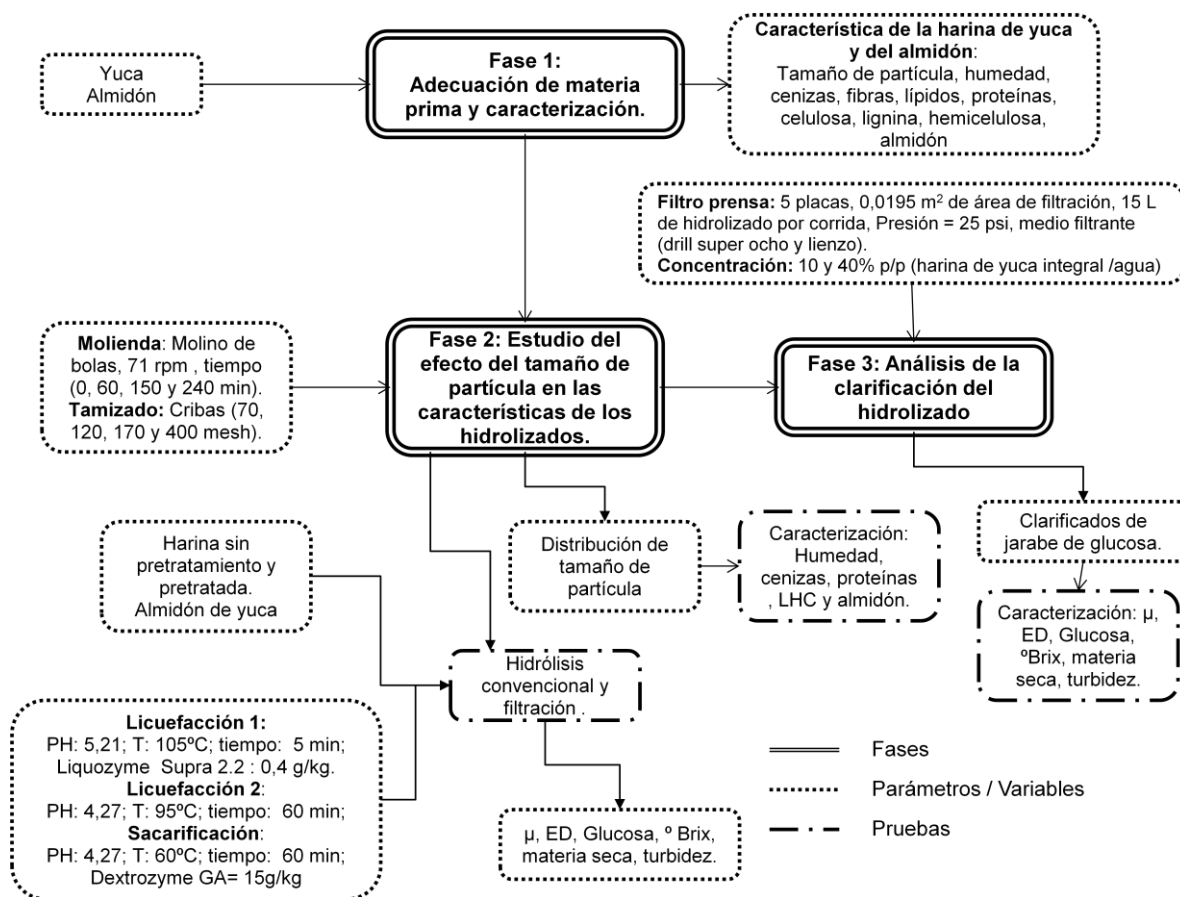
Un filtro prensa consta de un conjunto de placas que forman una serie de cámaras o compartimentos donde se puede acoplar un medio filtrante (como una lona) con el fin de retener sólidos. Este tipo de filtración se caracteriza por ser económica, versátil, rápida y permite trabajar con líquidos viscosos. (Mc Cabe *et al*, 1998) (Coulson & Richardson, 1981).

Los objetivos del presente trabajo, serán estudiar el efecto de la molienda en las características de los hidrolizados de harina de yuca integral, con el fin de evaluar un posible cambio del almidón por harina de yuca en el proceso de producción de jarabes de glucosa. El proceso de hidrólisis no se evaluará y se trabajará con los protocolos de hidrólisis usados con el almidón.

Este trabajo de investigación hace parte del proyecto titulado: Aumento de la productividad de concentrados de jarabes de glucosa obtenidos a partir de hidrolizados de almidón de yuca por métodos no convencionales con código 1102-5022-7720, Colciencias-UIS-Promitec S.A.S.

# 1. METODOLOGÍA

Figura 3. Cuadro metodológico.



## 1.1. Fase 1: Adecuación de materia prima y caracterización

A partir de yuca fresca se elaboró harina de yuca integral (con cáscara) teniendo en cuenta el proceso propuesto por Alvarado & Cornejo, (2009). La yuca se lavó, se cortó en trozos y se llevó a un equipo rallador (Promitec S.A.S) para obtener una pasta húmeda de yuca. A continuación, la pasta se secó en una estufa (Laboratorio de alimentos, CICTA) entre 50 y 60 °C por 72 h aproximadamente para obtener la harina de yuca integral.

La composición de la harina depende de la variedad o tipo de yuca utilizada en cada caso para su elaboración (Charoenkul *et al.*, 2011). Por tal motivo se realizó la caracterización de la harina de yuca integral sin pretratamiento. Por otro lado la caracterización permite tener un punto de referencia sobre la calidad de esta

materia prima. Se caracterizó en contenido de humedad, almidón, cenizas, fibra, lípidos, proteínas, contenido LHC, celulosa, lignina y hemicelulosa.

De igual manera como punto de referencia para la siguiente fase, la harina sin pretratamiento fue tamizada y caracterizada en cada fracción retenida en humedad, cenizas, proteína, contenido LHC (suma de lignina, hemicelulosa y celulosa) y almidón.

## 1.2. Fase 2: Efecto del tamaño de partícula en las características de los hidrolizados.

Una variable que influye en las características de los hidrolizados es el tamaño de partícula del sustrato empleado. Se usó un molino de bolas cerámicas (Laboratorio de procesos de la Escuela de Ing. Química UIS) a 71rpm (velocidad de rotación disponible). Se emplearon tiempos de molienda de 1, 2,5 y 4 h (según Flores, 2004 el efecto de la molienda comienza a partir de 1 h).

La separación por tamaño de partícula de la harina después de la molienda se realizó por tamizado. Se usaron cribas o mallas de 34, 45, 70, 120, 170 y 400 mesh (según Romanoff & Rodríguez, 1986 y pruebas preliminares) (para equivalencias en  $\mu\text{m}$  ver Anexo A). Se caracterizó cada muestra de la misma forma que las fracciones retenidas de harina de yuca integral en la fase 1.

Cada muestra obtenida (para cada distribución de tamaño y para la harina de yuca integral sin tamizar obtenida por tiempo de molienda) se hidrolizó siguiendo el procedimiento descrito por Tejeda *et al.*, (2011), Bettin & Quintero, (2010) y las fichas de aplicación de las enzimas utilizadas. Las hidrólisis se realizaron en *batch*, a una concentración de 10% p/v de harina de yuca/agua en 200 ml de agua destilada. Para ajustar el pH se emplearon soluciones de HCl 2N y NaOH 2N. Las condiciones de operación utilizadas fueron:

- Primera licuefacción: enzima= Liquozyme supra2.2, temperatura= 97 °C, pH= 5,2, tiempo de reacción= 5 min, relación enzima/sustrato=0,4 g/kg.
- Segunda licuefacción: enzima= Liquozyme supra2.2, temperatura= 95 °C, pH= 4,27, tiempo de reacción= 60 min, no se agrega más enzima, desactivación= pH <3,0 durante 30 min.

- Sacarificación: enzima=Dextrozyme GA, temperatura= 60°C, pH= 4,3, tiempo de reacción= 60 min, relación enzima/sustrato= 15 g/kg, desactivación= pH <3,0, temperatura= 90°C durante 60min.

Las hidrólisis se realizaron por duplicado. Los hidrolizados resultantes en esta fase se llevaron al mismo peso (225 g) y fueron caracterizados en viscosidad, °Brix, pH, materia seca, turbidez. De igual manera se realizó una filtración (por gravedad) utilizando como medio filtrante lienzo de 100 mesh (Alarcón & Dufour, 2001). El tiempo de filtración fue de 15 min (según pruebas preliminares).

Los filtrados resultantes se caracterizaron en contenido ED, °Brix, pH, materia seca, glucosa y turbidez. La torta filtrante resultante se caracterizó en materia seca y se analizó como materia no hidrolizada retenida.

Los resultados en esta fase se compararon con los resultados de la caracterización de los hidrolizados de la harina de yuca sin tratar y del almidón.

### 1.3. Fase 3: Análisis de la clarificación del hidrolizado

Para esta fase se realizaron hidrólisis siguiendo el mismo procedimiento que la fase anterior pero con 30L de solución al 10% p/v (harina de yuca integral/agua) en cada reactor. Estas hidrólisis se realizaron en dos reactores (Promitec S.A.S), con calentamiento con vapor y capacidad de 50L cada uno. Se escogió la muestra de harina de yuca pretratada con los mejores resultados de la etapa anterior para realizar esta fase. Los hidrolizados resultantes fueron caracterizados en viscosidad, °Brix, pH, materia seca, turbidez.

Los hidrolizados obtenidos fueron filtrados con un filtro prensa de 5 placas, utilizando 14 L de hidrolizado por corrida y una presión de alimentación de 25 psi (se realizaron 4 filtraciones con los 60L de hidrolizado). Se emplearon dos medios filtrantes (drill súper ocho y lienzo) con duplicado; de los cuales se escogió el que permitiera tener mejores resultados.

Trabajar al 10% p/v de concentración (harina de yuca integral/agua) implica evaporar gran cantidad de agua en la etapa de concentración, y por tanto un gasto considerable de energía. Por tanto, se realizaron pruebas aumentando la

concentración de harina de yuca hasta un 40% p/v bajo las mismas condiciones anteriormente mencionadas.

Los filtrados obtenidos se caracterizaron en contenido ED, °Brix, pH, materia seca, glucosa, turbidez. De igual manera la torta filtrante resultante se caracterizó en materia seca y se analizó como materia no hidrolizada retenida.

#### 1.4. Materiales, insumos y equipos

Raíces de yuca suministradas por Promitec S.A.S. Éter etílico ACS. Alcohol etílico absoluto 99,5%. Ácido perclórico ACS. Bencina de petróleo. Ácido nítrico concentrado. Ácido sulfúrico, 95-98%. Ácido acético glacial 100%. Clorito de sodio 99%. Tolueno 100%. Enzimas liquozyme supra 2.2x y dextrozyme GA, suministradas por Novozymes, Tela de lienzo 100 mesh y Drill super ocho. Equipo rallador en acero inoxidable 316, con cilindro rallador de 6", tolva alimentadora, soporte para tolva, motor de rallador de 6" y motor 1HP a 1800 RPM (ubicado en Promitec S.A.S). Estufa, pH-metro Hanna HI 991001. Refractómetro de mano Fisher No 13 964 70C de 0 a 90%. Baño termostataado, WWR Scientific Products (ubicados en el Laboratorio de alimentos, CICTA). Molino de bolas cerámico, Paul O. Abbe. Tamizador, W.S Tyler. Tamices, Sargent Welch Scientific Company. Filtro prensa, Seitz Werke. Turbidímetro, marca HACH 2100Q (ubicados en el Laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química).

#### 1.5. Métodos experimentales y de análisis

En el laboratorio de alimentos (CICTA) se realizaron los análisis de humedad (A.O.A.C 925,10), ceniza (A.O.A.C 923,03), fibra cruda (A.O.A.C 930,20), lípidos (A.O.A.C 920,80), proteína (A.O.A.C 920,87), almidón (NTC 456), contenido en LHC (lignina-celulosa-hemicelulosa) (Rodríguez, 1978), celulosa (ASTM 1977b), lignina (ASTM 1977) y holocelulosa (Rodríguez, 1978). En los laboratorios de Promitec S.A.S se realizaron: ED por el método Lane y Eynon (Moresco & Sansón 2008) y el método DNS (ácido dinitrosalicílico) (Miller 1959) y glucosa por el método enzimático colorimétrico propuesto por Trinder (1969).

## 2. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 2.1. Caracterización de la harina y el almidón de yuca

En la Tabla 2 se presenta el análisis bromatológico de la harina de yuca utilizada en el presente trabajo y la composición de harina de yuca trabajada por diferentes autores. El porcentaje de almidón (81,88%) se encuentra dentro de los valores presentados por Aryee *et al.*, (2005) (67,92 a 88,11%) y 2% debajo del reportado por Buitrago *et al.*, (2001); ambas referencias no reportan desviaciones. Las diferencias en el contenido de almidón se deben a la variedad de yuca utilizada en cada caso (Charoenkul *et al.*, 2011) y la presencia de la cáscara en las muestras.

La mayor diferencia se presentó en el porcentaje de hemicelulosa. Este es superior a la reportado por Buitrago *et al.*, (2001) y Ceballos & De la Cruz, (2002) (1,45%). Sin embargo, en este trabajo se obtuvo una desviación considerable para el porcentaje de LHC que afecta directamente el contenido de hemicelulosa y puede explicar esta diferencia. Es importante mencionar que a la fecha no se han encontrado en la literatura reportes de contenido de celulosa, lignina y hemicelulosa para harina de yuca integral.

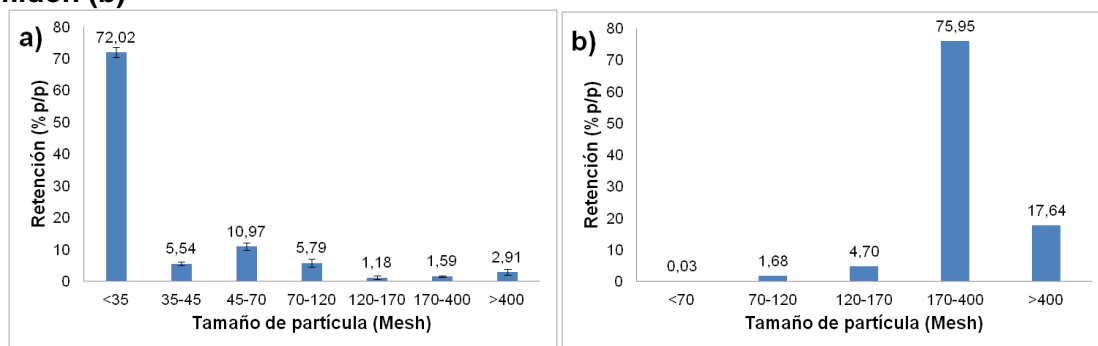
Por otro lado, la harina integral presenta un porcentaje de humedad de 7,98 +/- 0,22%, un buen parámetro de calidad teniendo en cuenta que si este es superior al 12% se favorece el crecimiento microbiano (Aryee *et al.*, 2005).

**Tabla 2. Composición en base seca de la harina de yuca elaborada en las instalaciones de la empresa Promitec y el laboratorio CICTA y harinas de yuca utilizadas por otros autores.**

Componentes	Autores	Aryee <i>et al.</i> , (2005) (Para harina de yuca sin cáscara)	Buitrago <i>et al.</i> , (2001) (Para harina de yuca con cáscara)
Almidón	81,88 ± 0,09	67,92 a 88,11	83,80
Ceniza	2,34 ± 0,12	1,00 a 2,84	3,00
Proteína	1,6 ± 0,01	0,87 a 4,59	2,90
Lípidos	0,93	ND	1,04
Fibra	2,00	0,81 a 2,31	5,10
Contenido LHC	12,58 ± 3,87	ND	ND
(Lignina)	1,81 ± 0,65	ND	ND
(Hemicelulosa)	4,69 ± 1,78	ND	1,10
(Celulosa)	4,00 ± 1,95	ND	ND

Igualmente, se determinó la distribución de tamaño de partícula para la harina y el almidón de yuca (Figura 4) y se caracterizaron las fracciones de harina retenida en cada malla (se llamarán retenidos). Se observa que el almidón presenta el mayor porcentaje de retención en la malla de 400 mesh (37  $\mu\text{m}$ ); un tamaño superior al encontrado por Tester (1994) para el maíz (pico en 13  $\mu\text{m}$ ).

**Figura 4. Distribución de tamaño de partícula de la harina de yuca integral (a) y el almidón (b)**



**Figura 5. Apariencia de la harina de yuca elaborada.**



El porcentaje de retención de la harina de yuca integral elaborada en la malla de 35 mesh es del 72,02% (para una harina comercial el porcentaje obtenido fue del 35,27% - obtenido experimentalmente-). Esto se debe a los grumos generados durante el secado (Figura 5) producto de los equipos y el método empleado en su elaboración.

En la Tabla 3 se presenta la composición para la fracción de harina retenida en cada malla. El almidón presentó una pureza del 99,95%, por tanto, no se caracterizó la fracción retenida en cada malla.

De esta tabla se observa que la humedad presenta valores similares a la harina sin tamizar (7,5 - 8,6%). El porcentaje de cenizas y proteína disminuye levemente con el tamaño de partícula (<1% en ambos casos) y en el caso de LHC (lignina,

hemicelulosa y celulosa) se observa una disminución mayor (menor diferencia= 9,08%). Estos componentes están asociados al periderma o cascarilla de la raíz de yuca (Rosales & Tang, 1996) (Buitrago *et al.*, 2001), el cual visualmente se observa en mayor cantidad en las partículas retenidas en la malla de 70 mesh. Finalmente, para el contenido de almidón no se presenta una tendencia pero es de señalar que en el fondo se encontró el mayor porcentaje, asociado a la disminución de los demás componentes (cenizas, proteínas y LHC) en este rango de tamaño.

**Tabla 3. Porcentaje de humedad, cenizas, proteína, contenido LHC (Lignina, hemicelulosa y celulosa) y almidón para las fracciones de harina de yuca retenidas en cada malla. (base húmeda)**

Tamaño	Humedad	Cenizas	Proteína	LHC	Almidón
Sin tamizar	7,68 ± 0,22	2,80 ± 0,05	1,74 ± 0,01	9,8 ± 0,46	81,88 ± 0,09
<70	7,49 ± 0,11	2,59 ± 0,03	1,97 ± 0,00	16,61 ± ND	87,08 ± 0,47
70-120	7,94 ± 0,04	2,24 ± 0,02	1,9 ± 0,03	12,12 ± ND	86,38 ± 0,74
120-170	8,06 ± 0,64	1,99 ± 0,01	1,35 ± 0,03	5,59 ± ND	87,81 ± 0,72
170-400	8,53 ± 0,21	2,09 ± 0,03	1,63 ± 0,03	6,54 ± ND	86,25 ± 0,79
>400	7,81 ± 0,19	1,67 ± 0,04	1,03 ± 0,01	2,18 ± ND	89,59 ± 1,16

Un mayor contenido de almidón en la harina conlleva a mejores resultados en la hidrólisis del mismo (López & Hall, 1997), por lo tanto, al utilizar la harina obtenida en el fondo se puede esperar una mejora en la hidrólisis. Sin embargo, el porcentaje en peso de harina obtenida en el fondo es de 2,91% del total de la muestra (Figura 4a); una cantidad significativamente menor que hace poco viable esta solución.

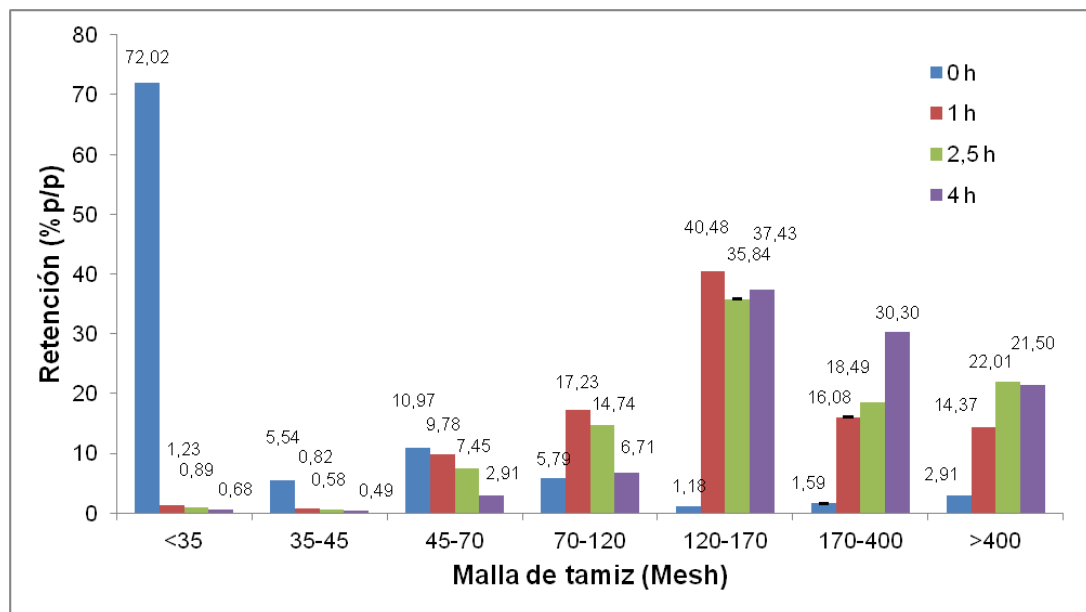
## **2.2. Influencia de la molienda en la composición de los retenidos**

Cada molienda se realizó con una carga de 700 g (capacidad del molino) de harina de yuca integral. En la Figura 6 se presentan los porcentajes de retención en cada malla para los diferentes tiempos de molienda.

Según la figura, la molienda generó un cambio significativo en la distribución de tamaño de partícula, entre la harina sin pretratamiento y los tres tiempos de molienda realizados. En las fracciones retenidas en las mallas de <35, 35-45 y 45-

70 mesh ocurre una disminución de retención, siendo más representativos los dos primeros retenidos a partir de 1 h de molienda (disminución de 72% a <1% y de 5,54% a <1% en peso, respectivamente). En los siguientes retenidos (70-120, 120-170, 170-400 y >400) aumentó la cantidad de harina. Se puede concluir que el molino de bolas trabajado (78 bolas cerámicas, 71 rpm y 700 g de carga de harina de yuca integral) logra llevar por debajo de 120 mesh al 70,93% en peso de la harina a partir de 1h de molienda (76,34% para 2,5h y 89,23% para 4h). Tester *et al.*, (1994) encontraron que disminuir el tamaño de partícula del almidón de maíz (13  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$  aproximadamente) aumenta la susceptibilidad del almidón a ser hidrolizado, por tanto, se pueden esperar resultados positivos al disminuir de >500  $\mu\text{m}$  (35 mesh) a <125  $\mu\text{m}$  (120 mesh).

**Figura 6. Porcentaje de retención en mallas de 35, 45, 70, 120,170 y 400 mesh para 0, 1, 2,5 y 4 horas de molienda.**



Para los análisis y pruebas posteriores los retenidos de <35, 35-45 y 45-70 mesh se agruparon en el retenido de <70 mesh debido a la poca cantidad obtenida de muestra. Es importante mencionar que en estos retenidos se observó principalmente periderma o cáscara de la yuca.

Al igual que para las fracciones retenidas de harina de yuca sin pretratamiento, se caracterizó cada retenido para los diferentes tiempos de molienda, en porcentaje

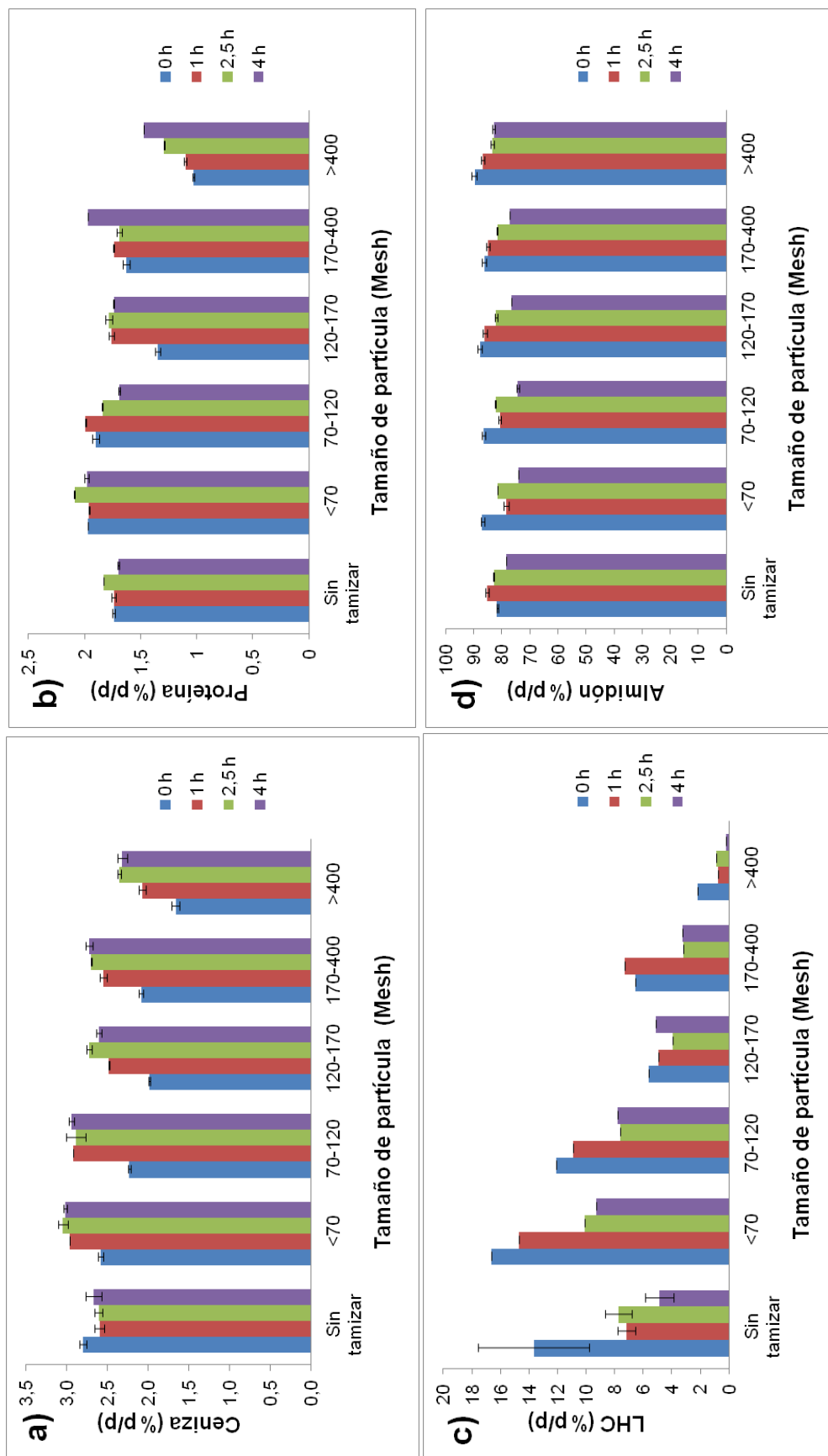
de humedad, cenizas, proteína, LHC y almidón. La humedad en todos los retenidos se encontró entre 5,32% y 8,53%, y no presentó tendencia. Las variaciones que se encuentran se pueden asociar a factores ambientales, altamente influyentes debido al carácter higroscópico de la harina de yuca (Silva *et al.*, 2002).

En cada tiempo de molienda los porcentajes de ceniza y proteína (Figura 7a y Figura 7b) disminuyen a menor tamaño de partícula. También se observa que los porcentajes de ceniza a partir de la malla de 120-170 mesh tienden a aumentar con el tiempo de molienda. Es importante recordar, que tanto las cenizas como la proteína son encontradas con mayor proporción en la cáscara de la yuca (Rosales & Tang, 1996) (Buitrago *et al.*, 2001), componentes que afectarán luego las condiciones de hidrólisis.

El material lignocelulósico (LHC) se caracteriza por el color marrón, lo cual indica que está presente en la cascarilla de la yuca (Rosales & Tang, 1996) (Jingjing, 2011) (Mohd *et al.*, 2013). En la Figura 7c se puede ver que los mayores porcentajes de LHC se encuentran en los retenidos inferiores a 170 mesh. Lo anterior indica que el molino de bolas aunque disminuye el tamaño de partícula del material lignocelulósico, no lo hace de la misma manera que disminuye el tamaño de partícula del almidón. Por este motivo, visualmente se observa mayor contenido de cáscara en las mallas de <35 y 35-45mesh.

Debido a que todos los análisis de LHC requerían una cantidad considerable de reactivos solo se realizaron duplicados a las muestras de harina sin tamizar. En ellos se evidencia una alta desviación debido a que los análisis se realizan en varias etapas de separación, afectando la sensibilidad del método; en especial en materiales con bajo porcentaje de lignina, celulosa y hemicelulosa como la harina utilizada en el presente trabajo.

Figura 7. Porcentaje de ceniza a), proteína b), contenido LHC c) y almidón d) para la harina de yuca integral sin tamizar y las fracciones de harina de yuca integral retenidas en las mallas de <70, 70-120, 120-170, 170-400 y >400 mesh para tiempos de molienda de 0, 1, 2,5 y 4h (datos en Anexo A).



Con la molienda se logró aumentar la fracción de harina retenida en las mallas superiores a 70-120 mesh (Figura 6). Sin embargo, esta molienda también disminuyó el porcentaje de almidón en estas mallas. Por ejemplo, el porcentaje de almidón en la malla >400 mesh disminuyó de 89,59% (sin molienda, Tabla 3) a 86,81, 83,35 y 82,93% con 1, 2,5 y 4 h de molienda, respectivamente (Figura 7d). Por tanto, a mayor tiempo de molienda el porcentaje de almidón en las mallas 120-170, 170-400 y >400 mesh disminuye.

Aunque la molienda disminuye el porcentaje de almidón en el retenido >400 mesh, este descenso no supera el 7% para 4 h de molienda. Todas las muestras (sin tamizar y fracciones retenidas en 0, 1, 2,5 y 4h de molienda) superan el 80% p/p de almidón. De igual manera la molienda también disminuyó el tamaño de los gránulos de la harina (esencialmente constituida por almidón) con lo que se espera obtener buenas características de los hidrolizados.

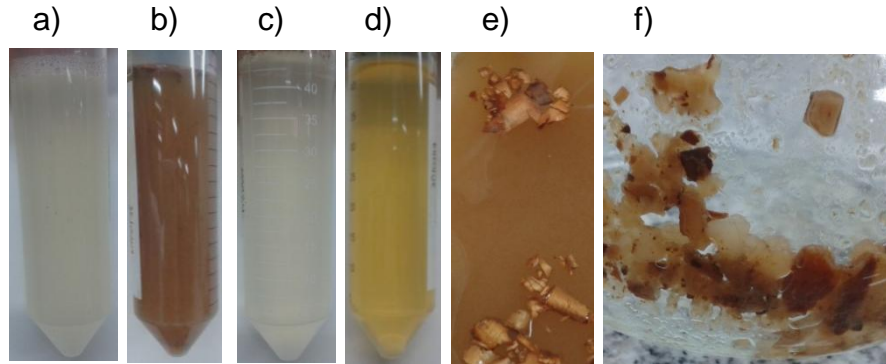
(Los valores utilizados en la construcción de la Figura 7 y la humedad de todas las muestras se encuentran especificados en el Anexo 2).

### **2.3. Influencia de la molienda en los hidrolizados y sus filtrados**

Se realizaron hidrólisis al almidón (como referencia), a la harina sin pretratamiento, a la harina sin tamizar para los tres tiempos de molienda y a 5 tamaños de partícula o retenidos (<70, 70-120, 120-170, 170-400 y >400 mesh) para 0, 1, 2,5 y 4 h de molienda. En total se realizaron 25 hidrólisis con duplicado, todas a las mismas condiciones.

El hidrolizado de almidón es de apariencia grisácea (Figura 8a) mientras que el hidrolizado de harina de yuca (Figura 8b) presenta una pigmentación marrón. Por otro lado, mientras que el filtrado de almidón (Figura 8c) también es grisáceo el filtrado de harina de yuca (figura 8d) es de pigmentación amarilla, sin embargo ambos son traslúcidos.

**Figura 8. Hidrolizado de almidón (a) y de harina de yuca integral (b), filtrado de hidrolizados de almidón (c) y de harina de yuca integral (d), restos de cáscara encontrados en algunos hidrolizados (e) y materia no hidrolizada de la fracción sin tamizar de harina de yuca sin molienda (f).**



La mayor diferencia visual se presenta en los hidrolizados de las fracciones de harina retenidas en malla <70 mesh y de la harina de yuca sin moler y sin tamizar (Figura 8e y 8f, respectivamente). En ellos se observan restos de cáscara y trozos considerablemente grandes de material no hidrolizado.

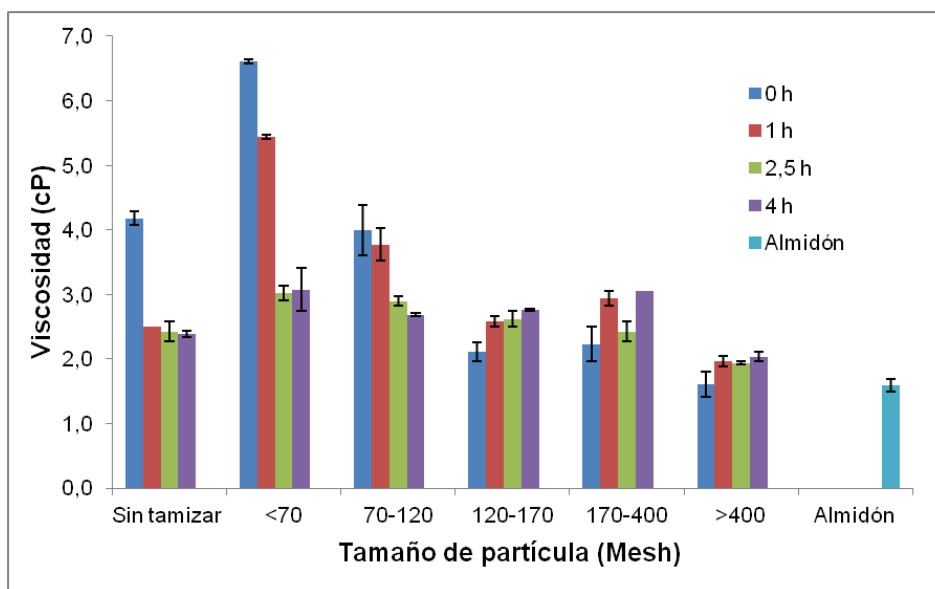
Al realizar las hidrólisis con un 10% p/v (solución de harina de yuca/agua, sin tener en cuenta el contenido de humedad de la harina) se obtuvo entre 7,0 y 8,5 °Brix para las muestras de harina y 7,75 +/- 0,25 °Brix para el almidón. Estos resultados son similares a los reportados por Acevedo & Parra, 2013, quienes obtuvieron a partir de hidrólisis de almidón al 20% p/v (almidón/agua) entre 15,28 y 17,2 °Brix. Por otro lado, Tejeda *et al.*, (2011) reportaron para hidrólisis al 40% p/v (almidón/agua) un hidrolizado a 56 °Brix. En el documento no se describe el procedimiento, y lo más probable es que haya ocurrido evaporación (y en consecuencia concentración) durante la etapa de sacarificación que duró 60 h.

Los resultados de viscosidad se muestran en la Figura 9. La viscosidad del hidrolizado de harina de yuca sin pretratamiento es 4,18 cP, más del doble de la viscosidad del hidrolizado de almidón (1,59 cP) y mayor al reportado por Sánchez (2013) (3,45 cP). Pero la viscosidad de los hidrolizados de harina de yuca para 1, 2,5 y 4h de molienda fue de 2,5, 2,43 y 2,39 cP respectivamente, lo cual indica

una disminución significativa de la viscosidad a partir de la primera hora de molienda, sin presentar diferencias entre 1, 2,5 y 4h de molienda.

Con respecto a los retenidos en el tamiz, los valores más altos de viscosidad se encontraron en la malla <70 mesh. A medida que disminuye el tamaño de partícula la viscosidad disminuye, esta misma tendencia se presenta con el porcentaje de ceniza, de proteína y LHC. Se observa entonces una dependencia de la viscosidad con el tamaño de partícula (con la harina sin tamizar para 1, 2,5 y 4h de molienda disminuye el tamaño de partícula y la viscosidad) y la composición (en la fracción de harina retenida en la malla de 70 mesh ocurre una disminución de la viscosidad a medida que el porcentaje de LHC y proteína disminuyen). Respecto a los tres tiempos de molienda aplicados no existe una diferencia significativa en cuanto a viscosidad.

**Figura 9. Viscosidad [cP] de los hidrolizados para las fracciones de harina de yuca integral retenidas en las mallas de 70, 120, 170, 400 mesh, fondo y sin tamizar, y almidón para tiempos de molienda de 0, 1, 2,5 y 4h.**

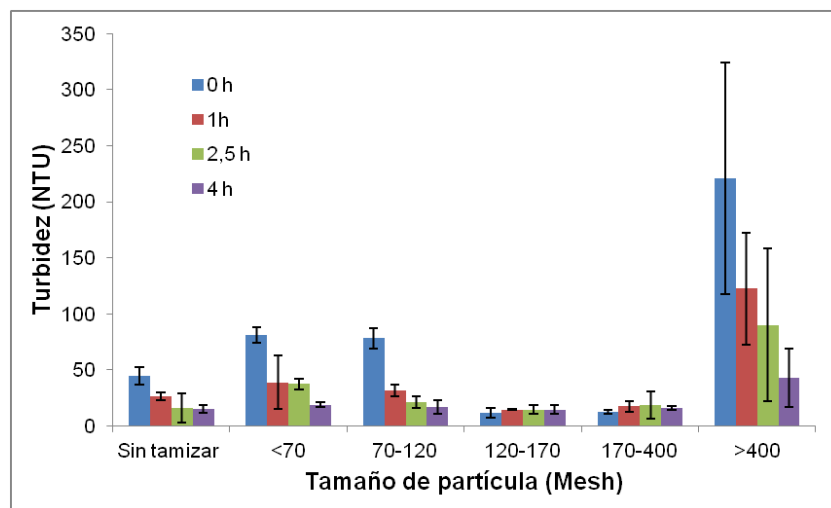


Los resultados de turbidez para los filtrados se presentan en la Figura 10. La turbidez para todos los hidrolizados superó el rango de detección del equipo (turbidez > 800 NTU). La turbidez para los filtrados de las mezclas se encuentra entre 18,97 y 44,63 NTU. Acevedo & Parra, 2013 encontraron que para una

alimentación de hidrolizado de almidón de yuca con turbidez de 658,5 NTU se obtienen filtrados con 7,07 y 70,18 NTU utilizando membranas con un diámetro de poro de 0,8 y 1,4  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

La turbidez para las muestras de fondo es alta y presentan una desviación grande. Esto puede ser producto del tamaño de poro del lienzo utilizado como medio filtrante que no retuvo las partículas más pequeñas y que se encuentran en mayor cantidad en estas muestras. De igual manera se obtienen valores superiores a 50 NTU en las mallas <70 y 70-120 mesh sin molienda. El tamaño superior de la materia no hidrolizada pudo crear una torta más porosa que permitió el paso de las partículas más pequeñas. Es importante recordar que estas filtraciones fueron realizadas por gravedad. La turbidez para los filtrados obtenidos a partir de almidón fue de 58,23 NTU la cual también puede ser producto del tamaño de poro del medio filtrante.

**Figura 10. Turbidez [NTU] de los filtrados para las fracciones de harina de yuca integral retenidas en las mallas de 70, 120, 170, 400 mesh, fondo y sin tamizar, y almidón para tiempos de molienda de 0, 1, 2,5 y 4h.**



La materia seca de los hidrolizados se encontró en un rango de 8,15 a 9,02% y para los filtrados de 7,11 a 8,61%. La pequeña disminución que se presenta después de la filtración corresponde a la materia no hidrolizada retenida durante este proceso (0,28 a 2,11%).

El porcentaje de ED para las muestras de harina estuvo entre 83,5 y 99,5% (almidón = 97,45%ED). El porcentaje de glucosa estuvo entre 68,46 y 91,79% frente a 82,25% para el almidón. Por lo tanto, se logró obtener hidrolizados de glucosa a partir de harina de yuca integral.

No hay una diferencia significativa entre los distintos tiempos de molienda (1, 2,5 y 4 h) por lo tanto, el pretratamiento empleado en la fase 3 será 1 h con molino de bolas, por ser el menor tiempo y por tanto presentar los menores gastos de energía y costos.

Se decidió no realizar tamizado, pues al usar la harina sin tamizar con pretratamiento se obtienen valores de viscosidad y turbidez cercanos a las fracciones de menor tamaño para todos los tiempos de molienda.

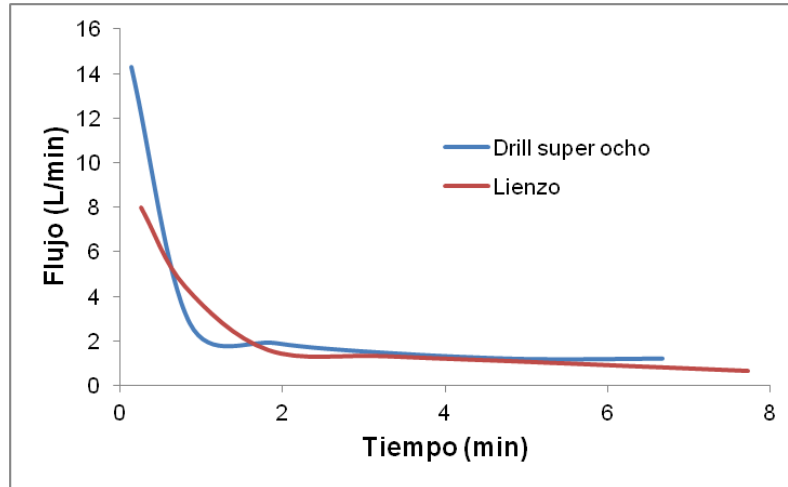
#### **2.4. Análisis de la clarificación en filtro prensa de hidrolizados de harina de yuca integral utilizando dos medios filtrantes.**

La Figura 11 muestra la variación del flujo para cada medio filtrante (drill super ocho y lienzo). La diferencia más significativa ocurre en los dos primeros minutos donde con el filtro de lienzo se obtiene una velocidad inferior a la obtenida con el filtro de Drill super ocho. Después de este tiempo la disminución en la variación del flujo es menos evidente y las diferencias entre cada medio filtrante desaparecen.

En la Figura 12 se presentan las curvas empleadas para calcular la resistencia específica de la torta ( $\alpha$ ) y la resistencia del medio filtrante ( $R_m$ ) para cada medio filtrante (Figura 12a) y las ecuaciones empleadas (Figura 12b). Se observa que la resistencia del medio filtrante ( $R_m$ ) es superior para el drill (Figura 12c), esto se debe al mayor grosor (lienzo= 0,4 mm y drill super ocho= 0,75 mm) y poros más cerrados de éste.

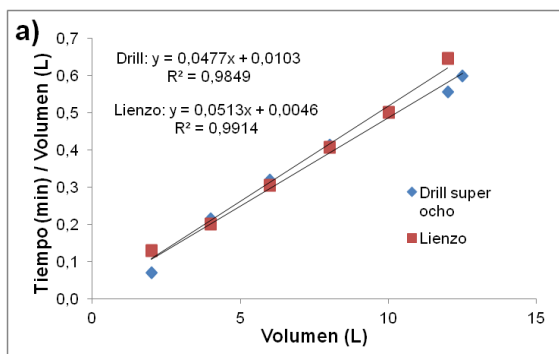
**Figura 11. Variación de flujo (L) en el tiempo (min) en filtro prensa usando como medio filtrante Drill super ocho y lienzo, alimentación con presión a 25 psi, temperatura de filtración= 70°C e hidrólisis realizada con una concentración de 10%p/v (harina de yuca integral/agua).**

Figura 12. Variación de flujo (L) en el tiempo (min) en filtro prensa usando como medio filtrante Drill super ocho y lienzo, alimentación con presión a 25 psi, temperatura de filtración= 70°C e hidrólisis realizada con una concentración de 10%p/v (harina de yuca integral/agua).



La resistencia de la torta ( $\alpha$ ) presenta el mismo orden de magnitud en ambos casos, debido a que esta depende del líquido filtrado, el cual es el mismo en este caso.

Figura 13. Determinación de las constantes  $\alpha$  (Resistencia específica de la torta) y  $R_m$  (resistencia del medio filtrante) para el medio filtrante de Drill super ocho y lienzo en filtro prensa, alimentación con presión a 25 psi, temperatura de filtración= 70°C e hidrólisis realizada con una concentración de 10%p/v (harina de yuca integral/agua). a) Gráfica para hallar la ecuación (1). b) Ecuaciones para el cálculo de las constantes. c) Resultados de las constantes.



b)

$$\frac{t}{V} = \frac{Kp}{2}V + B \quad (1)$$

$$Kp = \frac{\mu \alpha C_s}{A^2(-\Delta p)} \quad (2) \quad B = \frac{\mu}{A(-\Delta p)} R_m \quad (3)$$

c)

Tela	$\alpha$ (m/kg)	$R_m$ (1/m)
Drill super ocho	$46,95 \cdot 10^9$	$5,095 \cdot 10^9$
Lienzo	$62,38 \cdot 10^9$	$2,284 \cdot 10^6$

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la caracterización para cada filtrado. Se observa que el porcentaje Equivalentes Dextrosa (ED) al utilizar drill super ocho es superior al % ED cuando se usa lienzo.

**Tabla 4. Caracterización de los filtrados en filtro prensa con tela de drill super ocho y tela de lienzo, alimentación con presión a 25 psi, temperatura de filtración= 70°C e hidrólisis realizada con una concentración de 10%p/v (harina de yuca integral/agua).**

Parámetro	Drill	Lienzo
°Brix	8 +/- 0,00	8 +/- 0,15
PH	3,93 +/- 0,15	3,80 +/- 0,02
% Materia seca	8,83 +/- 0,03	8,69 +/- 0,19
Densidad (g/ml)	1,04 +/- 0,01	1,03 +/- 0,00
% ED	80,45 +/- 1,45	66,25 +/- 7,15
% Glucosa	26,52 +/- 0,17	26,70 +/- 0,02
Turbidez (NTU)	53,08 +/-12,98	165,25 +/- 39,75

También se evidencia mayor turbidez en el filtrado con lienzo (165,25 NTU) respecto al filtrado con drill super ocho (53,08 NTU) (Figura 13). Esto es producto de la diferencia de tamaño de poro (menor en drill super ocho) y espesor en cada tela, el cual es mayor en la tela de drill super ocho (espesor lienzo= 0,4 mm y espesor drill super ocho= 0,75 mm). En base a los porcentajes obtenidos en materia no hidrolizada retenida (0,71% para drill y 0,19% para lienzo) se puede analizar que el medio filtrante de lienzo deja pasar más material no hidrolizado particulado que contribuye a la disminución del %ED y al aumento de la turbidez. Con ambos medios filtrantes se puede realizar una clarificación desde turbidez >800 NTU hasta <200 NTU.

**Figura 14. Clarificado de hidrolizado de harina de yuca en filtro prensa con medio filtrante de Drill super ocho (izquierda) y lienzo (derecha), alimentación con presión a 25 psi, temperatura de filtración= 70°C e hidrólisis realizada con una concentración de 10%p/v (harina de yuca integral/agua).**



Por otro lado, se observa que los %ED obtenidos en esta fase son inferiores a los obtenidos en la fase 2 (fase 2 %ED= 83,5-99,5% y fase 3 %ED= 66,25 y 80,45%). De igual manera, el porcentaje de glucosa disminuye en relación a la fase anterior (fase 2 %glucosa=68,46-91,79% y fase 3 %glucosa= 26%). Se puede pensar que esto es producto de los reactores utilizados para realizar las hidrólisis de mayor volumen (sistema de agitación disponible –Agitación helicoidal a 100 rpm- no es el más adecuado para esta aplicación).

Se puede concluir que no existe una fuerte diferencia en la velocidad de flujo, pues con ambos medios filtrantes después de 2 min se estabiliza en valores cercanos a pesar de que el drill super ocho presenta mayor resistencia ( $R_m$ ) que el lienzo. La elección del mejor medio filtrante se basó en la diferencia en el porcentaje ED y la turbidez obtenidos para cada filtrado. Por lo tanto, para el análisis de clarificación al 40% p/v (harina de yuca integral/agua) se utilizó drill super ocho como medio filtrante.

Para las filtraciones de hidrolizado al 40% p/v (harina de yuca integral/agua) fue necesario realizar un prefiltrado con un tamiz plástico, con el objetivo de retirar el material no hidrolizado y la cáscara de yuca porque bloquearon la entrada al filtro prensa. Después del prefiltrado resultaron 10 L.

De la filtración se observó que la mayor velocidad de flujo alcanzada (primeros 5 min) no supera los 4,5 L/min, a diferencia de la filtración al 10%p/v donde se encontraron valores casi de 14 L/min. También se observó que el flujo tiende a 0 después de los primeros 10 min de filtración, en el cual solo se lograron filtrar 3,5L aproximadamente. Debido a esto se concluye que el filtro prensa no es un mecanismo adecuado para la clarificación de los hidrolizados a una concentración de 40% p/v (harina de yuca integral/agua).

### 3. CONCLUSIONES

- Se caracterizó la harina de yuca integral elaborada, encontrando un porcentaje de almidón de  $81,88\% \pm 0,09\%$ . Igualmente, se logró caracterizar en lignina ( $1,81\% \pm 0,65$ ), celulosa ( $4,69\% \pm 1,95\%$ ) y hemicelulosa ( $4,00\% \pm 1,78\%$ ) componentes de los cuales solo se encontraba reporte a la fecha en la literatura para la hemicelulosa.
- Se obtuvo un cambio considerable de la harina de yuca integral al emplear un molino de bolas. Sin molienda el 72% de la harina de yuca tiene un tamaño superior a 35 mesh, con una hora de molienda se logró obtener un 71% por debajo de 120 mesh. Bajo estas condiciones se logró disminuir casi el doble la viscosidad de los hidrolizados de harina de yuca integral sin tamizar (sin molienda = 4,5 cP, con molienda= 2,4 cP). Al aumentar el tiempo de molienda no se observaron diferencias significativas.
- Utilizando harina de yuca integral, se obtuvieron hidrolizados con un contenido de equivalentes dextrosa (ED) superior al 80% utilizando soluciones al 10% y 40 % p/v (harina/agua).
- Se lograron clarificar hidrolizados al 10% p/v (harina de yuca integral/agua) utilizando un filtro prensa. Con esta solución se filtraron 14L de hidrolizado en 7,5 min utilizando un filtro prensa de  $0,0195\text{m}^2$  de superficie filtración y Drill super ocho como medio filtrante. Caso contrario se evidenció para soluciones al 40% p/v (harina/agua) en donde no fue posible la filtración con dicho sistema de filtración.

#### 4. TRABAJOS FUTUROS

- Estudiar las condiciones de hidrólisis para la harina de yuca integral, teniendo en cuenta variables como temperatura, relación enzima/sustrato y tiempo de hidrólisis.
- Evaluar la influencia del tamaño de partícula en los rendimientos de hidrólisis.
- Evaluar estrategias de filtración (tangencial) que permitan la clarificación de los hidrolizados de harina de yuca integral con concentraciones superiores al 10% p/v (harina de yuca integral/agua).

## BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, María Victoria y PARRA, Carlos Omar. Estudio del proceso de clarificación de hidrolizados de almidón de yuca utilizando membranas cerámicas. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería química, 2013.

AGUILAR R, N. RODRÍGUEZ L, D. A.CASTILLO M, A. Azúcar, coproductos y subproductos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. Revista VIRTUALPRO. Noviembre de 2010; N° 106, pp. 19.

AGUILERA María. La yuca en el Caribe Colombiano: de cultivo ancestral a agroindustrial. Documentos de trabajos sobre economía regional. Banco de la Republica. Núm. 158 2012.

ALARCÓN M, Freddy. DUFOUR, Dominique. Almidón agrio de yuca en Colombia. Tomo I: Producción y recomendaciones. Cali, Colombia, diciembre de 1998. ISBN 958-9439-67-5

ALARCÓN M, Freddy. DUFOUR, Dominique. Almidón agrio de yuca en Colombia. Tomo II: Plata procesadora: descripción y plano de los equipos Cali, Colombia, Julio de 2001. ISBN 958-694-036-.5.

ALVIS, Armando *et al.* Análisis físico-químico y morfológico de almidones de ñame, yuca y papa y determinación de la viscosidad de las pastas. Información Tecnológica. Vol. 19 N° 1-2008.

ALVARADO, Gabriela y CORNEJO, Fabiola. Obtención de harina de yuca para el desarrollo de productos dulces destinados para la alimentación de celíacos. Escuela Superior Politécnica de Litoral (ESPOL). 2009.

AQUINO R, Cecilia. RAMOS R, Emma G. SALAZAR M, Juan A. Efecto de la relación sólido-líquido y temperatura en el comportamiento reológico de extractos acuosos de avena (*Avena sativa*). IV congreso internacional de ingeniería bioquímica y XV congreso nacional de ingeniería bioquímica. (4-7, abril, 2006: Ciudad de Morelia Mich, México). Colegio mexicano de ingenieros bioquímicos, A.C.2006. 1 p.

ARANGO L, Marcelino. La magia de los jarabes de maíz. Revista de alimentos. Agosto de 2008; Ed. 5, pp. 22-23.

ARISTIZABAL J. et al. The effect of extrusion and drying on roller techniques concerning the rheological characteristics of rice-, corn-, sweet potato-, bean- and cassava root- and leaf- based composite flour. INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 33 No. 1, ABRIL DE 2013 (29-34).

ARISTIZABAL, Jhoanna. SÁNCHEZ, Teresa. Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de servicios agrícolas de la FAO, 163. 2007. pp. 33-36. 49-57.

ARYEE F.N.A, Oduro I., Ellis W.O. The physicochemical properties of flour samples from the roots of 31 varieties of cassava. Food Control 2005; 17(1):916-922.

BECERRA, José Javier. Diseño y montaje de un piloto de laboratorio para el estudio de la separación de hidrolizados de almidón de yuca utilizando tecnología

membranaría. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería química, 2011.

BENITEZ Betty et al. Composición proximal, evaluación microbiológica y sensorial de una galleta formulada a base de harina de yuca y plasma de bovino. *Interciencia* Enero 2008, vol. 33 No 1. 61-65.

BETTGE A. D. et al. Susceptibility of Waxy Starch Granules to Mechanical Damage. *American Association of Cereal Chemists, Inc.*, 2000. 77(6):750–753.

BETTIN, Luz y QUINTERO, Juan. Estudio de la producción de jarabes glucosados a partir de maltodextrinas empleando dos enzimas comerciales. *VITAE, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*. Vol. 17. N°2. 2010, pág. 165-172.

BREUNINGER, William F. *et al.*, Chapter 12 - Tapioca/Cassava Starch: Production and Use, In: James BeMiller and Roy Whistler, Editor(s), *Food Science and Technology*, Academic Press, San Diego, 2009, Pages 541-568, Starch (Third Edition).

BUITRAGO, Julián, GIL, Jorge y OSPINA, Bernardo. La yuca en la alimentación avícola. *CLAYUCA*. Bogota, D.C. octubre de 2001.

CASTAÑO, H., *et al.* Producción de etanol a partir de harina de yuca en un sistema de hidrólisis enzimática y fermentación simultánea. *Dyna*, 78(169). 2011, pág. 158-166. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49622390018>.

CEBALLOS H, De La CRUZ H. Taxonomía y morfología de la yuca. La yuca en el tercer milenio. Sistemas más modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización. CIAT. Cali, Colombia 2002. 17-33.

CLAYUCA. "Trapiches yuqueros, una realidad", Clayuc@Net, Boletín Electrónico del Consorcio Latinoamericano y del Caribe de Apoyo a la Investigación y Desarrollo de la Yuca, Edición N° 5, Cali, Colombia, diciembre. 2003.

CHAROENKUL, N. *et al.* Physicochemical characteristics of starches and flours from cassava varieties having different cooked root textures. *El Sevier*. Marzo de 2011. pp. 1774-1781.

COBANA & ANTEZANA. Proceso de extracción de almidón de yuca por vía seca. *Revista boliviana de Química* 2007. V. 24, p. 77-83.

CORZO R, Luis. CHEL G, Luis. BETANCUR A, David. Extracción de las fracciones de almidón y proteína del grano de la leguminosa *Mucuna pruriens*. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*. Mayo de 2000. Vol. 15, No 1, pp. 37-41.

COULSON. J. M y RICHARDSON. J.F. *Ingeniería Química. Operaciones básicas*. Tomo II. Editorial Reverté S.A. 1981. ISBN: 84-291-7136-3

DANE. (2011). Encuesta anual manufacturera. Recuperado el agosto de 2013, de: [http://www.dane.gov.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=96&Itemid=59](http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=96&Itemid=59).

FLORES, Sadi. Obtención de almidón con tamaño de partícula reducido mediante pulverizado mezclado con alta energía. Departamento de tecnología, centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada. México 2004.

FREITAS, R.A. *et al.* Amylose contents, rheological properties and gelatinization kinetics of yam (*Dioscorea alata*) and cassava (*Manihot utilissima*) starches. *El Sevier*. Marzo de 2003. pp. 3-8.

FUNDACIÓN MITSUBIMI, 2000. Ingenio yuquero en el Cauca. Estudio de factibilidad. Parte IV Paquete tecnológico financiero. CIAT, Cali. Recuperado el 20 de julio de 2013 de: [http://ciatlibrary.ciat.cgiar.org:8080/jspui/bitstream/123456789/6645/3/Ingenio\\_Yuquero\\_en\\_El\\_Cauca\\_Estudio\\_de\\_F.Parte%204.pdf](http://ciatlibrary.ciat.cgiar.org:8080/jspui/bitstream/123456789/6645/3/Ingenio_Yuquero_en_El_Cauca_Estudio_de_F.Parte%204.pdf).

GAOUAR *et al.* Production of maltose syrup by bioconversion of cassava starch in an ultrafiltration reactor. Elsevier. Agosto de 1998. pp. 159-167.

GIRALDO T, Andrés. Estudio de la obtención de harina de hojas de yuca (*Manihot Esculenta Crantz*) para consumo humano. Facultad de ciencias agropecuarias, Universidad del Cauca 2006.

GOMEZ, Manuel Fernando. Utilización de la harina de yuca en la elaboración de productos de panificación. Escuela de nutrición y dietética. Universidad de Antioquia. 2006

HERNÁNDEZ U, Juan P. RODRIGUEZ A, Sandra L. BELLO P, Luis A. Obtención de jarabe fructosado a partir de almidón de plátano (*Musa paradisiaca L.*). Caracterización parcial. Interciencia. Mayo de 2008. Vol. 33, No 5, pp. 372-376.

INDUSTRIAS I. Universidad de Buenos Aires, Argentina. Material de asignatura 2012, recuperado de: [http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06\\_Apunte%20Molienda.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte%20Molienda.pdf).

JIMENEZ T, Paola Andrea. Identificación de harinas de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) con alto contenido proteico mediante espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS). Maestría tesis, Universidad Nacional de Colombia. 2007.

JINGJING, Li. Isolation of lignin from wood. Bachelor's tesi. Saimaa University of Applied Sciences, 2011.

JOHNSON R, G.PADMAJA, S.N.MORTHY. Comparative production of glucose and high fructose syrup from cassava and sweet potato roots by direct conversion techniques. ElSevier. Abril de 2009. pp. 616-620.

LEAES, Eloísa X. *et al.* Ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis of cassava waste to obtain fermentable sugars. El Sevier. Marzo de 2013. pp. 1-6.

LÓPEZ U, R. HALL, G.M. Saccharification of cassava flour starch in a hollow-fiber membrane reactor. El Sevier. Febrero de 1997. Vol. 21, pp. 398-404.

McCABE, Warren, SMITH, Julian y HARRIOT, Peter. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. 4ª Edición. McGraw Hill. ISBN: 0-07-044828-0.España. 1998, pág. 987-1058.

MERA, Ingrid y CARRERA, Jorge. Obtención de glucosa a partir de almidón de yuca *Manihot sculenta*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Vol. 3 N° 1. Marzo 2005, pág. 54-63.

MILLER, Gail. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugars. Pionering research división, Quartermaster Research and Engineering Center, Natik, Mass. 1959.

MOHD, Ashuvila *et al.* cassava peels for alternative fibre in pulp and paper industry: Chemical properties and morphology characterization. International Journal of Integrated Engineering. Vol. 5. N°1. 2013, pág. 30-33.

MORALES, H. ÁLVAREZ, C. SÁNCHEZ, C. Dynamic models for the production of glucose syrup from cassava starch. *El Sevier*. Marzo de 2007. pp. 25-30.

MORESCO y SANSÓN. Simple Potentiometric Determination of Reducing Sugars. Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry, University of the Republic, Montevideo, Uruguay. Vol. 85 No. 8. *Journal of Chemical Education*. Agosto 2008.

NAVIA, Diana, & VILLADA, Héctor. Thermoplastic Cassava Flour. *Thermoplastics Elastomers Chapter 2. Disponible en:* <http://www.intechopen.com/books/thermoplastic-elastomers/thermoplastic-cassava-flour>.

OYOLA N, Wilson G. Cristalización de fructosa a partir de preparados de almidón de yuca. Trabajo de grado Química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química, 2006.

PEÑALOZA, Diana. Fabricación y caracterización de polvos obtenidos por molienda mecánica a partir de virutas de corte de Ti6Al4V. Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales. Universidad Industrial de Santander 2008.

PONTOH, Juilius. LOW, Nicholas H. Glucose syrup production from Indonesian palm and cassava starch. *El Sevier*. 1995. Vol. 28, No. 4, pp. 379-385.

RODRÍGUEZ de C, Lilia. Métodos de análisis empleados en la industria papelera. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1978.

RODRÍGUEZ S, Eduardo *et al.* Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. Ingeniería y desarrollo. Enero-Junio de 2006. No. 19, pp. 17-30.

ROMANOFF & RODRIGUEZ, 1986. La industria de yuca en la costa Ecuatoriana. Memorias del II seminario anual sobre la yuca en la estación experimental Portoviejo del INIAP, Quito- Ecuador. CIAT. ISBN 84-89421-01-3.

ROSALES, Julio y TANG, Tony. Composición química y digestibilidad de insumos alimenticios de la zona de Ucayali. Folia Amazonica. Vol. 8(2)-1996, pág. 13-27.

SALCEDO M, Jairo G. MONTES M, Everaldo J. PAJARO S, Jose L. Producción de jarabes de fructosa por medio de la hidrólisis enzimática del almidón de yuca de las variedades Corpoica M TAI-8 y Corpoica Orense. Dyna. Diciembre de 2009. Vol. 76, No 160, pp. 121-130.

SANCHÉZ, Jessica Julieth. Evaluación del pretratamiento explosión por vapor en las características fisicoquímicas de harina de yuca y sus hidrolizados. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería química, 2013.

SANCHÉZ R, A.M. *et al.* Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. Revista TUMBAGA 2010. pp. 61-91.

SILVA, Erwing, OSPINA, Bernardo y LISÍMACO, Alonso. Obtención industrial de harina de yuca por sistemas continuos. La yuca en el tercer milenio. Capítulo 25. 2002, pág. 457-469.

SINGH, N., & CHERYAN, M. Properties and Composition of Concentrates and Syrup Obtained by Microfiltration of saccharified Com Starch Hydrolysate. *Journal of cereal and science*, 1998; 27, 315-320.

TEJEDA, Lesly *et al.* Hidrólisis del almidón de yuca (*Manihot Sculenta*) y de ñame (*Discorea rotundata*) para producir jarabes glucosados. ReCiTeIA Vol. 11 nº 1b. 2011, pág. 128-137.

TESTER R. F *et al.* Properties of damaged starch granules. III. Microscopy and particle size analysis of undamaged granules and remnants. *Journal of cereal science* (1994) 59–67.

TRINDER, P. Determination of blood glucose using an oxidaseperoxidase system with non-carcinogenig chromogen. *J. Clin. Path.* 22(2). 1969, pág. 158-161.

## ANEXOS

### Anexo A. Equivalencias mesh

Tabla A. Equivalencias de abertura de los tamices. Fuente: Sargent Welch Scientific company.

Mesh	Micrómetros ( $\mu\text{m}$ )	Pulgadas (in)
20	850	0,0331
30	600	0,0234
35	500	0,0197
40	425	0,0165
45	355	0,0139
50	300	0,0117
60	250	0,0098
70	212	0,0083
80	180	0,0070
100	150	0,0053
120	125	0,0049
170	88	0,0035
400	37	0,0014

En la Tabla A se presentan las equivalencias de mesh y  $\mu\text{m}$ . Se resaltan las mallas utilizadas en el presente trabajo.

## Anexo B. Caracterización de los retenidos para 1, 2,5 y 4 h de molienda en molino de bolas

**Tabla C. Porcentaje de humedad, cenizas, proteína, LHC (Lignina, hemicelulosa y celulosa) y almidón de las fracciones de harina retenidas en <70, 70-120, 120-170, 170-400 y >400 mesh con 1, 2,5 y 4h de molienda en molino de bolas.**

Muestra	Humedad (%)	Cenizas (%)	Proteína (%)	LHC (%)	Almidón (%)
*(1h) ST	5,84 ± 1,44	2,60 ± 0,06	1,74 ± 0,02	7,18 ± 0,62	85,19 ± 0,60
(1h) <70	6,02 ± 0,74	2,96 ± 0,00	1,96 ± 0,00	14,69 ± ND	78,47 ± 0,96
(1h) 70-120	5,89 ± 1,20	2,92 ± 0,00	1,99 ± 0,00	10,90 ± ND	80,72 ± 0,50
(1h) 120-170	5,32 ± 1,02	2,48 ± 0,01	1,76 ± 0,02	4,94 ± ND	86,07 ± 0,67
(1h) 170-400	5,51 ± 1,16	2,55 ± 0,04	1,74 ± 0,01	7,31 ± ND	84,95 ± 0,63
(1h) >400	6,20 ± 1,57	2,07 ± 0,04	1,10 ± 0,01	0,76 ± ND	86,81 ± 0,53
** (2,5h) ST	5,32 ± 0,67	2,61 ± 0,05	1,83 ± 0,00	7,76 ± 0,94	82,91 ± 0,14
(2,5h) <70	5,92 ± 1,27	3,05 ± 0,06	2,09 ± 0,00	10,12 ± ND	81,57 ± 0,11
(2,5h) 70-120	5,78 ± 1,23	2,89 ± 0,12	1,84 ± 0,00	7,63 ± ND	82,23 ± 0,18
(2,5h) 120-170	6,01 ± 1,55	2,72 ± 0,03	1,78 ± 0,03	3,92 ± ND	82,07 ± 0,42
(2,5h) 170-400	5,92 ± 1,38	2,70 ± 0,01	1,69 ± 0,02	3,20 ± ND	81,62 ± 0,20
(2,5h) >400	6,10 ± 1,62	2,35 ± 0,02	1,29 ± 0,01	0,87 ± ND	83,35 ± 0,71
(4h) ST	7,34 ± 0,33	2,67 ± 0,10	1,70 ± 0,01	4,86 ± 1,01	78,45 ± 0,14
(4h) <70	7,44 ± 0,13	3,02 ± 0,02	1,98 ± 0,02	9,28 ± ND	73,98 ± 0,02
(4h) 70-120	7,44 ± 0,32	2,95 ± 0,03	1,69 ± 0,00	7,78 ± ND	74,31 ± 0,49
(4h) 120-170	7,60 ± 0,03	2,61 ± 0,03	1,74 ± 0,00	5,14 ± ND	76,46 ± 0,02
(4h) 170-400	7,02 ± 0,31	2,72 ± 0,05	1,97 ± 0,00	3,22 ± ND	77,2 ± 0,07
(4h) >400	7,14 ± 0,02	2,32 ± 0,06	1,47 ± 0,00	0,20 ± ND	82,93 ± 0,05

\* (Tiempo de molienda) Tamaño de malla en mesh.

\*\*ST: Sin Tamizar.