

**PRODUCCIÓN DE JARABE DE GLUCOSA A PARTIR DE ALMIDÓN DE
BATATA (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.)**

**MÓNICA LORENA RÍOS RIVERA
YULI DANIELA VELÁSQUEZ PÉREZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
SANTIAGO DE CALI
2011**

**PRODUCCIÓN DE JARABE DE GLUCOSA A PARTIR DE ALMIDÓN DE
BATATA (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.)**

**MÓNICA LORENA RÍOS RIVERA
YULI DANIELA VELÁSQUEZ PÉREZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
INGENIERO DE ALIMENTOS**

**Directora
ING. AÍDA RODRÍGUEZ DE STOUVENEL Ph.D**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
SANTIAGO DE CALI
2011**

Dedicamos este proyecto de grado, A Dios porque ha estado a nuestro lado en cada paso, cuidándonos y brindándonos la fortaleza para continuar; A nuestras familias quienes han velado por nuestro bienestar y educación siendo nuestro apoyo en todo momento al depositar su entera confianza en cada reto sin dudar de nuestra inteligencia y capacidad; A nuestra directora Aída Rodríguez y cada uno de los profesores y laboratoristas de la Escuela de Ingeniería de Alimentos, por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de este proyecto; A nuestras parejas, amigos y compañeros porque gracias al equipo que formamos logramos llegar hasta el final del camino y hasta el momento seguimos unidos. Finalmente un eterno agradecimiento a la Universidad del Valle la cual nos abrió sus puertas, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

RESUMEN

En este trabajo se evalúan las variables que intervienen en los procesos de extracción de almidón a partir de Batata (*Ipomea batatas Lam*), su hidrólisis ácida y recuperación del jarabe mediante ultrafiltración.

Durante la extracción del almidón, se presenta pardeamiento enzimático, el cual se pudo disminuir empleando ácido cítrico al 5% (p/v). La mejor proporción agua-batata fresca para extraer el almidón es 1:1, con la que se obtiene un porcentaje de rendimiento de almidón en base seca de $(20,70 \pm 1,75)$ y tasa de extracción del 74% respecto al contenido de almidón de la raíz.

El almidón se hidrolizó en medio ácido, a diferentes concentraciones, temperaturas y tiempos. El mayor porcentaje de azúcares reductores (9.88%) se obtiene con ácido sulfúrico al 4% durante 8 horas y 70-80°C de temperatura.

La solución hidrolizada se clarificó mediante filtración al vacío y posterior ultrafiltración a diferentes presiones. Durante la ultrafiltración se observó que la mayor concentración de azúcares se presenta en el retenido, concluyendo de esta manera que el proceso de ultrafiltración no es efectivo para realizar una concentración de azúcares reductores ni la retención de dextrinas.

Palabras claves: almidón, jarabe de glucosa, hidrólisis ácida, ultrafiltración, clarificación.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GENERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. ESTADO DEL ARTE	14
3.1 LA BATATA.....	14
3.2 HIDRÓLISIS ÁCIDA	14
3.3 ULTRAFILTRACIÓN	15
4. METODOLOGÍA	16
4.1 PLANEACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	16
4.1.1 Factores, Niveles y variable respuesta	16
4.1.2 Tratamientos	16
4.1.3 Unidad Experimental	17
4.1.4 Proceso de Aleatorización	17
4.1.5 Modelo de Diseño Experimental	17
4.2 MATERIA PRIMA Y EQUIPOS DISPONIBLES.....	19
4.3 MÉTODOS	20
4.3.1 Extracción de Almidón	20
4.3.2 Hidrólisis Ácida.....	21
4.3.3 Ultrafiltración	21
4.3.4 Comparación de las características físicas y químicas del producto obtenido con un jarabe de glucosa comercial.	22
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
5.1 PRUEBAS PRELIMINARES	23
5.1.1 Extracción de almidón	23
5.1.2 Hidrólisis ácida del almidón.....	24
5.2 PRUEBAS DEFINITIVAS	25

5.2.1	Extracción del almidón	25
5.2.2	Hidrólisis ácida del almidón.....	26
5.2.2.1	Análisis estadístico.....	29
5.2.2.2	Análisis descriptivo del porcentaje de azúcares reductores	29
5.2.2.3	Efectos principales e interacción entre factores	30
5.2.2.4	Análisis de varianza	31
5.2.2.5	Pruebas de hipótesis.....	32
5.2.2.6	Potencia de la prueba	32
5.2.2.7	Comparaciones múltiples.....	34
5.2.2.8	Validación de supuestos	35
5.2.3	Ultrafiltración del jarabe de glucosa	38
5.2.4	Comparación de las características físicas y químicas del producto obtenido con un jarabe de glucosa comercial.	41
6.	CONCLUSIONES	42
7.	RECOMENDACIONES	43
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
	ANEXOS.....	448

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Niveles y factores del diseño experimental.	16
Tabla 2. Niveles de los tratamientos con dos réplicas cada uno.	16
Tabla 3. Secuencia de aleatorización de los tratamientos para la hidrólisis ácida.	17
Tabla 4. Materia prima y equipos empleados	19
Tabla 5. Pretratamientos aplicados a la batata para disminuir el pardeamiento enzimático.	23
Tabla 6. Porcentaje de almidón (bh) obtenido en diferentes proporciones batata – agua.	24
Tabla 7. Rendimiento de la extracción de almidón (bs) de diferentes tubérculos.	25
Tabla 8. Cantidad de agua utilizada en el proceso de extracción de almidón a partir de diversos tubérculos.	26
Tabla 9. Porcentaje de azúcares reductores para las diferentes soluciones hidrolizadas.	26
Tabla 10. Porcentaje de azúcares reductores obtenidos en los diferentes tratamientos.	29
Tabla 11. Modelo Lineal General: % Azúcares Reductores versus Temperatura % Ácido. Tiempo (h).	31
Tabla 12. Estimación del efecto de cada uno de los tratamientos de los factores tiempo, temperatura, concentración de ácido y sus interacciones.	32
Tabla 13. Valores de no centralidad para los diversos factores e Interacciones.	33
Tabla 14. Potencia de la prueba ($1 - \beta$).	33

Tabla15. Pruebas de comparación-Valores promedio de los diferentes tratamientos aplicados.	34
Tabla 16. Porcentaje de azúcares reductores del hidrolizado.	39
Tabla 17. Porcentaje de azúcares en las diferentes corrientes después de la ultrafiltración a diferentes PTM.	39
Tabla 18. Porcentaje de azúcares reductores, color y viscosidad para el producto obtenido y un jarabe comercial.	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de bloques para extracción de almidón.	20
Figura 2. Diagrama de bloques para hidrólisis ácida de almidón de batata.	21
Figura 3. Diagrama de bloques para extracción de almidón a partir de batata a escala de laboratorio.	24
Figura 4. Efecto del tiempo de hidrólisis en el porcentaje de azúcares reductores.	27
Figura 5. Efecto de la concentración de ácido sulfúrico en el porcentaje de azúcares reductores.	28
Figura 6. Distribución del Porcentaje de azúcares reductores.	30
Figura 7. Efectos principales.	30
Figura 8. Efectos de las interacciones entre los factores del experimento.	31
Figura 9. Probabilidad Normal.	36
Figura 10. Gráfica prototipo de los residuales que muestran autocorrelación en los errores.	36
Figura 11. Residuales en función de los valores ajustados.	37
Figura 12. Test Bartlett para valorar la homogeneidad de la varianza.	38
Figura 13. Variación de los sólidos solubles en el Fp, durante el proceso de ultrafiltración a diferentes PTM.	40
Figura 14. Variación del Fp durante el proceso de ultrafiltración a diferentes PTM.	40

INTRODUCCIÓN

La Batata (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.), se cultiva comercialmente como alimento ^[1], es una raíz con un contenido de almidón en un rango de 30-85% ^[3], y algunas variedades contienen carotenos que pueden ser usados como pigmentos naturales. El valor energético está entre 3.160 y 3.220 kcal/kg M.S equivalente a 90-96% de lo aportado por la yuca y el sorgo respectivamente. Tiene un contenido de extracto libre de nitrógeno (ELN) de 88.6%, 3.2% de fibra cruda, 3.5% de ceniza y 0.04% de fósforo disponible. ^[4]

La batata además de ser consumida por ser fuente de carbohidratos, es una fuente importante de almidón para uso industrial. En el Japón actualmente se investiga también su potencial en la producción de alcohol carburante. ^[2]

En Colombia la batata se cultiva únicamente en huertas y se consume a nivel casero, es utilizada en algunos casos para alimentación animal. No existen cultivos tecnificados o especializados para la producción masiva de la batata. ^[5]Se puede potencializar el uso industrial de la batata como una buena opción para popularizar su producción.

El maíz es la fuente más abundante de almidón de la que se dispone actualmente, del que se extrae el 75% del almidón producido en el mundo, el 25% restante se encuentra distribuido entre la papa, el trigo, la yuca y el arroz de los cuales se elaboran principalmente los jarabes de glucosa. ^[6]

La batata tiene un costo de producción agrícola bajo comparado con los del maíz, la papa y la yuca, además debido a su alto contenido de almidón (30-85%)^[2], se propone como materia prima para obtener un jarabe que pueda ser alternativa al jarabe producido a partir de maíz.

En este trabajo se evalúa la hidrólisis ácida de almidón de batata (*Ipomea batatas* Lam) como una alternativa para la producción de jarabe de glucosa. En general la hidrólisis ácida es realizada con HCl o H₂SO₄ (2-5%) y temperaturas cercanas a los 120°C. Los tratamientos de hidrólisis ácida, con soluciones diluidas de HCl o H₂SO₄ producen modificaciones superficiales en el almidón, generando gránulos de estructura debilitada. La modificación ácida del almidón produce dextrinas de baja viscosidad y glucosa ^[7]. Para la caracterización de los productos de hidrólisis del almidón, se emplea como parámetro el equivalente de dextrosa ED que indica la cantidad de glucosa presente en el jarabe. Su determinación se basa en cuantificar la cantidad de glucosa pura requerida para reducir la misma cantidad de reactivo de Fehling que 100 unidades de masa del hidrolizado seco. ^[6]

La ultrafiltración es una operación de separación molecular en la que se pueden dirigir hacia un lado de la membrana empleada como medio filtrante, macromoléculas como proteínas, almidones o dextrinas.^[8]

Con este trabajo se pretende contribuir con el futuro avance de la industria de alimentos, mediante el desarrollo de investigaciones que aporten nuevas perspectivas en el uso de materias primas de nuestro país; obteniendo así un jarabe de glucosa, el cual tiene diversas aplicaciones en la industria.

Con este proyecto se definieron las variables que intervienen en los procesos de extracción de almidón, hidrólisis ácida y ultrafiltración. Para obtener un almidón blanco de batata fue necesario inhibir el pardeamiento enzimático utilizando técnicas de reducción de pH empleando ácido cítrico al 5% (p/v) y una relación de batata agua 1:1. En la hidrólisis ácida los mayores porcentajes de azúcares reductores se obtuvieron a bajas temperaturas y bajas concentraciones de ácido en los mayores tiempos de tratamiento. Finalmente en la ultrafiltración se demostró que el proceso no fue eficiente para retener dextrinas ni clarificar el jarabe obtenido.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aunque el uso de la hidrólisis ácida ha sido desplazado en los últimos años por los procesos de hidrólisis enzimática, aún en muchas empresas de México y América Latina se siguen empleando los procesos ácidos ya que a pesar de no ser la tecnología más óptima genera los productos requeridos por la industria y a un menor costo.^[4]

El almidón es un polisacárido de reserva que se encuentra ampliamente distribuido en las plantas. Es una mezcla de dos polisacáridos distintos, la amilosa, cadenas lineales de glucosa unidas por enlaces α 1-4, y la amilopectina, estructura con ramificaciones unidas por enlaces α 1-6 enlazadas a un tronco central similar a la amilosa localizadas cada 25-30 unidades lineales de glucosa^[9]. La hidrólisis de estos enlaces puede ser catalizada por ácidos o enzimas. En la hidrólisis ácida los enlaces se rompen al azar, es decir, se rompen los enlaces alfa 1-4 y 1-6, con formación de todos los posibles oligosacáridos y la conversión final de estos a glucosa, mientras que en la hidrólisis enzimática solo son afectados los enlaces α 1-4 quedando intactos los α 1-6.

En el proceso de hidrólisis ácida total se produce glucosa o dextrosa. Cuando la reacción se completa, la suspensión se neutraliza, filtra y concentra para cristalizar la dextrosa. Sin embargo en algunos casos, la hidrólisis es parcial, cuando esto ocurre se obtiene como producto dos compuestos químicos: dextrinas y glucosa^[10]. Esta situación requiere establecer procedimientos adecuados para separar las dextrinas del jarabe de glucosa obtenido durante la hidrólisis.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener jarabe de glucosa mediante hidrólisis ácida de almidón de batata.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el efecto de las variables que definen los procesos de hidrólisis de almidón a glucosa tales como: concentración de ácido, temperatura y tiempo.
- Utilizar la operación de ultrafiltración para disminuir el contenido de dextrinas y reducir la turbidez del jarabe de glucosa.
- Comparar características como: viscosidad, contenido de glucosa y color del jarabe obtenido con un jarabe comercial.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 LA BATATA

La Batata (*Ipomoea batatas* Lam) denominada también camote, boniato, moniato o patata dulce, pertenece a la familia de las convolvuláceas que contiene aproximadamente 50 géneros y 1200 especies. Varios miembros de esta familia tienen importancia económica ya sea como alimento o como plantas ornamentales; sólo la *Ipomea batatas* Lam se cultiva comercialmente como alimento, siendo la única especie del género que tiene raíces comestibles. Es el séptimo cultivo alimenticio más importante del mundo en términos de producción. China es el primer productor, con más de 121 millones de toneladas (el 92% de la producción mundial), y un rendimiento de 17 t/ha. En América Latina, se destacan en su producción Brasil, Argentina, Perú, Haití y Cuba ^[1]. La batata es una planta de origen tropical (temperatura promedio 22°C) que se adapta a regiones de fuertes vientos, crece y reproduce en cualquier tipo de suelo (arenosos y arcillosos), es una planta tolerante a la acidez (pH de 4.5 a 7.5). ^[2]

Las evidencias indican que el centro de diversificación de la batata se encuentra entre el sur de México y el norte de América del Sur. Sin embargo, todavía no se ha encontrado su ubicación exacta ^[11]. Según Edmond (1971) la batata fue domesticada en América Central y en las islas tropicales del Pacífico antes de la era cristiana. En las Américas, los mayas y las civilizaciones peruanas de los Andes cultivaron la batata y diseminaron su cultivo. El cultivo de la batata se extendió desde el Pacífico hasta Nueva Zelanda. Esta raíz fue llevada a España por los exploradores en el siglo XVI y de allí se extendió hacia Europa y África, también llevaron este cultivo a las Filipinas y a las Antillas Orientales y de allí fue diseminado por los portugueses a la India y Malasia. En el siglo XVII, los marineros chinos de Fukien llevaron estas raíces de las Filipinas a varias regiones del sur de la China, a Taiwán y Japón. ^[3]

3.2 HIDRÓLISIS ÁCIDA

En 1970 investigadores japoneses descubrieron el proceso para la obtención del jarabe de maíz. La cantidad de glucosa presente en estos hidrolizados depende del método utilizado en su preparación, por ejemplo, hidrólisis ácida, ácido-enzimática o enzimática. ^[13]

Los procesos de hidrólisis de almidón para obtención de glucosa empiezan por la época de 1950 por acidificación con HCl a pH 1.5, a temperatura de 150°C, donde se obtenía en 45 minutos valores de dextrosa equivalente (ED) de 90 con 86% de glucosa. Hasta 1960 se continuaron los procesos por

acidificación; para tiempos de 5 a 10 minutos se obtenían ED de 12 a 20. Posteriormente se introdujeron las enzimas amiloglucosidasa y α -amilasa.^[6]

Diversos estudios de hidrólisis ácida realizados a diferentes tipos de material biológico como tubérculos (yuca, patata), sustratos residuales y cáscara de banano, muestran que una mayor temperatura de reacción y una mayor concentración de ácido generan un alto porcentaje de conversión.^[14, 15, 16, 17, 18]

Se han realizado estudios en la utilización de almidón de batata en la elaboración de jarabe de glucosa en la Escuela Agrícola Panamericana, donde se observó que el jarabe elaborado con almidón de batata tiene menor viscosidad que el de maíz y un contenido menor de glucosa.^[15]

3.3 ULTRAFILTRACIÓN

La separación, concentración y purificación de las especies químicas presentes en una mezcla es un problema importante en los campos más diversos: químico, biológico, farmacéutico, tecnología de los alimentos, medio ambiente, etc. En los últimos años, las técnicas convencionales o clásicas de resolver estos problemas, tales como destilación, cristalización, extracción con disolventes, etc., se están viendo desplazadas por un tipo diferente de procesos, basados en el empleo de membranas como elemento separador. La separación por estos métodos abarca desde partículas sólidas, inmiscibles que se hallan en fases líquidas o gaseosas, hasta la separación de solutos disueltos en fase líquida, pasando por la separación de mezclas de gases, tratándose en muchos casos de procesos de separación más rápidos, eficaces y económicos que los convencionales, el papel de la membrana es actuar como barrera selectiva, permitiendo el paso de ciertos componentes y reteniendo otros en la mezcla. De esta forma, bien el permeado o bien la fase retenida se enriquece en uno o más componentes.^[19]

La industria de la alimentación es el campo en el que la tecnología de membranas ha encontrado más diversas aplicaciones, y en el que su futuro está más ampliamente garantizado. Importantes progresos se han alcanzado en diversas ramas de esta actividad, que van desde la industria láctea, a la industria azucarera, y desde la industria de las bebidas (alcohólicas y no alcohólicas) y los extractos y jugos vegetales, a la de carnes y pescados.^[19]

La operación de ultrafiltración ha sido utilizada en diversos estudios entre estos: La evaluación de la eficiencia de la membrana de ultrafiltración para concentrar jarabe glucosado a partir de almidón de yuca^[20], para clarificación de jarabe de glucosa obtenido por hidrólisis enzimática del almidón en el cual se reportó un porcentaje de reducción de turbidez del 99.96%^[21] y en remoción de ácido fítico por ultrafiltración del agua de cocimiento de maíz.^[22]

4. METODOLOGÍA

4.1 PLANEACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

4.1.1 Factores, Niveles y variable respuesta

Para este experimento se cuenta con tres factores: 1) Tiempo de hidrólisis, 2) Temperatura y 3) Concentración de ácido. Los niveles correspondientes a cada uno de los factores se presentan en la Tabla 1, se analizó el efecto de cada uno de estos factores en el contenido final de glucosa en la solución.

Tabla 1. Niveles y factores del diseño experimental.

Tiempo(h)	Temperatura (°C)	Concentración de ácido
4	70 - 80	4
6	90 - 100	6
8	-	-

4.1.2 Tratamientos

Dado que se tienen tres niveles para el factor tiempo, dos para la temperatura y la concentración de ácido respectivamente, se tendrán entonces $3 \times 2 \times 2 = 12$ tratamientos, cada uno con dos réplicas. Por tanto, se tiene un total de 24 unidades experimentales. En la Tabla 2 se presenta cada una de las combinaciones de los niveles de los factores, que dan lugar a los tratamientos.

Tabla 2. Niveles de los tratamientos con dos réplicas cada uno.

Tratamiento			No. de sesión experimental	
Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Concentración de ácido		
4	70 – 80	4	1	2
4	70 – 80	6	3	4
4	90 – 100	4	5	6
4	90 – 100	6	7	8
6	70 – 80	4	9	10
6	70 – 80	6	11	12
6	90 – 100	4	13	14
6	90 – 100	6	15	16
8	70 – 80	4	17	18
8	70 – 80	6	19	20
8	90 – 100	4	21	22
8	90 – 100	6	23	24

4.1.3 Unidad Experimental

Se utilizó una concentración fija del 10 % de almidón de batata seco, el cual equivale a 15 g en la unidad de observación; la cual es representada por la dispersión (agua, almidón y ácido sulfúrico), que equivale a 150 g.

4.1.4 Proceso de Aleatorización

Las unidades experimentales se asignaron en orden aleatorio a cada tratamiento. En la Tabla 3 se observa la secuencia en la que se llevó a cabo el experimento, con el fin de garantizar la aleatorización y por ende la independencia de las observaciones. Por ejemplo, la primera unidad experimental debe estar en ebullición a reflujo en un tiempo de 4 horas, a una temperatura de 90 - 100°C y debe aplicársele una concentración de ácido del 4%.

Tabla 3. Secuencia de aleatorización de los tratamientos para la hidrólisis ácida.

Número de ejecución del experimento	Número de sesión experimental	Tratamiento		
1	6	4 horas	90 - 100 °C	4 %
2	13	6 horas	90 - 100 °C	4 %
3	8	4 horas	90 - 100 °C	6 %
4	3	4 horas	70 - 80 °C	6 %
5	2	4 horas	70 - 80 °C	4 %
6	10	6 horas	70 - 80 °C	4 %
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
22	7	4 horas	90 - 100 °C	6 %
23	1	4 horas	70 - 80 °C	4 %
24	5	4 horas	90 - 100 °C	4 %

4.1.5 Modelo de Diseño Experimental

Factorial con tres factores

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \begin{cases} i = 1, 2, 3 \\ j = 1, 2 \\ k = 1, 2 \\ l = 1, 2 \end{cases}$$

Dónde:

- y_{ijkl} = Porcentaje de azúcares reductores en la l -ésima réplica que ha sido expuesta tiempo i , con una temperatura j y con una concentración de ácido k .
- μ = Promedio global del porcentaje de azúcares reductores.
- τ_i = Efecto debido al tiempo i sobre el porcentaje de azúcares reductores.
- β_j = Efecto debido a la temperatura j sobre el porcentaje de azúcares reductores.
- γ_k = Efecto debido a la concentración de ácido k sobre el porcentaje de azúcares reductores.
- $(\tau\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción entre el tiempo i y la temperatura j sobre el porcentaje de azúcares reductores.
- $(\tau\gamma)_{ik}$ = Efecto de la interacción entre el tiempo i y la concentración de ácido k sobre el porcentaje de azúcares reductores.
- $(\beta\gamma)_{jk}$ = Efecto de la interacción entre la temperatura j y la concentración de ácido k sobre el porcentaje de azúcares reductores.
- $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ = Efecto de la interacción entre el tiempo i , la temperatura j y la concentración de ácido k sobre el porcentaje de azúcares reductores.
- ε_{ijkl} = Error aleatorio debido al tiempo i , la temperatura j y la concentración de ácido k en la l -ésima réplica.

a) Supuestos del Modelo

- $E[\varepsilon_{ijkl}] = 0 \quad \forall i, j, k, l$
- $V[\varepsilon_{ijkl}] = \sigma^2 I \quad \forall i, j, k, l$
- $Cov[\varepsilon_{ijkl}, \varepsilon_{i'j'k'l'}] = 0 \quad \forall i, i', j, j', k, k', l, l'$

b) Pruebas de hipótesis sobre el efecto de los factores

Inicialmente se desea contrastar si existe una interacción significativa entre el tiempo i , la temperatura j y la concentración de ácido k . De esta manera se plantea la siguiente hipótesis nula y alternativa respectivamente:

- $H_0: (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0 \quad \text{Vs.} \quad H_1: (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$

La hipótesis nula indica que no hay interacción entre los niveles de los factores, mientras que la hipótesis alternativa indica que existe interacción de los tres factores. En caso de que no se presente interacción entre los tres factores, interesa contrastar si existen diferencias entre los efectos simples de un factor

a diferentes niveles de otro, donde los efectos simples son comparaciones entre los niveles de un factor fijando un solo nivel del otro. Así, se da paso a las siguientes hipótesis:

- $H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0$ Vs. $H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ (Interacción Tiempo -Temperatura)
- $H_0: (\tau\gamma)_{ik} = 0$ Vs. $H_1: (\tau\gamma)_{ik} \neq 0$ (Interacción Tiempo -% de ácido)
- $H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0$ Vs. $H_1: (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$ (Interacción Temperatura -% de ácido)

De no presentarse la interacción entre los factores, es necesario probar de manera individual el efecto de cada factor dentro del experimento, dando lugar a las siguientes hipótesis:

- $H_0: \tau_i = 0$ Vs. $H_1: \tau_i \neq 0$
- $H_0: \beta_j = 0$ Vs. $H_1: \beta_j \neq 0$
- $H_0: \gamma_k = 0$ Vs. $H_1: \gamma_k \neq 0$

4.2 MATERIA PRIMA Y EQUIPOS DISPONIBLES

Los insumos, equipos y reactivos empleados se presentan en la Tabla4.

Tabla 4. Materia prima y equipos empleados.

ETAPA DEL PROCESO	MATERIA PRIMA	EQUIPOS
Extracción del almidón	2.5 kg de batata (Morada INTA).	Balanza de precisión
Hidrólisis ácida	2500 g de almidón de batata	Balanza de precisión. Montaje de ebullición en reflujo. Planchas de calentamiento. Termómetro infrarrojo. pH-metro. Refractómetro ATAGO 1T Espectrofotómetro Genesys 20. Filtro Buchner.
Ultrafiltración	10 L de Solución hidrolizada	Equipo de ultrafiltración con Módulos de ultrafiltración Pellicon 2 tipo cassette, conocido comercialmente como cartucho Pellicon II, es una membrana Biomax 10 de la compañía Millipore. -Refractómetro. -Turbidímetro HACH 2100AN

Comparación de características físicas y químicas del producto	-Solución hidrolizada y ultrafiltrada. -Jarabe de glucosa comercial	-Viscosímetro Brookfield. -Colorímetro Color Flex. -Refractómetro.
--	--	--

4.3 MÉTODOS

4.3.1 Extracción de Almidón^[10]

La obtención de almidón a partir de batata se realizó de acuerdo a las etapas de la Figura 1, en una proporción 1:1 (batata - agua):

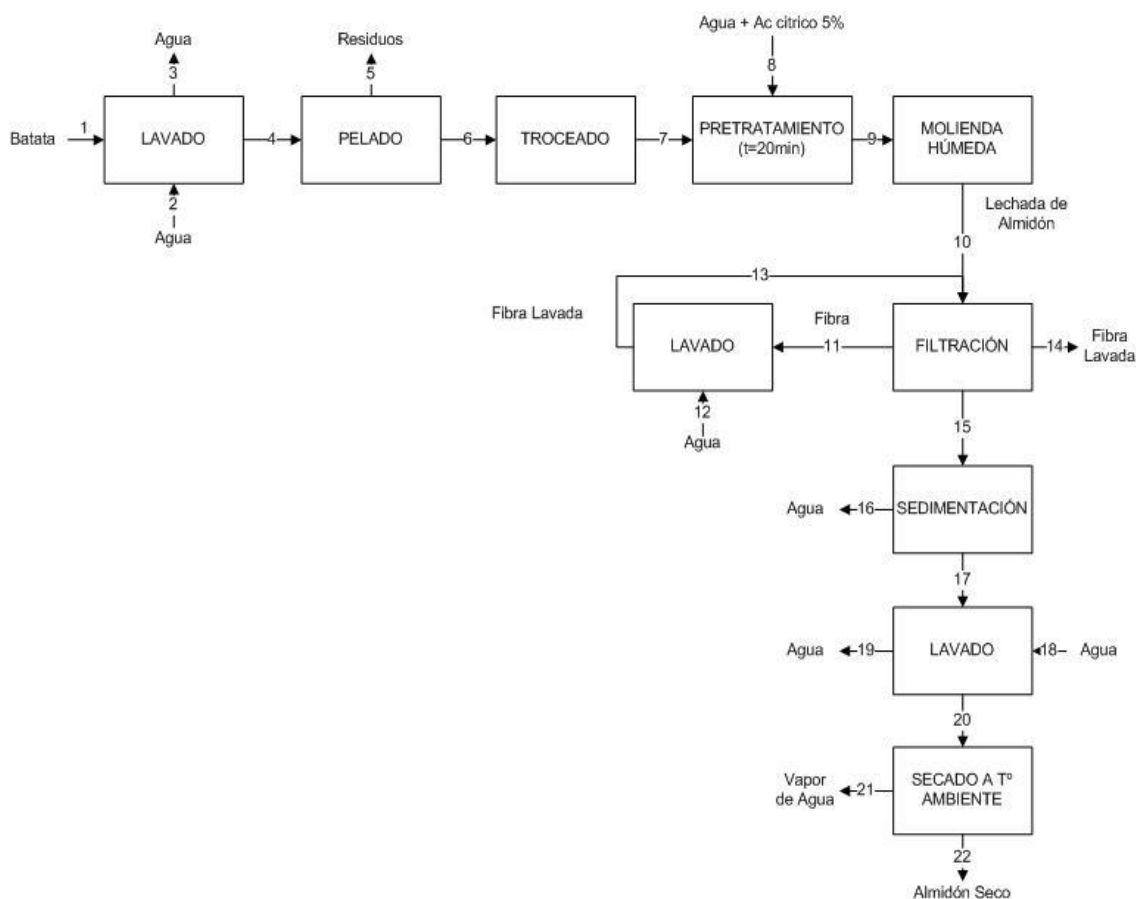


Figura 1. Diagrama de bloques para extracción de almidón.

En la corriente 8 del proceso, se agregó ácido cítrico al 5% p/v con el objetivo de disminuir el pardeamiento enzimático de la batata.

Se lavó tres veces la fibra retenida en la filtración, para extraer la mayor cantidad de almidón húmedo. Una vez sedimentado el almidón, se realizó un lavado para solubilizar el colorante y así obtener un almidón blanco.

Para realizar el secado, se depositó de manera uniforme el almidón húmedo sobre bandejas, las cuales se dejaron a temperatura ambiente durante un tiempo de 48 horas, hasta obtener una humedad aproximada del 12% (bh).

4.3.2 Hidrólisis Ácida

a) Hidrólisis del almidón

Las pruebas preliminares de hidrólisis ácida se realizaron según los parámetros establecidos por Reyes y Caicedo ^[14], la experimentación se llevó a cabo con 400 partes de agua y 100 partes de almidón seco, lo que es equivalente al 25 % de almidón, a diferentes concentraciones de ácido. Posteriormente, se prepararon dispersiones de almidón en agua en una concentración del 10%, el ácido sulfúrico se adicionó en dos concentraciones 4 y 6%. Las muestras se sometieron a ebullición en reflujo a diferentes rangos de temperatura (70 – 80 y 90 - 100°C) y tiempos (4, 6, 8 horas).

El proceso de hidrólisis ácida de almidón se representa en la Figura. 2



Figura 2. Diagrama de bloques para hidrólisis ácida de almidón de batata.

b). Neutralización y Filtración

La solución hidrolizada se neutralizó con hidróxido de sodio 5N, controlando el pH de la solución, hasta alcanzar el pH establecido en la NTC 610^[23] que varía entre 4 – 6. Las muestras se dejaron enfriar y se almacenaron para posterior filtración al vacío y medición de azúcares reductores (método de colorimetría).^[24]

4.3.3 Ultrafiltración

Se escogió la solución con mayor porcentaje de azúcares reductores y se sometió a ultrafiltración para separar las dextrinas del jarabe de glucosa. El

proceso de ultrafiltración se efectuó a temperatura ambiente, a presiones transmembranarias de 10 y 16.5psi en recirculación.

4.3.4 Comparación de las características físicas y químicas del producto obtenido con un jarabe de glucosa comercial.

Al producto ultrafiltrado se determinó el contenido de glucosa reportada como azúcares reductores mediante método colorimétrico, viscosidad y color^[25]. Los resultados de estas evaluaciones se compararon con los resultados de los análisis realizados a un jarabe de glucosa comercial.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 PRUEBAS PRELIMINARES

5.1.1 Extracción de almidón

Durante el pelado, troceado y molienda húmeda de la batata presentó pardeamiento enzimático, lo que originó una lechada de almidón de color café oscuro, por lo que en el procesamiento se debe incluir una técnica para disminuir el pardeamiento por ejemplo blanqueo, reducción del pH, tratamiento con sulfito, etc. ^[26]

Se evaluaron bisulfito de sodio y ácido cítrico para prevenir el pardeamiento enzimático de la lechada de almidón obtenida después de la etapa de molienda húmeda (Tabla 5).

Tabla 5. Pretratamientos aplicados a la batata para disminuir el pardeamiento enzimático.

Muestra	Pretratamiento	Concentración (% p/v)	Tiempo tratamiento (min)	Tiempo licuado (min)	Color obtenido
1	Agua+Ac.citrico	2	20	1	Café claro
2	Agua+Bisulfito ^[15]	0,1	20	1	Café oscuro
3	Agua+Bisulfito	0,5	20	1	Café oscuro
4	Agua+Ac.citrico ^[27]	5	20	1	Rosado claro

De la Tabla 5, se observa que el bisulfito no contribuyó a disminuir el pardeamiento de la lechada de almidón, generando en ésta una coloración oscura (anexo A) , a diferencia de lo sucedido en el estudio con almidón de Batata realizado por Chávez (2002) en el cual el bisulfito contribuyó a reducir el pardeamiento ^[15]; esta discrepancia en los resultados puede resultar de la diferencia en las variedades de batata utilizadas, variedad Bushbuck para el estudio de Chávez y variedad morada INTA para el presente estudio. El color más claro se obtuvo con ácido cítrico al 5% p/v, siendo este aceptable para continuar con el proceso de extracción.

También se evaluó la proporción de batata y agua (1:1 y 1:2) para extraer la mayor cantidad de almidón, este proceso se realizó a escala de laboratorio como se muestra en la Figura 3.

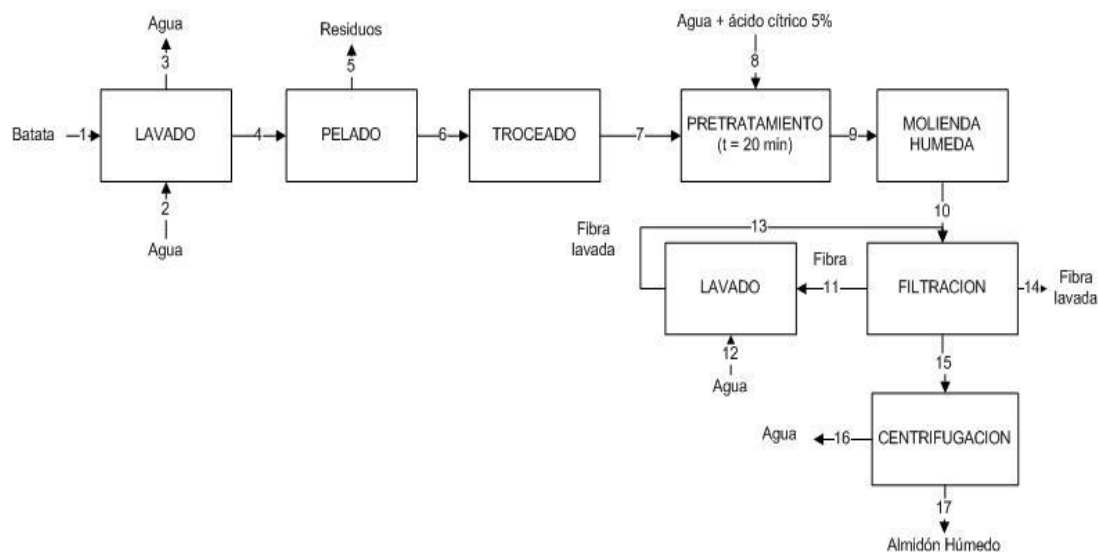


Figura 3. Diagrama de bloques para extracción de almidón a partir de batata a escala de laboratorio.

Teniendo en cuenta las corrientes de la etapa de centrifugación (Figura 3), se determinó el contenido de almidón (bh) para las dos proporciones de batata-agua.

Tabla 6. Porcentaje de almidón (bh) obtenido en diferentes proporciones batata – agua.

PROPORCION	% DE ALMIDON
1:1	13,98
1:2	11,12

A partir de la Tabla 6, se puede observar que la mayor cantidad de almidón (bh), se obtiene en la proporción 1:1, con un contenido de 13,98%, mientras que para la proporción 1:2 se obtuvo 11,12%.

5.1.2 Hidrólisis ácida del almidón

Las primeras pruebas de hidrólisis ácida se realizaron según los parámetros establecidos por Reyes y Caicedo ^[14], la experimentación se llevó a cabo con 400 partes de agua y 100 partes de almidón seco, lo que es equivalente al 25 % de almidón, estas pruebas se realizaron sin utilizar ebullición en reflujo lo que causó la formación de un gel no hidrolizable en medio ácido. En consecuencia de estos resultados, se hizo una reducción de la cantidad de almidón en suspensión a 12.5g (10.7%) en 100g de agua (85.55%), se utilizó una concentración fija de ácido sulfúrico (3.7%) y se sometieron las muestras a dos temperaturas (70-80 °C y 90-100°C), durante un tiempo fijo de dos horas sin ebullición a reflujo. El mayor porcentaje de azúcares reductores fue de 9.5 y se obtuvo en la muestra hidrolizada a 70 °C. Puesto que el almidón de batata

gelatiniza alrededor de los 70°C ^[28], se decidió pregelatinizar la suspensión antes de adicionar el ácido ya que la gelatinización causa un debilitamiento de la estructura del almidón facilitando el rompimiento de los enlaces^[29, 35].

5.2 PRUEBAS DEFINITIVAS

5.2.1 Extracción del almidón

Se procesaron diferentes cantidades de batata fresca para extraer el almidón necesario para las pruebas de hidrólisis ácida. Los porcentajes de almidón obtenidos en los diferentes lotes procesados durante la extracción del almidón son del orden de 20% (bh). El contenido de residuos como cascaras y materia prima en descomposición presenta una gran variabilidad (18 – 74 %) debido a que la materia prima empezaba su deterioro por sobremaduración.

En trabajos similares para hidrólisis enzimática de almidón de batata realizados por Chávez ^[15], el rendimiento en almidón fue del 20%, valor inferior al encontrado en este estudio, debido a la diferencia en las variedades utilizadas, el rendimiento obtenido 51-54% es similar al obtenido en plátano dominico hartón, los porcentajes de humedad son muy similares para los almidones de yuca, arracacha y batata, según puede observarse en la Tabla 7.

Tabla 7. Rendimiento de la extracción de almidón (bs) de diferentes tubérculos.

Almidón	% Humedad	% Rendimiento	% de Extracción
Achira ^[12, 30, 31]	15-17	10-13	31.2
Yuca ^[10]	12-13	17-29	76.6
Arracacha ^[12]	11-13	20-23	50
Ñame ^[12]	-	23-27	60.4
Plátano Dominico Hartón ^[32]	1,22	56-76	-
Banano ^[33]	1,5-3	21-22	73
Batata	12,5	51-54	74

La batata empleada en el presente trabajo contiene un 40 % de materia seca, así para un procesamiento de 2500g batata/día, 1000g son materia seca de la cual el 70% es almidón^[34], es decir 700g, se logro extraer 517.5 g almidón/día lo que muestra una tasa de extracción respecto al contenido de almidón de la raíz de 74%, similar a la tasa de extracción de banano y yuca según lo observado en la tabla 7.

El consumo de agua en las diferentes operaciones (lavado del tubérculo, pretratamiento, lavado de la fibra y del almidón) durante el proceso de extracción de almidón es de aproximadamente 50 L agua/kg de almidón seco (anexo B). Este valor es bajo comparado con otros tubérculos (Tabla 8).

Tabla 8. Cantidad de agua utilizada en el proceso de extracción de almidón a partir de diversos tubérculos.

Almidón	(L agua/kg almidón seco)
Arracacha ^[12]	80
Yuca ^[12]	30
Ñame ^[12]	220
Batata	50

5.2.2 Hidrólisis ácida del almidón

Las pruebas finales de hidrólisis ácida se efectuaron con ebullición a reflujo de soluciones de 150g de almidón, según el diseño experimental propuesto. Los resultados se reportan en la Tabla 9. De acuerdo con la misma, la concentración de azúcares reductores en los hidrolizados se encuentra en un rango de 8,05%± 0,909.

Tabla 9. Porcentaje de azúcares reductores para las diferentes soluciones hidrolizadas.

Corrida	% Azúcares reductores
1,1	8,25
1,2	7,99
2,1	7,36
2,2	8,28
3,1	7,53
3,2	7,67
4,1	6,59
4,2	7,12
5,1	7,84
5,2	8,78
6,1	7,08
6,2	8,65
7,1	7,92
7,2	7,36
8,1	6,91
8,2	9,13
9,1	7,63
9,2	6,60
10,1	8,34
10,2	8,55
11,1	11,14
11,2	8,63
12,1	8,73
12,2	9,25

El análisis exploratorio de los datos obtenidos y la estimación de la varianza del error experimental a través del ANOVA determinan la potencia de la prueba. El software estadístico empleado es MINITAB 15 y R 2.10.1.

La Figura 4 muestra el efecto que tiene el tiempo de hidrólisis en la concentración de azúcares reductores en las muestras tratadas a diferentes rangos de temperaturas y concentraciones de ácido. Se puede observar que el mayor porcentaje de azúcares reductores (9.88%) se obtiene a 4% de ácido, 8 horas y 70-80°C de temperatura, y el menor porcentaje de azúcares reductores (6.86%) se obtiene a 6% de ácido, 6 horas y 90-100°C de temperatura.

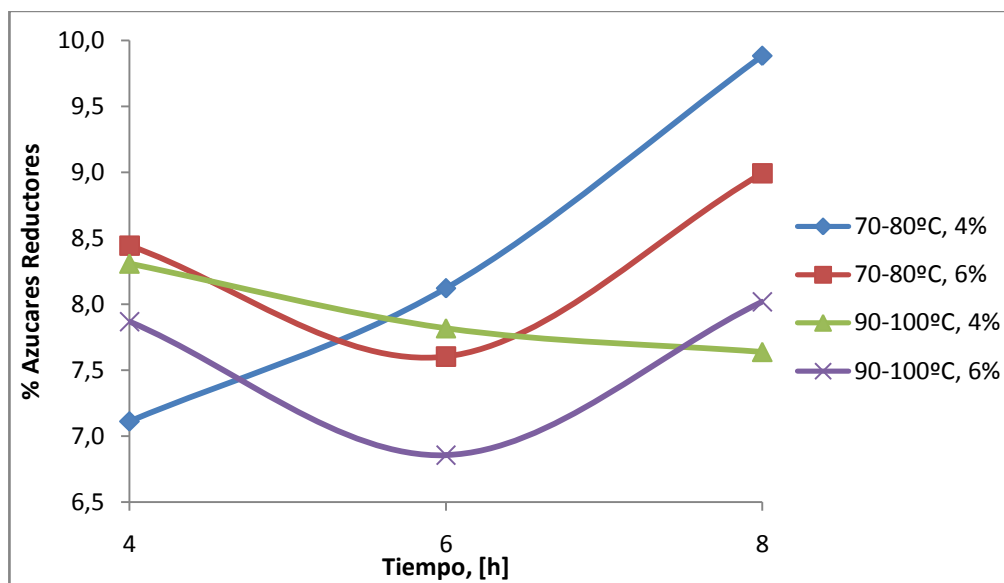


Figura 4. Efecto del tiempo de hidrólisis en el porcentaje de azúcares reductores.

Según experimentos realizados por Reyes y Caicedo ^[14] la cinética de la hidrólisis ácida para almidón de yuca es de primer orden, por lo tanto el porcentaje de conversión a azúcares reductores aumenta a medida que pasan el tiempo de tratamiento. Así, para una concentración de ácido constante, se obtiene un porcentaje de conversión de 58.5 después de 4 horas de hidrólisis y un porcentaje de conversión de 67.50 después de 6 horas. En la Figura 4 se puede observar que esto no se cumple ya que para casi todas las pruebas se presenta una fluctuación en la concentración de azúcares para el tiempo de 6 horas de hidrólisis, pero para casi todas las pruebas la mayor concentración de azúcares se obtiene después de 8 horas de tratamiento.

En la Figura 5 se puede observar que para casi todos los ensayos realizados se obtiene una mayor concentración de azúcares a menor concentración de ácido, es posible que a mayores concentraciones de ácido se produzca una

degradación de éstos a productos de descomposición (hidroximetilfurfural, ácido levulínico y ácido fórmico), los cuales pueden afectar los resultados de determinación de glucosa.

Esto se advierte por el oscurecimiento de las soluciones durante el proceso, similar a lo ocurrido durante hidrólisis ácida de desechos de uva ^[36] donde se trabajó con ácido sulfúrico a 4 - 10% v/v, y la mayor concentración de azúcares totales (13.45%) se logró a concentración de ácido de 6%. Igual ocurrió para hidrólisis de bagacillo de caña ^[37] a concentraciones de ácido sulfúrico de 2 - 8 % v/v, la mayor producción de azúcares reductores ($16,76 \pm 1,71$ g/L) se obtuvo con ácido sulfúrico al 6%.

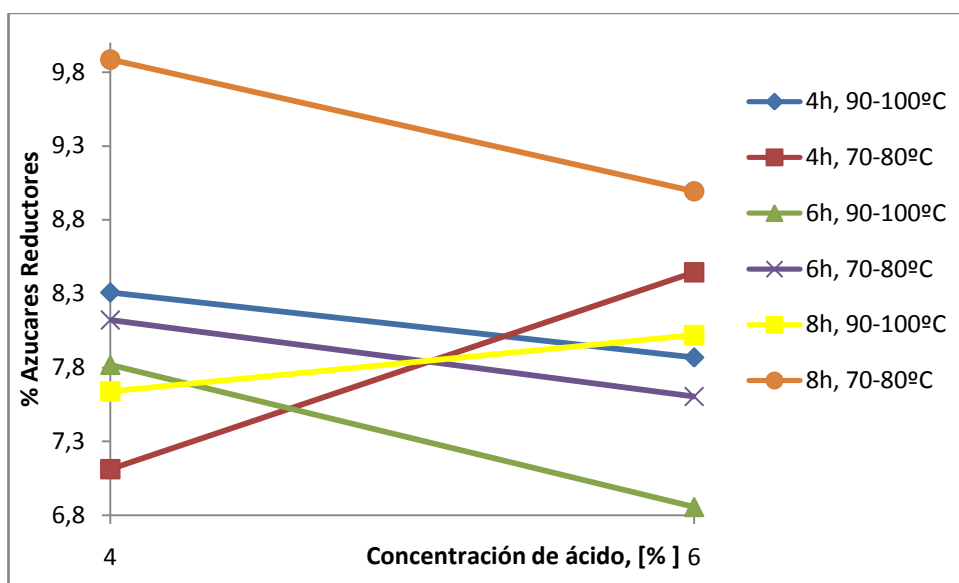


Figura 5. Efecto de la concentración de ácido sulfúrico en el porcentaje de azúcares reductores.

Según estudios de Duque y Salguero ^[36], cuando se utilizan altas concentraciones de ácido, la glucosa producida se polimeriza de nuevo, puesto que la velocidad de repolimerización incrementa con un aumento en la concentración de ácido, afectando así la medida de azúcares reductores finales, también que el uso de ácido diluido requiere de altas temperaturas de reacción, lo cual favorece la descomposición de la glucosa, lo que concuerda con lo observado en la Figura 6 ya que las mayores concentraciones de ácido se obtienen en los rangos de temperatura más bajos (70-80°C). Caso contrario se observa en los experimentos realizados por Reyes y Caicedo ^[14] donde el mejor rendimiento y rapidez de reacción se presenta a la mayor concentración de ácido, 7%. También difiere de experimentos realizados para hidrólisis ácida de celulosa ^[36] donde la velocidad de degradación es función del ácidohidrolizante, de su concentración y de la temperatura principalmente y de experimentos para hidrólisis ácida de almidón de papa ^[38] con HCl y H₂SO₄, en

los cuales la concentración final de azúcares reductores en el hidrolizado dependía del tipo y concentración de ácido y de la proporción material vegetal - ácido y no de la variedad de papa.

5.2.2.1 Análisis estadístico

Las n=24 mediciones sobre el porcentaje de azúcares reductores se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Porcentaje de azúcares reductores obtenidos en los diferentes tratamientos.

		Tiempo de ebullición en reflujo (h)					
		4		6		8	
Temperatura (°C)		70 - 80	90 - 100	70 - 80	90 - 100	70 - 80	90 - 100
Concentración ácido	4	7,63	7,84	8,25	7,36	11,14	7,92
		6,6	8,78	7,99	8,28	8,63	7,36
	6	8,34	7,08	7,53	6,59	8,73	6,91
		8,55	8,65	7,67	7,12	9,2	9,13

5.2.2.2 Análisis descriptivo del porcentaje de azúcares reductores

En la Figura 6 se observa que el mayor porcentaje de azúcares reductores corresponde al tratamiento durante un tiempo de 8 horas, una temperatura de 70 - 80°C y concentración de ácido del 4%.

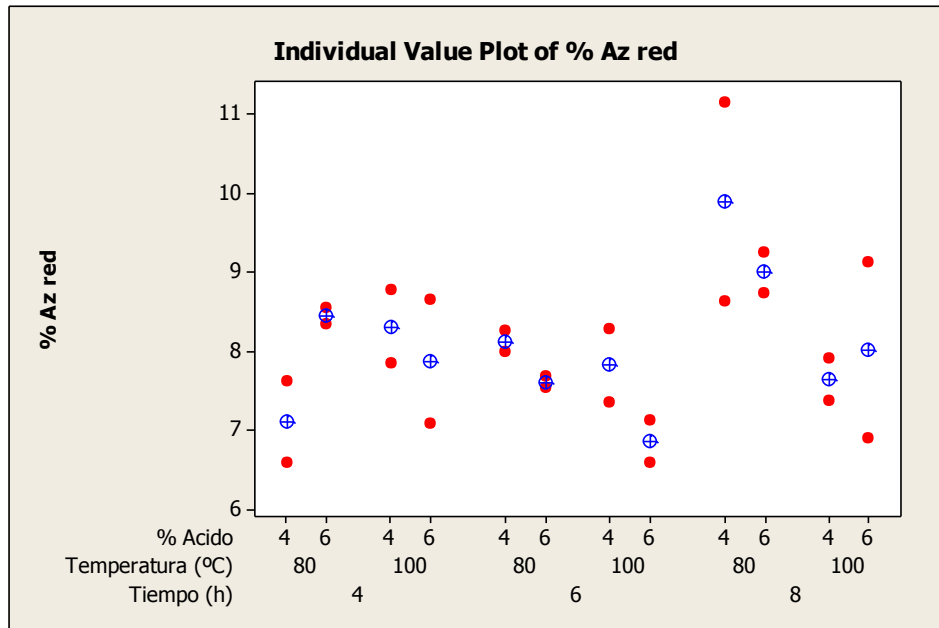


Figura 6. Distribución del Porcentaje de azúcares reductores.

5.2.2.3 Efectos principales e interacción entre factores

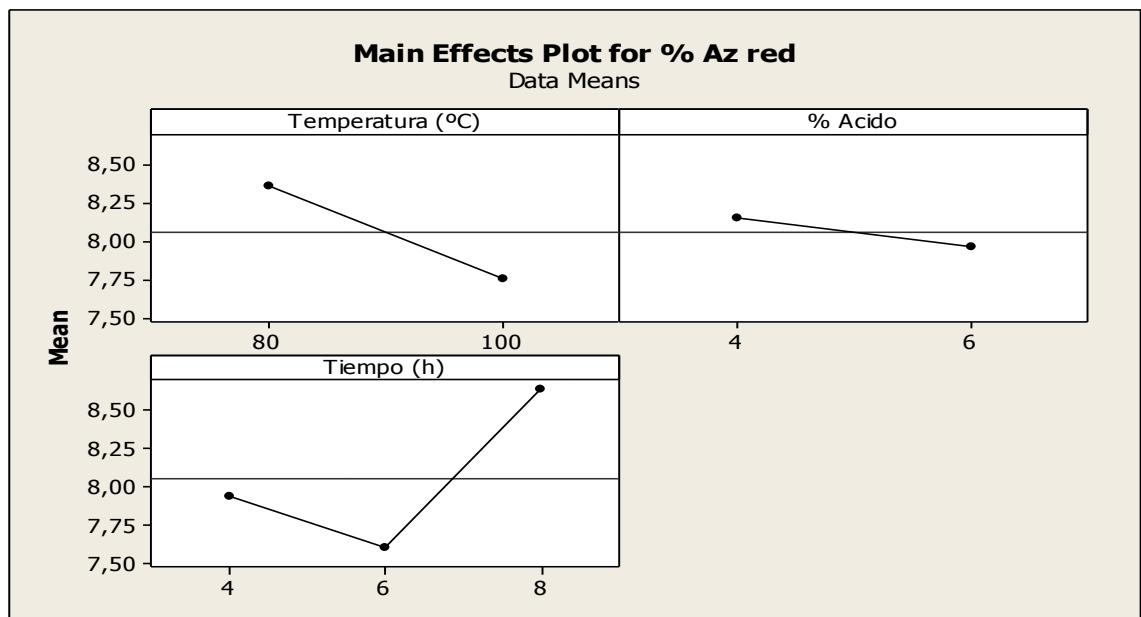


Figura 7. Efectos principales.

En la Figura 7 se puede observar que los porcentajes de azúcares reductores más altos se obtienen si se emplea una temperatura entre 70 - 80°C, una concentración de ácido del 4% y un tiempo de 8 horas.

A continuación se visualiza el comportamiento de las interacciones entre los factores:

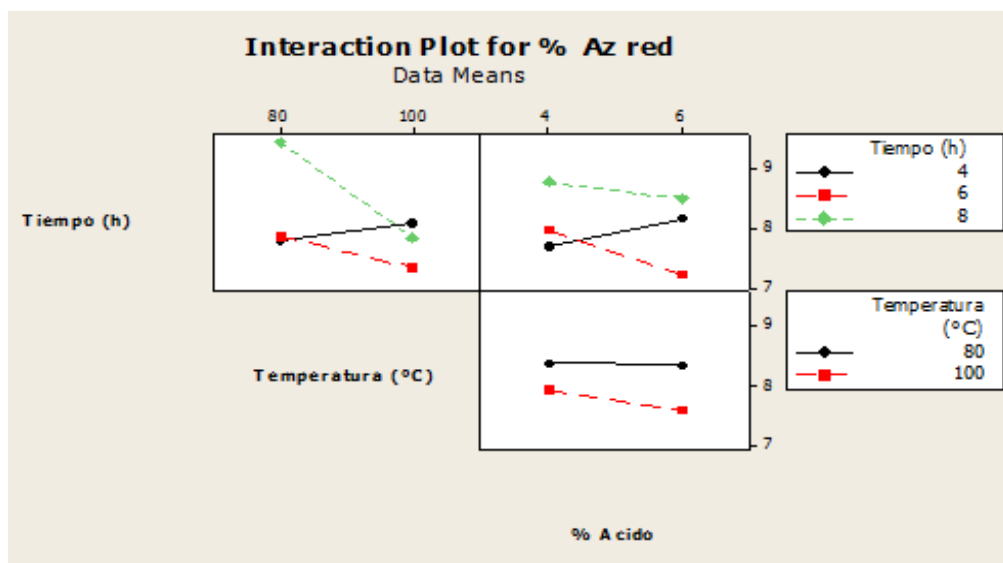


Figura8. Efectos de las interacciones entre los factores del experimento.

En la figura 8 se observa que existe una interacción entre el tiempo y la temperatura. Cuando se tiene una temperatura de 70 - 80°C, el porcentaje de azúcares reductores que se obtiene a un tiempo de 8 horas es mayor al obtenido para los tiempos de 6 y 4 horas. Al utilizar una temperatura de 90 - 100°C, se encuentra un mayor porcentaje de azúcares reductores en la solución a un tiempo de 4 horas, la cual difiere con los resultados para los otros dos niveles del factor tiempo. De esta manera el efecto del tiempo en el porcentaje de azúcares reductores depende de la temperatura empleada en el proceso de obtención de almidón.

5.2.2.4 Análisis de varianza

Tabla 11. General Linear Model: % Az red versus Temperatura .%Ácido.Tiempo (h)

Factor	Type	Levels	Values
Temperatura (°C)	fixed	2	70 - 80. 90 - 100
% Acido	fixed	2	4. 6
Tiempo (h)	fixed	3	4. 6. 8

Analysis of Variance for % Az red, using Adjusted SS for Tests							
Source	DF	SeqSS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Temperatura (°C)	1	2,2204	2,2204	2,2204	3,04	0,107	
% Acido	1	0,2010	0,2010	0,2010	0,28	0,609	
Tiempo (h)	2	4,4506	4,4506	2,2253	3,05	0,085	
Temperatura (°C)*% Acido	1	0,1492	0,1492	0,1492	0,20	0,659	
Temperatura (°C)*Tiempo (h)	2	3,7061	3,7061	1,8530	2,54	0,120	
% Acido*Tiempo (h)	2	1,4227	1,4227	0,7114	0,98	0,405	
Temperatura (°C)*% Acido*Tiempo (h)	2	2,3298	2,3298	1,1649	1,60	0,243	
Error	12	8,7536	8,7536	0,7295			
Total	23	23,2334					

S = 0,854089 R-Sq = 62,32% R-Sq(adj) = 27,79%

De la tabla ANOVA se puede observar que ninguna de las interacciones tiene efecto sobre el porcentaje de azúcares reductores, puesto que los valores de P son mayores a α (0.05) por lo tanto se acepta la hipótesis nula diciendo que estas interacciones no tienen efecto sobre la variable respuesta.

5.2.2.5 Pruebas de hipótesis

Hipótesis de efectos principales:

$$\begin{aligned} H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 & \quad vs H_a: \tau_i \neq 0 \text{ para algun } i \\ H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0 & \quad vs H_a: \beta_j \neq 0 \text{ para algun } j \\ H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_c = 0 & \quad vs H_a: \gamma_k \neq 0 \text{ para algun } k \end{aligned}$$

Hipótesis de interacción:

$$\begin{aligned} H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad \forall_{ij} & \quad vs H_1: \text{al menos una } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \\ H_0: (\tau\gamma)_{ik} = 0 \quad \forall_{ik} & \quad vs H_1: \text{al menos una } (\tau\gamma)_{ik} \neq 0 \\ H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0 \quad \forall_{jk} & \quad vs H_1: \text{al menos una } (\beta\gamma)_{jk} \neq 0 \\ H_0: (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0 \quad \forall_{ijk} & \quad vs H_1: \text{al menos una } (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0 \end{aligned}$$

5.2.2.6 Potencia de la prueba

A continuación se determina la potencia de la prueba que se obtiene con las condiciones experimentales aplicadas en este trabajo. Espor esto, que se hace necesario obtener cada una de las estimaciones para el tiempo, la temperatura y la concentración de ácido en la solución de almidón, así como cada una de las interacciones dobles y la interacción entre los tres factores ya mencionados, esto es:

Tabla 12 Estimación del efecto de cada uno de los tratamientos de los factores tiempo, temperatura, concentración de ácido y sus interacciones.

Efecto del factor	Valor	Efecto del factor	Valor
$\hat{\mu}$	8.053	$(\tau\gamma)_{31}$	0.040
$\hat{\tau}_1$	0.120	$(\tau\gamma)_{32}$	0.040
$\hat{\tau}_2$	0.455	$(\beta\gamma)_{11}$	0.077
$\hat{\tau}_3$	0.574	$(\beta\gamma)_{12}$	0.077
$\hat{\beta}_1$	0.302	$(\beta\gamma)_{21}$	0.077
$\hat{\beta}_2$	0.302	$(\beta\gamma)_{22}$	0.077
$\hat{\gamma}_1$	0.095	$(\tau\beta\gamma)_{111}$	0.367
$\hat{\gamma}_2$	0.095	$(\tau\beta\gamma)_{112}$	0.367
$(\tau\beta)_{11}$	0.455	$(\tau\beta\gamma)_{121}$	0.367
$(\tau\beta)_{12}$	0.455	$(\tau\beta\gamma)_{122}$	0.367
$(\tau\beta)_{21}$	0.040	$(\tau\beta\gamma)_{211}$	0.035
$(\tau\beta)_{22}$	0.040	$(\tau\beta\gamma)_{212}$	0.035
$(\tau\beta)_{31}$	0.496	$(\tau\beta\gamma)_{221}$	0.035
$(\tau\beta)_{32}$	0.496	$(\tau\beta\gamma)_{222}$	0.035
$(\tau\gamma)_{11}$	0.316	$(\tau\beta\gamma)_{311}$	0.402
$(\tau\gamma)_{12}$	0.316	$(\tau\beta\gamma)_{312}$	0.402
$(\tau\gamma)_{21}$	0.276	$(\tau\beta\gamma)_{321}$	0.402
$(\tau\gamma)_{22}$	0.276	$(\tau\beta\gamma)_{322}$	0.402

$\hat{\mu}$ = Media general de las observaciones

$\hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2$ = Estimación del efecto de los tratamientos del factor *tiempo*

$\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ = Estimación del efecto de los tratamientos *temperatura*

$\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2$ = Estimación del efecto de los tratamientos *concentración de ácido*

$(\widehat{\tau\beta})_{11}, (\widehat{\tau\beta})_{12}, (\widehat{\tau\beta})_{21}, (\widehat{\tau\beta})_{22}, (\widehat{\tau\beta})_{31}, (\widehat{\tau\beta})_{32}$ = Estimación del efecto de la interacción entre el *tiempo y temperatura*

$(\widehat{\tau\gamma})_{11}, (\widehat{\tau\gamma})_{12}, (\widehat{\tau\gamma})_{21}, (\widehat{\tau\gamma})_{22}, (\widehat{\tau\gamma})_{31}, (\widehat{\tau\gamma})_{32}$ = Estimación del efecto de la interacción entre el *tiempo y concentración de ácido*

$(\widehat{\beta\gamma})_{11}, (\widehat{\beta\gamma})_{12}, (\widehat{\beta\gamma})_{21}, (\widehat{\beta\gamma})_{22}$ = Estimación del efecto de la interacción entre *temperatura y concentración de ácido*

$(\widehat{\tau\beta\gamma})_{111}, (\widehat{\tau\beta\gamma})_{112}, \dots, (\widehat{\tau\beta\gamma})_{322}$ = Estimación del efecto de la interacción entre el *tiempo, la temperatura y concentración de ácido*. (Anexo E)

A partir de estas estimaciones, se puede determinar el parámetro de no centralidad λ para los factores A, B y C, las interacción AB, AC y BC, y la interacción entre los tres factores, Estos valores se presentan a continuación:

Tabla 13. Valores de no centralidad para los diversos factores e interacciones.

λ_A	6,0383
λ_B	2,9939
λ_C	0,2969
λ_{AB}	4,9885
λ_{AC}	1,9512
λ_{BC}	0,1934
λ_{ABC}	3,2601

El cálculo de la potencia requiere de las siguientes entradas: $(\alpha, v_1, v_2 \text{ y } \lambda)$. Dado que el parámetro de no centralidad es diferente para el tiempo, temperatura y concentración de ácido, así como también difieren los valores de v_1 los cuales corresponden a los grados de libertad de cada fuente de variación, se requiere trabajar las entradas para los siete parámetros λ de cada factor y las interacciones, a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Donde v_2 y σ^2 corresponden a los grados de libertad y cuadrado medio del error experimental. La obtención de las potencias de la prueba F no central se realiza en el software estadístico R 2.10.1, a través de la función `pf()`. Los resultados se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Potencia de la prueba $(1 - \beta)$.

$(1 - \beta)_A$	$(1 - \beta)_B$	$(1 - \beta)_C$	$(1 - \beta)_{AB}$	$(1 - \beta)_{AC}$	$(1 - \beta)_{BC}$	$(1 - \beta)_{BC}$
0.4770	0.3568	0.0794	0.4045	0.1808	0.0691	0.2777

Es notable que la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando realmente esta es falsa, para el tiempo y la temperatura, así como para la interacción entre estos dos factores y la interacción entre los tres factores, corresponde a las potencias de la prueba más altas. Sin embargo, la probabilidad de detectar diferencias cuando realmente las hay en el efecto de la interacción triple es tan sólo del 27.7%.

5.2.2.7 Comparaciones múltiples

Tabla 15. Pruebas de comparación-Valores promedio de los diferentes tratamientos aplicados.

	70 - 80°C		90 - 100°C	
Tiempo (h)	4%	6%	4%	6%
4	7,11	8,45	8,31	7,87
6	8,12	7,6	7,82	6,86
8	9,88	8,99	7,64	8,02
	q	3,77	T_{0,05}	2,28

$$T_{\alpha} = q_{\alpha(a;abc(n-1))} \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \Rightarrow T_{0.05} = q_{0.05(3;12)} \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \Rightarrow T_{0.05} = 3.77 \sqrt{\frac{0.7295}{2}} = 2.28$$

Se deben realizar varias comparaciones entre los diversos tratamientos, para este caso se fijaron dos factores, la temperatura y la concentración de ácido, con el objetivo de observar el efecto del tiempo.

- **T= 70 - 80°C, concentración de ácido 4%.**

T= 70 - 80°C y 4% ácido		
4h	1,01 < 2,28	no hay diferencia
6h	2,77 > 2,28	hay diferencia
8h	1,76 < 2,28	no hay diferencia

- **T= 70 - 80°C, concentración de ácido 6%.**

T= 70 - 80°C y 6% ácido		
4h	0,85 < 2,28	no hay diferencia
6h	0,54 < 2,28	no hay diferencia
8h	1,39 < 2,28	no hay diferencia

En estas comparaciones se puede decir, que a pesar de que las especificaciones iniciales son diferentes (temperatura y concentración de ácido), el tratamiento que presenta diferencia es aquel que se realizó a 6 horas a una temperatura de 70 - 80 °C y concentración de ácido de 4%.

- **T= 90 - 100°C, concentración de ácido 4%.**

T= 90 - 100°C y 4% ácido		
4h	0,49 < 2,28	no hay diferencia
6h	0,67 < 2,28	no hay diferencia
8h	0,18 < 2,28	no hay diferencia

- **T= 90 - 100°C, concentración de ácido 6%.**

T= 90 - 100°C y 6% ácido		
4h	1,01 < 2,28	no hay diferencia
6h	0,15 < 2,28	no hay diferencia
8h	1,16 < 2,28	no hay diferencia

En estas comparaciones se observa que cuando se trabaja bajo estas condiciones, no se presenta diferencia alguna por efecto del tiempo.

En general se puede observar de la tabla 15, que el mejor tratamiento es el que se efectúa a una temperatura de 70 - 80 °C en un tiempo de 8 horas y con una concentración de ácido del 4%. El tratamiento en el que se obtiene el menor porcentaje de azúcares reductores es el efectuado a una temperatura de 70 - 80 °C en un tiempo de 4 horas y a una concentración de ácido del 4 %.

5.2.2.8 Validación de supuestos

a) Normalidad de los errores.

Uno de los supuestos subyacentes en la modelación es que los errores tienen una distribución normal, de esta manera se plantean las siguientes hipótesis:

- H_0 : Los errores tienen una distribución normal
 H_1 : Los errores no tienen una distribución normal

El grafico de probabilidad normal es una línea recta. Se puede observar que en la Figura9 este principio se cumple.

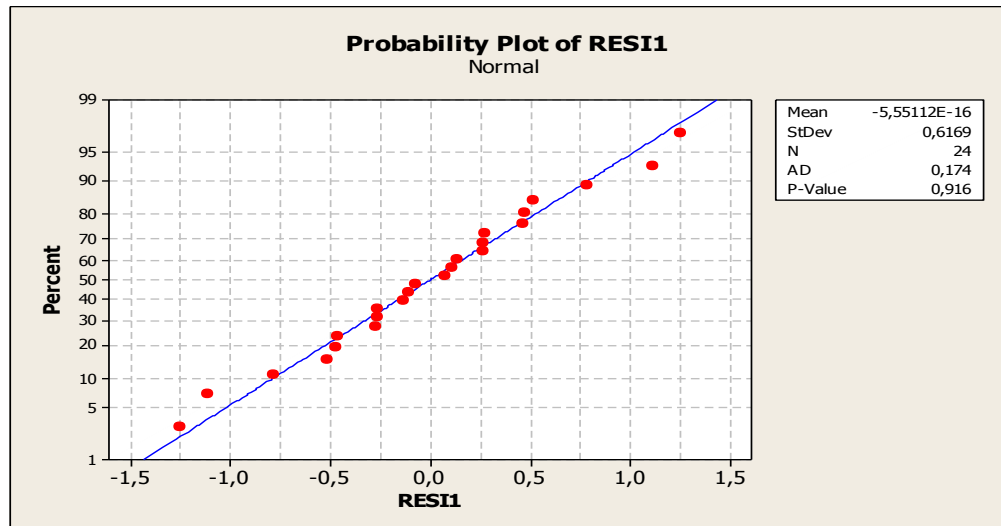


Figura 9. Probabilidad Normal.

Realizando la prueba analítica de Anderson-Darling, se corrobora lo observado en los gráficos. Según el valor P obtenido (0.916) mayor que α (0.05), se acepta la hipótesis nula, es decir, no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis de normalidad de los errores.

b) Independencia de errores

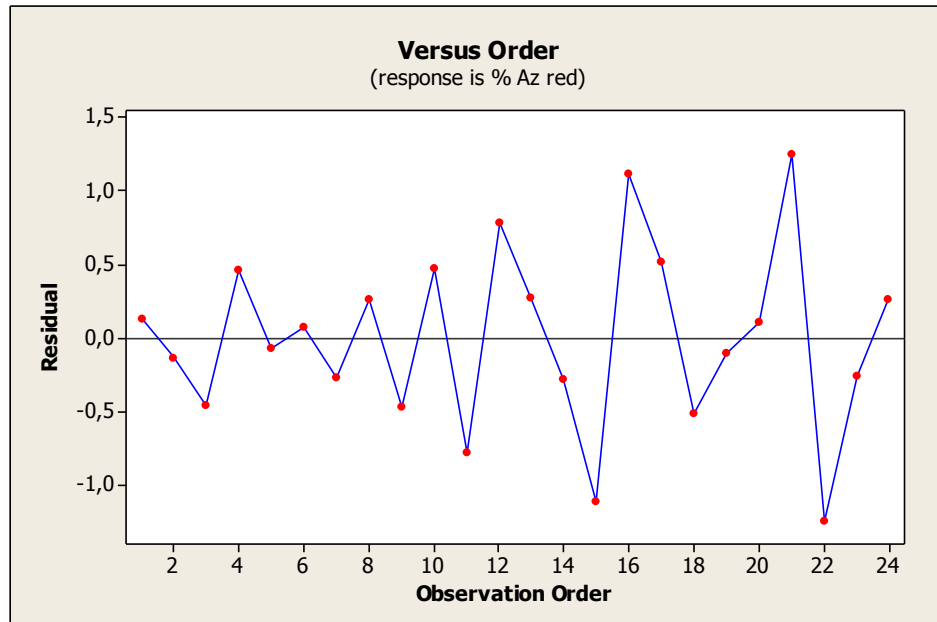


Figura 10. Gráfica prototipo de los residuales que muestran autocorrelación en los errores

De acuerdo a la Figura 10, no hay una clara evidencia de autocorrelación positiva o negativa de los residuales.

H_0 : Los errores son independientes
 H_1 : Los errores no son independientes

Runs Test: RESI1

```
Runs test for RESI1
Runs above and below K = -5,55112E-16
The observed number of runs = 17
The expected number of runs = 13
12 observations above K. 12 below
P-value = 0,095
```

El valor P (0.095) es mayor que α (0.05), por tanto se acepta la hipótesis nula de independencia de los errores.

c) Homogeneidad de varianza y especificación correcta del modelo.

De acuerdo a lo observado en la Figura 11, los residuales se encuentran centrados en el valor cero, y se pueden encerrar en una banda horizontal, lo cual indica que la varianza es constante y no es función creciente de y .

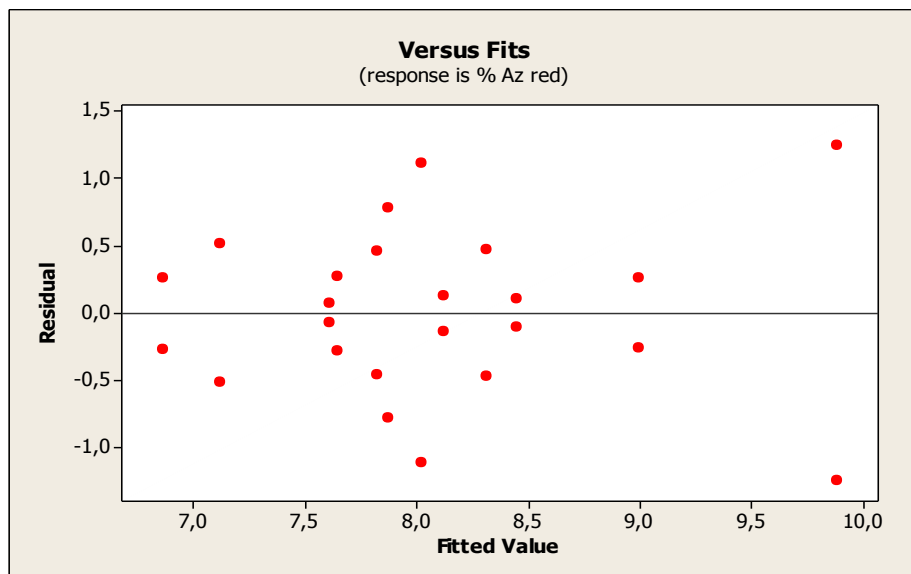


Figura 11. Residuales en función de los valores ajustados

Aplicando una prueba t para evaluar la hipótesis de que los residuales tienen media cero, se encontró que el p-value es igual a 1, lo cual indica que no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula que indica que los residuales tienen centramiento en cero. Además, la construcción de un intervalo de confianza del 95% para los residuales contiene el valor de cero, lo cual sustenta lo anteriormente dicho.

One-Sample T: RESI1

Test of $\mu = 0$ vs not = 0

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
RESI1	24	-0,000	0,617	0,126	(-0,261, 0,261)	-0,00	1,000

La hipótesis de homogeneidad de la varianza está dada por:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2$$

$$H_1: \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2; \forall i \neq j \text{ donde } i, j = 1, 2, 3, \dots, k$$

Como el error tiene aproximadamente una distribución normal, entonces la prueba de Bartlett tiene un buen desempeño. Según el valor P obtenido (0.514) mayor que el nivel de significancia α (0.05), se concluye que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que las varianzas son iguales.

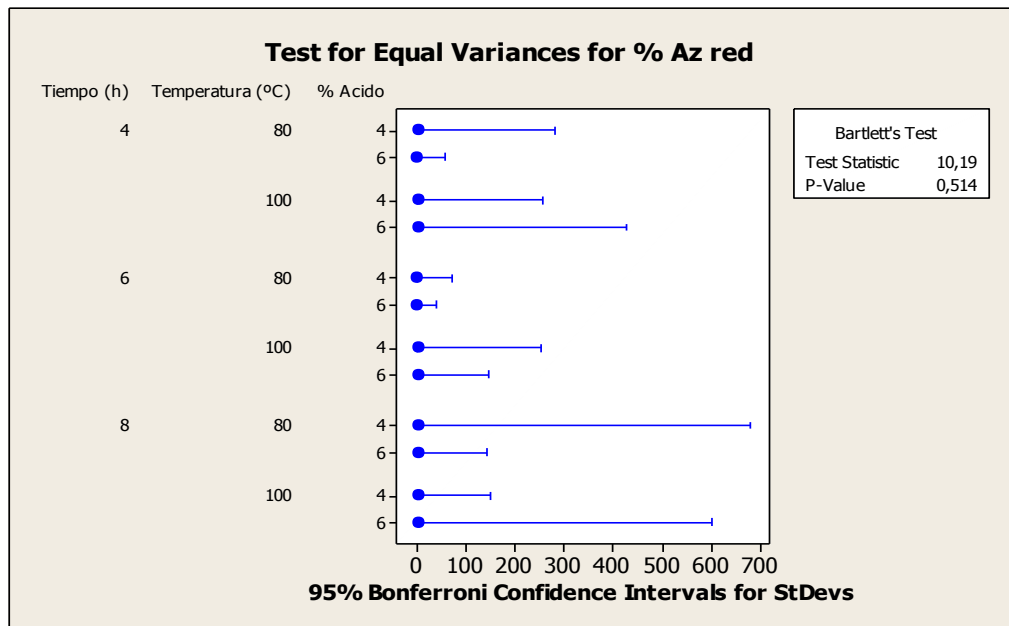


Figura 12. Test Bartlett para valorar la homogeneidad de la varianza

5.2.3 Ultrafiltración del jarabe de glucosa

Se midió la turbidez del hidrolizado obtenido, el resultado fue de 56 NTU.

Al hidrolizado se le realizó filtración al vacío antes de iniciar la operación de ultrafiltración, con el objetivo de retirar las partículas suspendidas, después de filtrar se obtuvo un valor de 6 NTU.

La filtración al vacío redujo la turbidez del jarabe en un 89.3%, al ultrafiltrar el jarabe, el valor reportado siguió siendo de 6 NTU, es decir que, utilizar la operación de ultrafiltración para reducir la turbidez es innecesaria.

Para la alimentación de la membrana se utilizó el hidrolizado de almidón, cuyo contenido de azúcares reductores se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Porcentaje de azúcares reductores del hidrolizado.

Muestra	% Azúcares reductores
1,1	9,22
1,2	9,77

Se evaluó la Influencia de la presión transmembranaria en el contenido de azúcares reductores del jarabe en el volumen de permeado. La operación de ultrafiltración se realizó a presiones transmembranarias de 10 y 16.5 psi.

Tabla 17. Porcentaje de azúcares en las diferentes corrientes después de la ultrafiltración a diferentes PTM.

PTM = 10.0 psi		PTM = 16,5 psi	
Flujo	%	Flujo	%
Alimentación	5,65	Alimentación	7,96
Retenido	6,89	Retenido	8,34
Permeado	4,66	Permeado	8,07

De la Tabla 17 se puede observar que la diferencia más significativa entre los porcentajes de azúcares reductores para las corrientes de ultrafiltración se da a presión de 10 psi.

A PTM de 10 y 16.5 psi, se observa que la mayor concentración de azúcares se presenta en el retenido, concluyendo de esta manera que el proceso de ultrafiltración no es efectivo para filtrar las moléculas de glucosa obtenidas en la hidrólisis ácida del almidón de batata, estos resultados hacen referencia a que en esta experimentación las PTM generan una disminución en el paso de azúcares reductores a través de la membrana, quedando en mayor concentración en el flujo del retenido.

A PTM de 16.5 psi se observa que la concentración de azúcares reductores en las diferentes corrientes presenta valores similares, deduciendo que las altas PTM no generan efecto alguno sobre la concentración de los azúcares reductores en el permeado y el retenido.

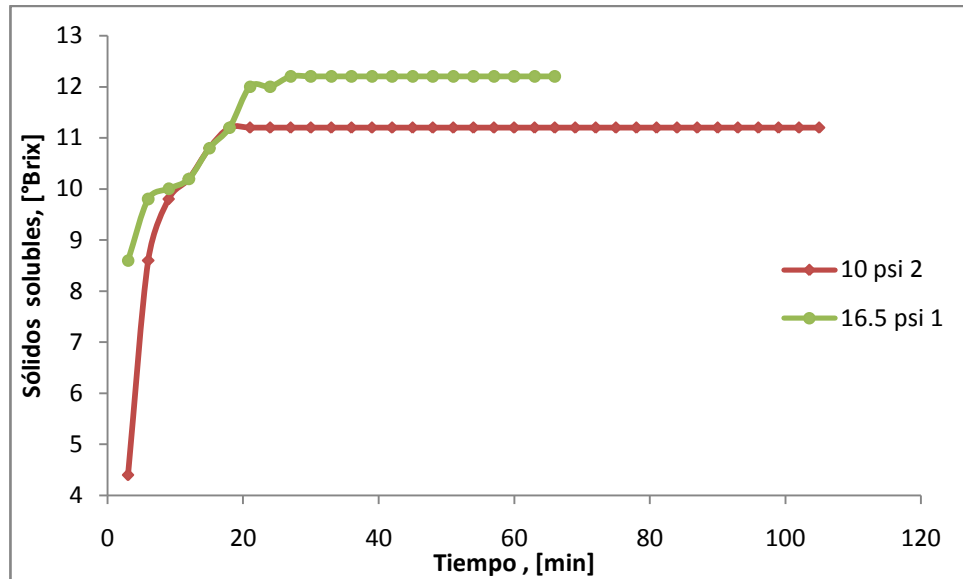


Figura 13. Variación de los sólidos solubles en el Fp, durante el proceso de ultrafiltración a diferentes PTM.

De la Figura 13 se puede observar que se presenta mayor concentración de sólidos solubles en menor tiempo para la presión más alta (16.5 psi) alcanzando valores hasta de 12.2°Brix. Para las dos PTM, se observa que se alcanza una estabilización de sólidos solubles en un tiempo de 20 min.

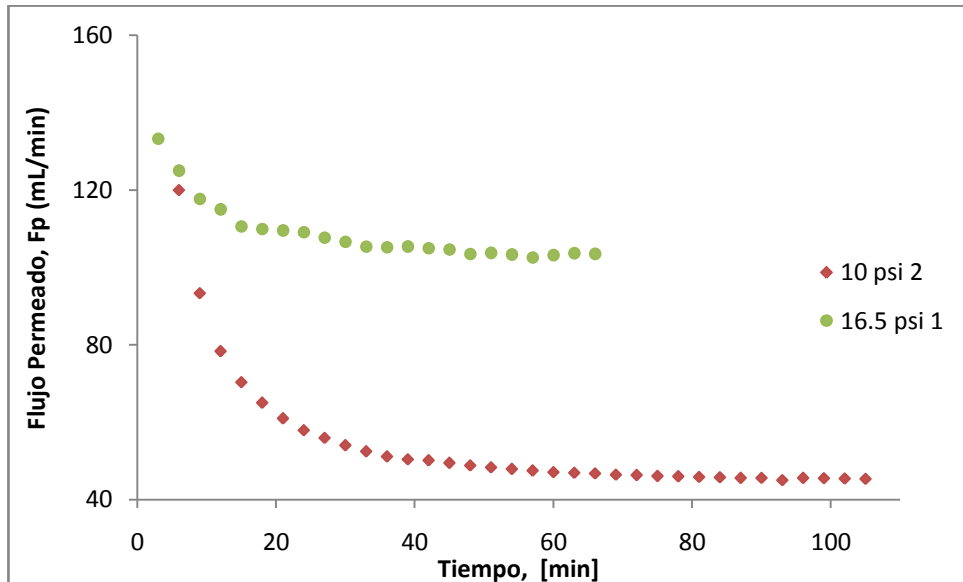


Figura 14 Variación del Fp durante el proceso de ultrafiltración a diferentes PTM.

De la Figura 14 se puede observar que el flujo de permeado es mayor a PTM de 16.5 psi, donde se obtienen flujos de 140 mL/min, el aumento del flujo de permeado genera la disminución del flujo de retenido, debido a que hay mayor paso de fluido a través de la membrana y conduce a los sólidos presentes a la superficie de la misma ^[39]. También se observa que durante la mayor parte de los

experimentos, los flujos de permeado disminuyeron rápidamente en los primeros 20 min, Esto descendió a causa de una polarización de la membrana, lo que disminuyó la eficiencia global del proceso de filtración.^[40]

5.2.4 Comparación de las características físicas y químicas del producto obtenido con un jarabe de glucosa comercial.

Después de obtener el producto final se procedió a realizar tres pruebas, con el objetivo de compararlo con un jarabe comercial.

Tabla 18. Porcentaje de azúcares reductores, color y viscosidad para el producto obtenido y un jarabe comercial.

	% A. reductores	Color	Viscosidad (cP)
Producto obtenido	9.45	L=5,43	2.5
		a=-1,74	
		b=4,88	
Jarabe comercial	35.93	L=10,47	130x10 ³
		a=-0,86	
		b=-1,25	

Como se observa en la Tabla 18, el producto obtenido presenta gran diferencia del jarabe de glucosa comercial, se observa que el porcentaje de azúcares reductores es mucho mayor en el jarabe comercial, puesto que el producto obtenido tiene una cantidad de azúcares reductores de aproximadamente el 10 %, este no puede ser considerado como jarabe de glucosa, según lo establecido en la NTC. 610^[23], ya que para considerarse como jarabe de glucosa el valor de ED debe estar entre 20 – 70.

Comparando parámetros físicos como la viscosidad se observa en la Tabla 18, que esta es demasiado baja en comparación al jarabe comercial,

El color del producto obtenido es amarillo y el jarabe comercial es incoloro. En la tabla 14 se observa que el jarabe de glucosa comercial posee un valor de L 10.47 el que difiere del jarabe obtenido que presenta 5.43.

6. CONCLUSIONES

- La extracción acuosa del almidón de batata demuestra ser una buena opción tecnológica siempre que se sumerjan los tubérculos en una solución de ácido cítrico (5% p/v) durante 20 minutos, para disminuir el pardeamiento enzimático.
- La hidrólisis ácida del almidón de batata se ve favorecida cuando se efectúa a baja temperatura y con bajas concentraciones de ácido. Mayores tiempos de reacción y/o mayores concentraciones de ácido generan una rápida formación de productos de descomposición lo que se manifiesta en el oscurecimiento del hidrolizado.
- El mayor porcentaje de azúcares reductores en el jarabe fue de 9.88% el cual no es suficiente para considerarlo jarabe de glucosa.
- La ultrafiltración en las condiciones estudiadas, no resulta ser un proceso eficiente para la clarificación ni para la filtración de moléculas de glucosa del producto obtenido.

7. RECOMENDACIONES

- Debido a la alta cantidad de fibra obtenida en el proceso, se recomienda utilizarla como materia prima para la producción de alimento para animales.
- Se recomienda seguir investigando sobre el proceso de extracción de almidón a partir de batata, especialmente la aplicación de pretratamiento para disminuir el pardeamiento enzimático.
- Realizar un estudio mediante hidrólisis enzimática o ácido enzimática para evaluar el porcentaje de conversión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Clayuca. "Ventajas productivas de la batata". Edición N°6, marzo de 2004. Cali, Colombia http://www.clayuca.org/clayucanet/edicion06/noticia_batata.htm. (25/10/09).
2. Albán T., Álvaro A., Cadavid L., Luis F. "Producción y usos de batata". International Center of Tropical Agriculture. <http://www.ciat.cgiar.org/Newsroom/Documents/pdf_seminars/061018_Sistemas_Produccion_Batata-A_Alban.pdf> (25/10/09.)
3. Jarret R.L. "Cultivo de Tejidos del Camote". , Capitulo 18. Tropical Research and education center, institute of food and agricultural sciences. University of Florida, homestead, Florida, E.U. <www.ciat.cgiar.org/biotechnology/cultivo_tejidos/capitulo18_parte1.pdf>. (25/10/09.)
4. Rodríguez G. "Caracterización de variedades de batata (*Ipomoea batata*) con el fin de desarrollar un puré que sea fuente para la elaboración de productos preformados en MCCAÍN COLOMBIA". Proyecto de grado. Universidad de la Salle. Bogotá 2008. <http://tegra.lasalle.edu.co/dspace/bitstream/10185/1407/1/43031015.pdf>. (01/11/09).
5. Achata A., Fano H., Goyas H., Chiang O., Andrade Marissa. El Camote (Batata) en el Sistema Alimentario del Perú, El caso del Valle de Cañete. Sistemas alimentarios Serie de investigación No. 5. Instituto de investigación agroindustrial (INIAA), centro internacional de la papa (CIP). Lima, 1990.
6. López, A., García M., Quintero R. Biotecnología alimentaria. Agustín. LIMUSA. México. 1998.
7. Información tecnológica, vol. 5 N°1-1994. Revista Información Tecnológica
8. Valentas K., Rotstein E., Singh P. Handbook of Food Engineering Practice. CRC Press. New York. 1997.
9. Seymour R, Carraher C. Introducción a la química de los polímeros. Editorial Reverté. 2002. España.
10. Aristizabal J., Sánchez T., Mejía Lorio D. Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de servicios agrícolas de la FAO 163. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.
11. Roca W, Mroginski L. Cultivo de Tejidos en la agricultura. Fundamentos y Aplicaciones. Centro internacional de agricultura tropical. CIAT. Colombia. 1991 <http://books.google.com/books?id=EXijYNw55DUC&printsec=frontcover&dq=cultivo+de+tejidos+en+la+agricultura&hl=es&ei=1VTqTdbfKOe_0AG36K2dCg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCkQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false>. (10-05-11)

- 12.** CORPOICA. “Concepción de un modelo de agroindustria rural para la elaboración de harina y almidón a partir de raíces y tubérculos promisorios, con énfasis en los casos de achira, arracacha y ñame”. Tibaitatá, Diciembre 2003. <http://www.agronet.gov.co/www/docs_si2/Agroindustria%20para%20la%20elaboracion%20de%20harina%20de%20achira.pdf>. (07/01/11).
- 13.** “Los carbohidratos en la nutrición humana”. Estudio FAO alimentación y nutrición. Abril de 1997. http://books.google.com.co/books?id=FZ_ed5pkNdoC&pg=PA72&dq=%22jarabe+de+maiz%22&lr=&as_brr=3&client=firefox-a#v=onepage&q=%22jarabe%20de%20maiz%22&f=false> (20/11/09).
- 14.** Reyes Manrique E., Caicedo E. Obtención de dextrina y glucosa a partir del almidón de yuca por hidrólisis ácida. Trabajo de Grado. Universidad del Valle, Cali- Colombia, 1983.
- 15.** Chávez P. Daniel E. Elaboración de jarabe de glucosa partiendo del almidón de camote (*Ipomoea batata* L.). Trabajo de Grado. Escuela Agrícola Panamericana. El Zamorano. Honduras, Diciembre 2002.
- 16.** Fonseca S. Elsa B. Oviedo Angélica M. Vargas Inés J. Hidrólisis ácida de sustratos residuales agroindustriales colombianos. Fundación Universitaria Manuela Beltrán. Bogotá. Colombia. 2006.
- 17.** John F. Monsalve G. Victoria Isabel Medina de Pérez. Ángela Adriana Ruiz Colorado. Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y de almidón de yuca. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2006. <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/496/49615002.pdf>> (25/11/09).
- 18.** Marija B. Tasic, Budimir V. Konstantinovic, Miodrag L. Lazic, Vlada B. Veljkovic. Hidrólisis ácida de patata en la producción de bioetanol. 2009, <<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=21491557>>. (08/01/11).
- 19.** Hernández A., Tejerina F., Arribas J.I., Martínez L. Y Martínez F. Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa. Volumen 4. Universidad de Murcia, 1990.
- 20.** Rojas V., Diego F., Mejía E., Figueroa C. Evaluación de la eficiencia de una membrana de ultrafiltración en la producción de jarabe concentrado de glucosa a partir de la hidrólisis enzimática del almidón de yuca. VITAE, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica. Volumen 10 número 1, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2003.
- 21.** Castellanos D. Oscar, Cruz G. Gloria, Rentería A. Andira. Alternativas para la clarificación del jarabe de glucosa obtenido por hidrólisis enzimática de almidón. Revista Ingeniería e Investigación vol. 24, número 002. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá - Colombia. 2004.
- 22.** Cárdenas Pabón Oscar E. Remoción de ácido fítico por ultrafiltración del agua de cocimiento de maíz. Trabajo de Grado. Universidad del Valle. 2006.

- 23.** Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, NTC 610. INDUSTRIAS ALIMENTARIAS. JARABE DE GLUCOSA. Segunda actualización. Bogotá D.C. 2001-07-23.
- 24.** Madriñán C. Rodríguez A. Guías de Taller y Análisis de Alimentos. Universidad del Valle. 2007.
- 25.** Madriñán de Guzmán C, Rodríguez de Stouvenel A. Manual de métodos de análisis físico-químicos de alimentos Colombia. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería, 1990
- 26.** Woolfe Jennifer A. "Sweetpotatoanuntappedfoodresource". Cambridge University.1992.<http://books.google.com/books?id=knzdTptweMUC&pg=PA65&lpg=PA65&dq=Woolfe+%281992%29+browning+sweet+potato&source=bl&ots=nR5oGnf5w&sig=FdpeZsA6WG9fb5XINrqTMrjKNI0&hl=es&ei=SoRtTfanJsT0gAf3ncyUBA&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CBgQ6AEwA#v=onepage&q&f=false>. (03/02/11).
- 27.** Delahaye E. Evaluación nutricional de sopas deshidratadas a base de harina de plátano verde. Digestibilidad in vitro del almidón. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay Edo. Aragua, Venezuela, 2001.
- 28** Hernández M, Torruco-Uco J, Guerrero L; Betancur-Ancona D. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán. http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-20612008000300031&script=sci_arttext
- 29.** Alvis A, Vélez C, Villada H, Rada M. Análisis Físico-Químico y Morfológico de Almidones de Ñame, Yuca y Papa y Determinación de la Viscosidad de las Pastas. Información Tecnológica. Vol 19 (1), 19-28 (2008)
- 30.** Rodríguez G, García H, Camacho J, Arias F. El Almidón de Achira o Sagú (Cannaedulis, Ker). Manual Técnico para su Elaboración. CORPOICA-PRONATTA.
- 31.** Torres L. Beneficios de la achira para la obtención de almidón en Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA).
- 32.** Mazzeo M, Álzate A, Marín M. Obtención de almidón a partir de residuos poscosecha de plátano dominico hartón (Musa aabSimmonds). 2008.
- 33.** Méndez de la Cruz A. Evaluación de la extracción de almidón de banano verde (Musa Sapientum variedad gran enano) producto de desecho de las industrias bananeras y evaluación de su función como excipiente en la formulación de comprimidos. Guatemala. Junio 2010.

- 34.** Martí H. Calidad Culinaria y Nutritiva de la Batata. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. GTHorticultura. Argentina. 1998. <http://www.inta.gov.ar/sanpedro/info/doc/hor/hm_001.htm>. (10-05-11).
- 35.** Propiedades funcionales de los carbohidratos de bajo peso molecular. <http://es.scribd.com/doc/51321943/PROPIEDADES-FUNCIONALES-DE-LOS-CARBOHIDRATOS-DE-BAJO-PESO-MOLECULAR>
- 36.** Duque A, Salguero A. Hidrólisis ácida de celulosa. Colombia. Universidad del Valle, División de Ingeniería, 1979.
- 37. Ferrer**, J.R., Páez, G., Arenas de Moreno, L. et al. Cinética de la hidrólisis ácida de bagacillo de caña de azúcar. Rev. Fac. Agron., ene. 2002, vol.19, no.1, p.23-33.ISSN 0378-7818.
- 38.** Marija B. Tasić, Budimir V. Konstantinović, Miodrag L. Lazić, Vlada B. Veljković. The acid hydrolysis of potato tuber mash in bioethanol production. University of Nis, Faculty of Technology. 2008.
- 39.** Song, L., Elimelech, M. 1995. Theory of concentration polarization in cross flow filtration. Journal Chemistry Society Faraday Trans. Pp:3389-3398.
- 40.** Hinkova A., Bohacenko I., Bubnik Z., Hrstkova M., Jankovska P. Mineral membrane filtration in refinement of starch hydrolysates. 2004. Journal of Food Engineering Vol.61 Pp.521–526.

ANEXOS

ANEXO A. Imágenes de la variedad de batata utilizada, coloración presentada en las etapas de molienda húmeda y en la aplicación del pretratamiento.



Figura A. Batata variedad Morada Inta.



Figura B. Pardeamiento enzimático de trozo de batata.



Figura C. Molienda húmeda de batata sin pretratamiento.



Figura D. Molienda húmeda de Batata con pretratamiento

ANEXO B.Balance de materia en el proceso de extracción de almidón.

De acuerdo al diagrama de bloques para extracción de almidón a gran escala presentado en la figura 3, se muestra el siguiente balance de materia:

Corriente	Masa (Kg)	Corriente	Masa (Kg)
1	2,5	12	15
2	4	13	16,2906
3	4	14	1,694
4	2,5	15	15,604
5	0,7323	16	15
6	1,7678	17	0,604
7	1,7678	18	4
8	1,8561	19	4
9	3,6239	20	0,604
10	3,6239	21	0,151
11	1,2906	22	0,453

El balance anterior, aplica para un procesamiento de 2.5kg Batata/día con un porcentaje de residuos (cascaras) de 30%, utilizando soluciones de ácido cítrico al 5% en el tratamiento para prevenir el pardeamiento enzimático y un porcentaje de fibra lavada del 68%, para obtener aproximadamente 500g de almidón/día.