

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Propuesta de Tecnologías para la acetilación de almidón de yuca.

Autora: Daileny Calafell Carrera

Tutor: MSc. Omar Pérez Navarro

Curso: 2017-2018

Santa Clara
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamiento

“Un poco más de persistencia, un poco más de esfuerzo, y lo que parecía irremediablemente un fracaso puede convertirse en un éxito glorioso.”

Elbert Hubbard.

Dedicatoria

Dedicado a mis padres, pues por ellos he llegado hasta aquí, a ellos les debo todo.

Agradecimientos

Agradezco este éxito de mi vida:

- *A mis padres por apoyarme siempre y regañarme tanto.*
- *A mi hermanita por entenderme, escucharme y apoyarme incondicionalmente.*
- *A mi novio por apoyarme, escucharme y comprenderme siempre.*
- *A mi abuela por preocuparse constantemente y darme los buenos consejos que siempre brinda la sabiduría de los abuelos.*
- *A mi tutor por dedicarme su tiempo, aunque lo necesitara y por transmitirme los conocimientos que con él adquirí.*
- *A mis compañeras, Fabiani, Blanca, Mariam, Aliana por la ayuda que recibí de ellas y por aguantarme.*
- *A mis amigas Lianni, Liset y Sheila por hacerme ver las cosas que yo sola no quería ver.*
- *A mis amigas Jessica y Mary por preocuparse y estar pendientes de mí.*
- *A todo el claustro de profesores que, de manera directa o indirecta, durante los cinco años de carrera, hicieron posible mi formación profesional y de cierta forma también persona*

Resumen

El trabajo responde a la necesidad de contar con una planta de obtención de almidón acetilado en el país que constituye un avance técnico- industrial de gran impacto económico- social que contribuye a la sustitución de importaciones de este producto, ya que es utilizado como materia prima en varios procesos de la industria alimenticia, farmacéutica, textil, entre otras. Se proponen tecnologías para la obtención de almidón acetilado, basado en los fundamentos tecnológicos de la industrialización de la yuca para la obtención de productos destinados a consumo animal, humano e industrial. Se analizaron las condiciones de acetilación de almidón nativo y pregelatinizado y su cinética estudiada por varios autores. Se efectuó la adaptación de la tecnología de producción de almidón nativo a partir de raíces y se desarrollaron los procesos tecnológicos de acetilación del almidón nativo y gelatinizado. Se diseñaron los equipos para las etapas insertadas de gelatinización, acetilación y secado, a partir de los balances de materiales y energía realizados para cada variante. Se efectuó la evaluación técnico- económica de ambos procesos, determinando los costos totales de inversión y de producción y calculando los Indicadores Dinámicos de Rentabilidad. Se obtuvo que la variante de almidón acetilado alcanza resultados superiores a la de gelatinizado acetilado, obteniendo un VAN de \$ 968 610,19, una TIR del 46% y un PRD de 2,4 años.

Abstract

The realization of this project was carried out taking into account that having a acetylated starch production plant in the country would constitute a technical-industrial advance of great economic and social impact, since it would eliminate to a large extent the imports of this product, since it is used as raw material in several processes of the food industry, pharmaceutical, textile, among others. This work consists of the proposal of technologies to obtain acetylated starch, taking into account a referential theoretical framework based on the technological foundations of the industrialization of cassava for the production of products destined for animal, human and industrial consumption; The reaction conditions of native and pregelatinized starch acetylation and its kinetics studied by several authors were analyzed. The adaptation of the root treatment technology to the process of acetylation of the native and gelatinized starch was carried out, designing the equipment for the gelatinization, acetylation and drying stages of the gelatinized material from the material and energy balances carried out for each variant. Both processes were technically and economically evaluated, determining the total investment and production costs and calculating the Dynamic Profitability Indicators.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1: Revisión bibliográfica	3
1.1 Generalidades sobre las raíces de yuca.....	3
1.1.1 Composición de la yuca	4
1.2 El almidón. Definición, composición y estructura	5
1.2.1 Almidón de Yuca.....	6
1.2.2 Propiedades físico- químicas del almidón	7
1.2.3 Funcionalidad del almidón	8
1.3 Almidón modificado	10
1.3.1 Tipos de modificación de los almidones.....	10
1.3.2 Modificación física del almidón: Gelatinización	12
1.3.3 Modificación química de almidón: Acetilación	14
1.4 Cinética de la reacción de acetilación	18
1.4.1 Cinética de la reacción de acetilación a partir de almidón nativo	19
1.4.2 Cinética de la reacción de acetilación a partir de almidones gelatinizados	21
1.5 Comercialización del almidón y sus aplicaciones	22
1.5.1 Usos del almidón en productos alimentarios y no alimentarios	24
1.5.2 Aplicaciones de almidones modificados	25
1.6.1 Proceso tradicional.....	27
1.6.2 Proceso mecanizado	28
Capítulo 2. Tecnologías para almidón acetilado. Balances de materiales y energía	33
2.1 Tecnologías para obtención de almidón	33
2.1.1 Vía tradicional	33
2.1.2 Tecnología para obtención de almidón mediante la vía mecanizada....	35
2.1.3 Comparación de las vías tradicional y mecanizada	38
2.2 Tecnologías para obtención de almidón modificado.....	40
2.2.1 Tecnologías para obtención de almidón acetilado.....	40
2.2.2 Tecnología para obtención de almidón gelatinizado- acetilado	43
2.2.3 Comparación de los procesos de obtención de almidón acetilado y gelatinizado- acetilado	45
2.3 Proyección de industrialización de la yuca.....	46
2.4 Balances de materiales y energía	48

2.3.1 Balance de materiales y energía para almidón acetilado.....	49
2.3.2 Balance de materiales y energía para almidón gelatinizado-acetilado .	51
Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica	55
3.1 Dimensionamiento, selección y diseño del equipamiento	55
3.1.1 Diseño del Gelatinizador	55
3.1.2 Diseño de un reactor	56
3.1.3 Diseño de batería de tres RMP en serie para la producción de almidón acetilado	57
3.1.4 Diseño del secadero neumático	60
3.1.5 Diseño de un secadero spray dryers.....	62
3.2 Estimado de la inversión, costos e ingresos	67
3.2.1 Estimado de la inversión, costos e ingresos para almidón acetilado...	68
3.2.2 Estimado de la inversión, costos e ingresos para almidón gelatinizado-acetilado	72
Conclusiones parciales:.....	77
Conclusiones generales:	78
Recomendaciones	79
Bibliografía.....	80

Introducción

Actualmente el procesamiento industrial de las raíces de yuca, ha prosperado a nivel mundial, pues las necesidades alimentarias en relación con los productos de alta calidad mínimamente procesados y de valor energético, han conducido a un desarrollo sostenible de sus producciones y derivados. Algunos califican a la yuca como la base de vida tropical, porque es una de las más importantes fuentes de alimentación en extensas áreas de los trópicos. Es un cultivo apreciado por su fácil y amplia adaptabilidad a diversos ambientes ecológicos, el poco trabajo que requiere, la facilidad con que se cultiva y su gran productividad; puede prosperar en suelos poco fértiles y en condiciones de poca pluviosidad.

En óptimas condiciones la yuca puede producir más calorías alimenticias por hectárea que la mayoría de los demás cultivos alimenticios tropicales. Hoy se prevé un crecimiento pretencioso en la implantación de este cultivo.

A partir de las raíces de yuca, entre otros productos, se puede obtener almidón, en estado nativo, ya sea por la vía tradicional o mecanizada, según las condiciones del productor y los requerimientos de calidad del producto. Este almidón nativo puede sufrir modificaciones en su estructura, aplicando tratamientos físicos, químicos u otros; estas transformaciones producen mejores propiedades en los almidones, lo que consigue que estos presenten ventajas ante el almidón nativo, pues incrementa su valor y su rango de aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y otras.

Como parte de su estrategia de progreso, la Empresa Nacional para la Protección de Flora y Fauna se propone el fomento y desarrollo prospectivo del cultivo de la yuca con fines industriales, como la obtención de harina y almidón. En aras de ampliar dicho programa, este trabajo contribuye con la concepción la propuesta de tecnologías para la obtención de almidones modificados, específicamente almidón acetilado y almidón gelatinizado-acetilado, partiendo de estudios cinéticos y diseños de plantas referentes.

Problema científico:

En Cuba no existe producción de almidones acetilados de yuca, por lo que la propuesta de sus tecnologías posibilitará la sustitución de importaciones, con el correspondiente beneficio económico y social.

Hipótesis de Investigación:

Si se aplican adecuadamente los métodos de selección, adaptación y diseño de tecnologías para la producción de almidón acetilado, es posible, la sustitución de importaciones principalmente para la industria alimentaria, disponiendo así, de materias primas propias para varios procesos fabriles.

Objetivo General:

Desarrollar propuestas tecnológicas para la producción de almidón acetilado, y gelatinizado- acetilado.

Objetivos Específicos:

- ✚ Realizar una revisión bibliográfica sobre los procesos y las tecnologías para almidón acetilado.
- ✚ Realizar balances de materiales y energía para las tecnologías de almidón acetilado y gelatinizado- acetilado.
- ✚ Efectuar la adaptación tecnológica para las etapas del almidón nativo y el diseño del equipamiento para las etapas de gelatinización, acetilación y secado.
- ✚ Realizar la evaluación técnico- económica para la producción de almidón acetilado y gelatinizado- acetilado.

Capítulo 1: Revisión bibliográfica

1.1 Generalidades sobre las raíces de yuca

La yuca presenta en sus raíces alto contenido de almidón, por lo que es considerada como fuente importante de energía y es de pocos requerimientos para su cultivo. El uso de esta planta se caracteriza por el alto consumo de su raíz, en la que se acumulan gran cantidad de componentes, entre ellos el almidón, que es la forma natural como la planta almacena energía por asimilación del carbono atmosférico mediante la clorofila presente en las hojas. La cáscara es dura y leñosa e incomedible. La pulpa es firme e incluso dura antes de la cocción, surcada por fibras longitudinales rígidas; muy ricas en hidratos de carbono y azúcares, se oxida rápidamente una vez desprovista de la corteza (TRUJILLO, 2014).

El cultivo de la yuca tiene una gran importancia para la seguridad alimentaria y la generación de ingresos, especialmente en las regiones propensas a la sequía y de suelos áridos. Es el cuarto producto básico más importante después del arroz, el trigo y el maíz. Entre sus principales características se destacan su gran potencial para la producción de almidón, su tolerancia a la sequía y a los suelos degradados y su gran flexibilidad en la plantación y la cosecha adaptándose a diferentes condiciones de crecimiento. Tanto sus raíces como sus hojas son adecuadas para el consumo humano; las primeras son fuente de hidratos de carbono y las segundas de proteínas, minerales y vitaminas, particularmente carotenos y vitamina C (Montoya, 2007)

Si se considerara el cultivo de la yuca como un producto estratégico y base para el desarrollo de numerosas industrias y se le diera el tratamiento correspondiente en cuanto a inversiones, esta raíz seguramente podría favorecer el desarrollo del sector agroalimentario e industrial de los países en desarrollo contribuyendo a la generación de riqueza y de empleo rural y urbano. Sin embargo, para hacer viable su consolidación se deben desarrollar sistemas de producción rentables y sostenibles por lo cual, es cada vez más urgente la adaptación, desagregación o generación de tecnologías que, una vez incorporadas, fortalezcan la cadena productiva y sus derivados industriales (Aristizábal and Calle, 2015)

En la mayor parte de las regiones productoras de yuca se ha explotado la posibilidad de utilizar este cultivo como insumo en los procesos manufactureros y solamente países como Brasil, Indonesia y Tailandia han promovido el desarrollo de la industria de la yuca y sus derivados para satisfacer las necesidades internas y de exportación; cuentan con ventajas

comparativas identificadas con grandes extensiones de tierra, mano de obra a bajo costo, reducción de costos de transporte y un manejo eficiente de la comercialización de sus productos con precios competitivos (Alarcón and Dufour, 1998)

La yuca continúa su transición hacia un mercado orientado a productos y materias primas para la industria de procesamiento. Mientras más del 60-70 % de los suministros de la yuca todavía se destina para comidas tradicionales la capacidad de la industria de almidón de yuca está aumentando significativamente, sobre todo en el suroeste de Brasil, seguido por Colombia, Venezuela y recientemente Paraguay. Dentro de la industria se ha puesto en evidencia una tendencia hacia la utilización de almidón modificado e hidrolizado, en preferencia a la utilización de almidón nativo. Durante la última década, la utilización de la yuca para la alimentación de animales ha aumentado su importancia relativa sobre todo en Colombia y también, en menor grado, en Brasil, Ecuador, Bolivia y Perú. Más reciente es la captación de yuca para bocadillos y la industria de productos típicos, sobre todo en Brasil y Colombia.(Aristizábal and Sánchez, 2007)

1.1.1 Composición de la yuca

Tabla 1.1 Composición de la yuca.

Composición de la yuca cruda por cada 100 gr.	
Agua	59,6 gr.
Calorías	168 Kcal
Grasa	0,28 gr.
Proteína	1,36 gr.
Hidratos de carbono	38,05 gr.
Fibra	1,8 gr.
Potasio	271 mg
Fósforo	27 mg
Hierro	0,27 mg
Sodio	14 mg
Magnesio	21 mg
Calcio	16 mg
Vitamina C	20,6 mg
Vitamina E	0,190 mg
Vitamina A	25 UI
Vitamina B ₁	0,087 mg
Vitamina B ₂	0,048 mg

Fuente: (anónimo, 2012)

A partir de la raíz de yuca se obtienen algunos alimentos tradicionales, además de producciones como la harina, el casabe y el almidón, los cuales se destinan para consumo animal, humano o como materia prima para otros procesos industriales y en dependencia de estos usos son los requerimientos de calidad de la yuca. Ver Anexo 1.

1.2 El almidón. Definición, composición y estructura

El almidón es, después de la celulosa, el principal carbohidrato sintetizado por las plantas, algunas frutas también son ricas en almidón; en su estado nativo es insoluble en agua fría y está conformado por gránulos cuyo tamaño, composición, propiedades funcionales y fisicoquímicas dependen del origen botánico y de las condiciones de cultivo. (Lefnaoui and Moulai-Mostefa, 2015b)

Los almidones: son polisacáridos vegetales. Fisiológicamente son sustancias de reserva que se encuentran principalmente en los granos de cereales, tubérculos, frutas y en varias legumbres. En la industria de alimentos se emplean, no solamente almidones nativos (sin modificación) sino, también, sus productos derivados: jarabes y almidones modificados. (Rembado and Sceni, 2009)

El almidón es el principal carbohidrato de almacenamiento energético de las plantas superiores y químicamente está constituido por unidades de glucosa. Está organizado en partículas discretas conocidas genéricamente con el nombre de gránulos. El tamaño y la morfología de los gránulos de almidón varían dependiendo de la fuente vegetal. Se pueden extraer a partir de varias fuentes comerciales, tales como cereales (maíz, trigo, arroz, avena, sorgo), tubérculos (patata), raíces (yuca, ñame) y las legumbres (garbanzos, soja, lentejas, frijoles). Las formas que adoptan estos gránulos son redondos, elípticos, ovales, lenticulares, poliédricos o poligonales e incluso de forma irregular (Guerra, 2007)

El almidón en su estado nativo está parcialmente compuesto de gránulos cristalinos insolubles en agua. Las variaciones en las relaciones entre los componentes, estructuras y propiedades, puede dar lugar a gránulos de almidón con propiedades físico químicas y funcionales muy diferentes, que pueden afectar a sus aplicaciones industriales. En general, un almidón considerado como normal presenta un contenido de alrededor de 25% de amilosa y de 75% de amilopectina. Estos polímeros tienen la forma lineal (amilosa) y ramificada (amilopectina) con diferentes estructuras y funciones, en la Figura 1.1 se muestra la estructura de dichos constituyentes del almidón (Aguilar, 2007) Ver esquema de la amilosa y amilopectina en Anexo 2.

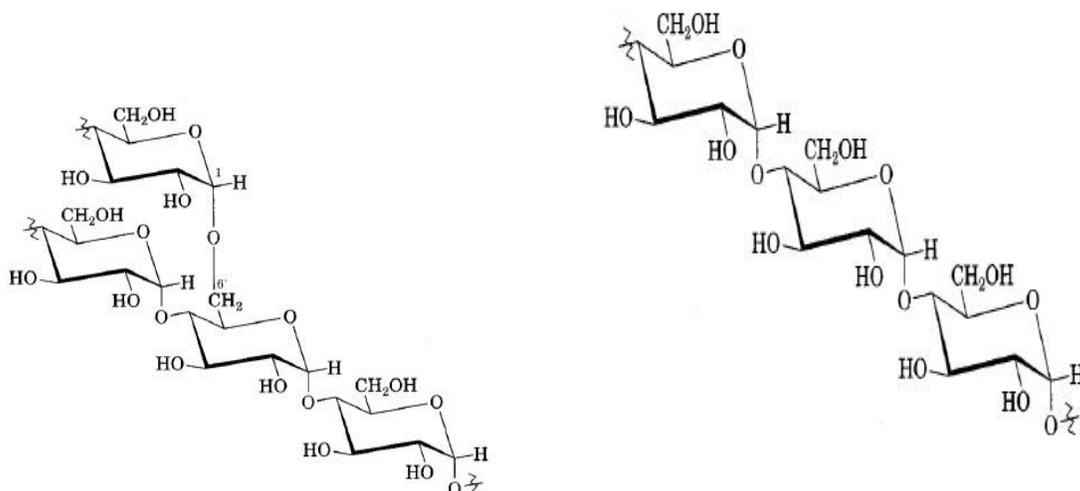


Figura 1.1 Estructura Química de la Amilopectina. Estructura Química de la Amilosa

Fuente: (Carrascal, 2013)

La amilosa es un polímero que consta de varios cientos de moléculas de glucosa enlazadas con uniones glucosídicas (1-4); el número de unidades varía entre los diferentes tipos de almidones, pero generalmente se encuentra entre 1000 unidades de glucosa por molécula de amilosa y tiene forma de espiral. La amilosa es esencialmente lineal, formando una red tridimensional cuando se asocian las moléculas al enfriarse y es la responsable de la gelificación de las pastas de almidón. En cambio, la amilopectina es un polímero ramificado formado por cadenas lineales constituidas por 15-35 moléculas de glucosa unidas por enlaces á (1-4). Estas cadenas están unidas entre ellas por enlaces á (1-6) que forman los puntos de ramificación. La amilopectina tiene 5-6 por ciento de enlaces á (1-6) y está constituida de alrededor de 100.000 moléculas de glucosa (Salcedo, 2017). Ver propiedades de los componentes del almidón en Anexo 3

1.2.1 Almidón de Yuca

Es un polisacárido natural, extremadamente versátil y alcanza una eficiencia incomparable en todas sus aplicaciones. El almidón de yuca puede clasificarse como agrio y nativo (dulce). El almidón agrio sufre un proceso de fermentación que le otorga propiedades deseables para los alimentos; el almidón nativo o dulce no es sometido a un proceso de fermentación, y es el que se usa generalmente en la industria. Una de las principales propiedades del almidón nativo es su semicristalinidad, donde la amilopectina es el componente dominante de la cristalización en la mayoría de los almidones. La porción cristalina está compuesta por estructuras de doble hélice formadas por puentes de

hidrógeno entre los grupos hidroxilo en las cadenas lineales de la molécula de amilopectina y por cadenas externas de amilopectina unidas con porciones de amilosa (Flores, 2010).

1.2.2 Propiedades físico- químicas del almidón

Las propiedades del almidón varían en dependencia del tratamiento a que puedan ser sometidos sus gránulos. Para mejorar estas propiedades los almidones deben ser modificados. (Lefnaoui and Moulai-Mostefa, 2015b)

Las propiedades fisicoquímicas son las que determinan el uso del almidón de yuca. Entre las propiedades fisicoquímicas más importantes encontramos la composición proximal (contenido de proteína cruda, extracto etéreo, fibra cruda, cenizas y humedad), las características del gránulo (tamaño, color y forma, naturaleza cristalina), el peso molecular y el contenido de amilosa. El contenido de proteínas del almidón de yuca es bajo, cerca del 0,1 %, comparado con el de los almidones de arroz y de maíz (0,45 y 0,35 %, respectivamente). Los gránulos del almidón yuca contienen un pequeño porcentaje de lípidos, comparado con los almidones de cereales -maíz y arroz- los cuales contienen respectivamente 0,6 y 0,8 %. Esta composición favorece al almidón de yuca, ya que estos lípidos forman un complejo con la amilosa, la cual tiende a reprimir el hinchamiento y la solubilización de los gránulos del almidón; por esta razón se necesitan temperaturas altas (> 125 °C) para romper la estructura amilosa-lípido y solubilizar la fracción de amilosa. La mayor parte de estos lípidos son liso-fosfolípidos; es decir una cadena de ácido graso esterificada con ácido fosfórico. La presencia de sustancias grasas puede crear problemas por la tendencia a la rancidez durante el almacenamiento (Aristizábal and Sánchez, 2007)

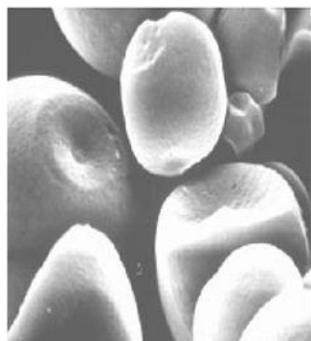


Figura 1.2 Gránulos de almidón natural (o nativo) de yuca vistos con el microscopio electrónico. Ver las características de los gránulos del almidón en Anexo 4.

Fuente: (Alarcón and Dufour, 1998)

Los gránulos del almidón de yuca no son uniformes en tamaño y forma: son redondos con terminales truncados, un núcleo bien definido y su tamaño varía entre 5-35 μm con un promedio de 20 μm . En algunos almidones, el tamaño de los gránulos muestra relación con su proporción amilosa/amilopectina. Los patrones de difracción a los rayos X de los gránulos de almidón nativo de yuca son de tipo intermedio (tipo C), entre los patrones característicos de los almidones de los cereales (tipo A) y los almidones de frutas y tubérculos (tipo B). El nivel de cristalización en el almidón de yuca es alrededor de 38 %. La cristalinidad del gránulo se debe esencialmente a la amilopectina. (TRUJILLO, 2014)

1.2.3 Funcionalidad del almidón

Las propiedades funcionales de los almidones dependen directamente de la relación amilosa/amilopectina. En los distintos cultivos amiláceos esta relación es constante, si bien cambia de una variedad a otra dentro de la especie y también entre plantas de la misma variedad. Para apreciar el potencial del uso industrial y alimenticio del almidón de yuca es fundamental comprender las propiedades funcionales del almidón. Estas propiedades están influenciadas por factores genéticos (diferencias varietales) y por factores como la edad de la planta, la época de cosecha, la fertilidad del suelo y la precipitación, así como por sus estructuras granular y molecular (Álvarez, 2012)

Las características funcionales de los almidones son: solubilidad, capacidad de retención de agua, poder de hinchamiento, tendencia a retrogradar, propiedades de la pasta (viscosidad, consistencia, estabilidad del gel, claridad y resistencia al corte, formación de película), digestibilidad enzimática y capacidad de emulsificación. (Toledo, 2017). Ver perfiles de viscosidades de diferentes almidones en Anexo 5.

Todas estas propiedades dependen de varios aspectos influyentes como la geografía del lugar donde se cultive y el clima existente, además la funcionalidad y las propiedades del almidón, como la resistencia mecánica y la flexibilidad, relacionadas con el carácter de la región cristalina, dependen principalmente de la concentración de amilosa y amilopectina, del grado de ramificación y de la distribución del peso molecular (Oswaldo et al., Reis and Cunha, 2005)

De manera general, los almidones nativos poseen propiedades limitadas debido a que estos son susceptibles a altas temperaturas, a pHs ácidos o extremos, presentan bajas resistencias a altos esfuerzos cortantes. Por todo lo anterior, es necesario recurrir a ciertas modificaciones físicas y/o químicas, para superar estos inconvenientes. En este sentido, se

encuentran una amplia gama de aplicaciones industriales para los almidones modificados. Estas aplicaciones van desde utilización de almidones modificados para la industria de alimentos, como para aplicaciones no alimentarias como son la industria textil, del papel, farmacéutica, y sobre todo para la industria de plásticos degradables, en donde los almidones modificados químicamente, tienen un papel importante como una alternativa para el mantenimiento del equilibrio ecológico. (TRUJILLO, 2014)

Según (Salcedo, 2017) las propiedades funcionales se definen como “cualquier propiedad fisicoquímica de los polímeros que afecta y modifica algunas características de un alimento” y que contribuye a la calidad final del producto. En materiales amiláceos estas propiedades dependen de las características físicas y químicas intrínsecas (estructura granular y molecular) como tamaño del gránulo, morfología, proporción de amilosa/amilopectina, contenido de minerales, entre otras. A nivel tecnológico e industrial, para la incorporación o utilización de materiales amiláceos en la formulación de matrices alimentarias y otras aplicaciones industriales, las propiedades funcionales más importantes abarcan la solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, retención de agua, capacidad emulsificante, sinéresis y comportamiento reológico de sus pastas y geles.

Absorción de agua, retención de agua, solubilidad y poder de hinchamiento:

La capacidad de absorción de agua se define como la habilidad del material húmedo para retener agua (agua enlazada, agua hidrodinámica y agua atrapada físicamente) cuando el material ha sido sometido a fuerzas centrífugas externas o de compresión. A diferencia, la capacidad de retención de agua se define como la cantidad de agua retenida por la muestra sin ser sometida a ningún estrés. La solubilidad indica el grado de asociación existente de los enlaces intragranulares entre la amilosa y amilopectina, relacionada con una medida de los solutos solubles que son lixiviados del gránulo cuando se determina su capacidad de hinchamiento. La solubilización del almidón conduce a la destrucción parcial de la estructura granular dependiendo de la especie botánica y del tipo cristalino del almidón nativo. El poder de hinchamiento puede definirse como el máximo incremento en volumen y peso durante el calentamiento que sufre el almidón y depende de la fuerza y naturaleza de las fuerzas asociadas dentro de la red del gránulo de almidón. (Salcedo, 2017)

Una emulsión es un sistema heterogéneo consistente e inestable, en al menos un líquido íntimamente disperso en forma de gotas, en el seno de otro, inmiscible con él. Una de las aplicaciones de los componentes emulsificantes se centra es la estabilidad de emulsiones,

con el fin de garantizar la obtención de un producto de calidad. La funcionalidad del material amiláceo consiste en evitar mecanismos de inestabilidad que conlleven a la separación de fases en una matriz alimenticia, debido a la ubicación de sitios hidrofílicos y lipofílicos en la molécula del polímero. En algunas investigaciones se ha determinado la capacidad emulsificante de los almidones de ñame, reportándose valores entre 47-62 %, lo que exalta su uso como aditivo en productos de panadería, derivados lácteos y derivados cárnicos. (Salcedo, 2017)

1.3 Almidón modificado

Desde hace mucho tiempo el almidón nativo (aquel que se encuentra en su forma natural o que no ha sufrido ningún tipo de modificación), se ha utilizado como materia prima para preparar diferentes productos alimenticios. Sin embargo, este almidón tiene una baja resistencia al esfuerzo cortante, es altamente susceptible al fenómeno fisicoquímico de la retrogradación y sinéresis. Estos inconvenientes pueden ser superados por medio de modificaciones. Estas modificaciones proporcionan almidones con propiedades necesarias para usos específicos. Las modificaciones a los almidones nativos se realizan para alterar algunas de las siguientes propiedades: temperatura de empastado o de formación de pastas, relación de sólidos/viscosidad, resistencia de los almidones a la disminución de la viscosidad por la adición de ácidos, calor y acción mecánica (esfuerzo cortante), tendencia a la retrogradación, y para aumentar o disminuir el carácter iónico hidrofílico o hidrofóbico. La modificación de los almidones nativos es un factor importante para proporcionar propiedades de adhesión y de formación de películas. Los almidones una vez modificados tienen un amplio rango de aplicaciones industriales y por consiguiente son productos de mayor valor agregado. (TRUJILLO, 2014)

(Mirmoghtadaie et al., 2009) evaluó funcionalmente los almidones modificados, obteniendo que para GS mayores de 0,11 se comportan adecuadamente las características térmicas vinculadas a la gelatinización y la sinéresis.

1.3.1 Tipos de modificación de los almidones

La modificación del almidón se puede hacer por varios métodos, pero los más comunes son los físicos y químicos. La modificación física se realiza mediante el calor y la humedad (pre gelatinización), mientras que los tratamientos químicos implican la introducción de grupos funcionales dentro de la molécula de almidón utilizando reacciones de derivatización (eterificación, esterificación, entrecruzamiento, etc.) o de descomposición (ácida o hidrólisis

enzimática y oxidación). La importancia de modificar un almidón nativo radica en mejorar, realzar o inhibir una o más propiedades fisicoquímicas específicas, como por ejemplo la resistencia a la degradación, el aumento en el hinchamiento, consistencia, poder aglutinante, estabilidad a cambios en el pH y temperatura, gelificación, dispersión o fluidez, la compactación, entre otras, que facilite el proceso de fabricación de un producto en un momento dado, o le dé un valor agregado al producto final. (Carrascal, 2013). Ver Anexo 6.

Aunque la gran mayoría de almidón modificado producido en la actualidad procede de plantas genéticamente modificadas, no se debe confundir el término almidón modificado y almidón genéticamente modificado. Hay que tener claro que el almidón modificado ha sido extraído de plantas y procesado posteriormente, sea o no de plantas modificadas genéticamente. Existen otros derivados del almidón, a veces obtenidos mediante métodos similares, como los jarabes de glucosa o las maltodextrinas, que estructuralmente ya no son almidón y no se clasifican como almidón modificado. (anónimo, 2015)

Las principales modificaciones se resumen en la Tabla 1.2

Tabla 1.2 Tipos de modificación de los almidones.

Modificación	Tipo	Propiedades
Física	Tratamiento con humedad y color Pre gelatinización	Aumenta la solubilidad del almidón en agua fría
Enzimática	Hidrólisis parcial	Reduce el peso molecular
Química		
Conversión	Hidrólisis ácida Tratamiento alcalino Oxidación Piroconversión- Dextrinización	Reduce el peso molecular, disminuye la viscosidad, blanquea el almidón
Derivatización	Eterificación- Hidroxipropilación Esterificación-Acetilación, Succinación Entrecruzamiento- almidón fosfatado Modificación dual	Reduce la retrogradación, estabiliza la molécula para los procesos físicos.

Fuente: (Guerra, 2007)

Según las propiedades buscadas en el almidón modificado final, se elige un almidón de partida y se somete a los procesos necesarios para conseguirlas. Destacan los tratamientos térmicos, los tratamientos ácidos, la hidroxipropilación, la acetilación y la fosfatación. (anónimo, 2015)

1.3.2 Modificación física del almidón: Gelatinización

Un gel es una estructura tridimensional que retiene una gran cantidad de agua en su interior. Para que puedan formarse las cadenas de polisacáridos deben tener zonas de unión entre sí, pero, también tienen que poder interactuar con el agua que queda retenida en los espacios huecos de la estructura. Si las zonas de unión son débiles o no existen, el polisacárido no puede formar gel, pero aumenta la viscosidad de la mezcla ya que sus cadenas interactúan con el agua y la “inmovilizan” en la dispersión. Para ambos tipos de comportamiento es necesario lograr previamente una buena dispersión del polisacárido. (Rembado and Sceni, 2009)

Una de las más comunes modificaciones físicas de los almidones es la gelatinización, la cual puede definirse como un proceso irreversible de transición de fase y ruptura de los puentes de hidrógeno del gránulo debido al aumento de temperatura y la aplicación de esfuerzos cortantes; es un fenómeno fisicoquímico, que ocurre cuando el almidón se calienta en un exceso de agua, ocurriendo, un hinchamiento de las partes amorfas del gránulo o sea el agua se difunde en estas zonas; si se continúa este calentamiento, la amilosa se difunde hacia el medio acuoso y posteriormente comienza a disolverse. Finalmente, los gránulos pierden su estructura cristalina, hasta que se destruyen irreversiblemente en intervalos de temperatura de 100-150 °C. Posteriormente, si el almidón gelatinizado se somete a un almacenamiento prolongado, se da origen a otro fenómeno fisicoquímico conocido como retrogradación, el cual se define como la formación de estructuras cristalinas, debido a que las cadenas lineales de amilosa se orientan de forma paralela, estableciéndose puentes de hidrógeno a través de sus grupos hidroxilos adyacentes. (TRUJILLO, 2014)

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, pero pueden embeber agua de manera reversible; es decir, pueden hincharse ligeramente con el agua y volver luego al tamaño original al secarse. Sin embargo, cuando se calientan en agua, los gránulos de almidón sufren el proceso denominado gelatinización, que es la disrupción de la ordenación de las moléculas en los gránulos. Durante la gelatinización se produce la lixiviación de la amilosa, la gelatinización total se produce normalmente dentro de un intervalo más o menos amplio

de temperatura, siendo los gránulos más grandes los que primero gelatinizan. Los diversos estados de gelatinización pueden ser determinados utilizando un microscopio de polarización. Estos estados son: la temperatura de iniciación (primera observación de la pérdida de birrefringencia), la temperatura media, la temperatura final de la pérdida de birrefringencia (TFPB, es la temperatura a la cual el último gránulo en el campo de observación pierde su birrefringencia), y el intervalo de temperatura de gelatinización. Al final de este fenómeno se genera una pasta en la que existen cadenas de amilosa de bajo peso molecular altamente hidratadas que rodean a los agregados, también hidratados, de los restos de los gránulos. (Álvarez, 2012)

La modificación física de almidones de yuca por tratamiento hidrotérmico en la zona previa a la gelatinización constituye un tratamiento reversible, sencillo y de bajos requerimientos, que permite la ruptura de la estructura del gránulo de almidón, mejorando las propiedades de los productos en suspensión. El comportamiento de los cambios de los gránulos de almidón durante este proceso físico (hidrotérmico) se representa en la Figura 1.3.

Esta transformación estructural hace posible la utilización de este producto como estabilizante en la industria alimentaria y dentro de ella, especialmente en la heladera y de otros productos congelados. (Pérez et al., 2017)

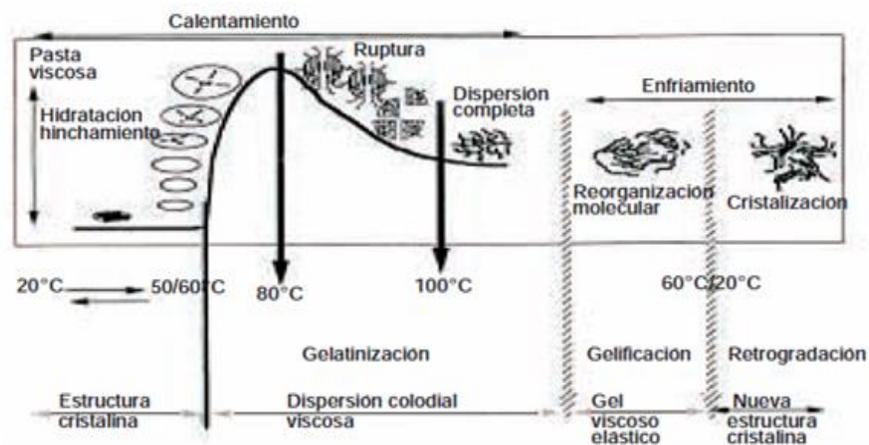


Figura 1.3 Comportamiento de los cambios que sufre el gránulo de almidón mediante el procesamiento hidrotérmico.

Fuente: (López, 1994)

La absorción de agua y el aumento de volumen van acompañados de un fuerte aumento de la viscosidad hasta llegar a un máximo llamado pico de viscosidad, en el cual el gránulo

se rompe y ocurre una difusión de amilosa y amilopectina, generándose una mezcla de gránulos hinchados ricos en amilopectina, gránulos fundidos hidratados y moléculas disueltas de amilosa. La máxima viscosidad es el resultado del máximo hinchamiento, formándose una dispersión en medio acuoso, la cual es llamada pasta o engrudo. Cuando la temperatura de una suspensión acuosa de almidón es superior a la temperatura de gelatinización, los enlaces de hidrógeno se continúan destruyendo, las moléculas de agua empiezan a anexarse a los hidroxilos liberados y los gránulos se continúan hinchando. Como resultado directo del hinchamiento de los gránulos hay un incremento de la solubilidad del almidón. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

Si la gelatinización se realiza mediante tratamiento hidrotérmico, aplicando retrogradación, filtrado y secado, se obtiene nuevamente un sólido pulverizado de mejores propiedades que el almidón nativo, este es denominado almidón pre gelatinizado. Con esta modificación el almidón es muy útil cuando se necesita que el producto sea reconstituido en agua fría además de funcionar efectivamente como estabilizante de suspensiones acuosas en las que se requiere un comportamiento reológico estable, principalmente para productos refrigerados, mejorando la absorción de agua y el hinchamiento. (Pérez *et al.*, 2017)



Figura 1.4 Diagrama idealizado de expansión y gelatinización del gránulo de almidón en presencia de agua.

Fuente: (Mollega, 2007)

1.3.3 Modificación química de almidón: Acetilación

La acetilación del almidón es una modificación química conocida desde hace más de un siglo. (Graaf *et al.*, 1998). Durante esta modificación del almidón, parte de los grupos

hidroxilo de los monómeros de glucosa, son convertidos en grupos o- (etanoatos), es decir, la acetilación del almidón es la esterificación de los grupos hidroxilos de la unidad anhidroglucosa de la molécula almidón. (TRUJILLO, 2014)

Las modificaciones químicas se dividen en métodos de derivación (entrecruzamiento, estabilización y la adición de grupos funcionales) y métodos de conversión (hidrólisis, oxidación, dextrinización y conversión); pueden ser monofuncionales, polifuncionales, de doble derivación, oxidativas o hidrolíticas. Durante la modificación del almidón es posible establecer tres niveles de cambios en los almidones: la estabilización, la introducción de caracteres específicos y la modificación reológica del comportamiento del material. (Guerra, 2007)

La modificación química del almidón está directamente relacionada con las reacciones de los grupos hidroxilo enlazados con los átomos de carbono reactivos. Las modificaciones químicas aplicables al almidón son las reacciones de reducción, sustitución y entrecruzamiento. Las reacciones de sustitución permiten la formación de éteres y ésteres de almidón. El grado de sustitución (GS) está relacionado con la modificación química e indica el número promedio de sustituciones por UAG. (Peñaranda, 2008)

Los almidones acetilados se obtienen con diferentes agentes modificantes como el ácido acético, anhídrido acético, vinil acetato y cloroacetato; generalmente, a pH básico de 7.5-9.0 y se realiza en presencia de catalizadores como hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, entre otros. Se deja reaccionar a temperatura constante; la reacción se detiene disminuyendo el pH o con adición de agua o alcohol, posteriormente se hacen lavados para eliminar los residuos y se deja secar. Mediante esta metodología se pueden obtener almidones acetilados de bajo y alto GS; el máximo sin gelatinización es de 0.5 aproximadamente, aunque esto depende del tipo de almidón. Cuando se requiere obtener almidones con alto GS, se recomienda gelatinizar los almidones y/o aumentar la concentración de los reactivos. (Guerra, 2007)

La acetilación es una modificación química que se lleva a cabo por una reacción de esterificación en el esqueleto del almidón, sustituyendo los grupos OH por grupos químicos bloqueadores ($\text{CH}_3\text{-C=O}$) que propician un entorno hidrofóbico en el almidón, debido a esto se les clasifica también como almidones esterificados. (Guerra, 2007)

En la Figura 1.5 se representan las reacciones que se producen durante la acetilación, en la reacción principal, el almidón es acetilado con anhídrido acético y con una base como

catalizador, esta reacción es un ejemplo de una sustitución nucleofílica en un carbono insaturado del anhídrido acético. Además, los tres diferentes grupos hidroxilo tienen diferente reactividad. El primer -OH en el carbono 6 es más reactivo y la acetilación es llevada a cabo más fácilmente que en los carbonos 2 y 3. De los grupos -OH secundarios, el grupo -OH en el C2 es más reactivo que el del C3. (Prieto et al., 2010)

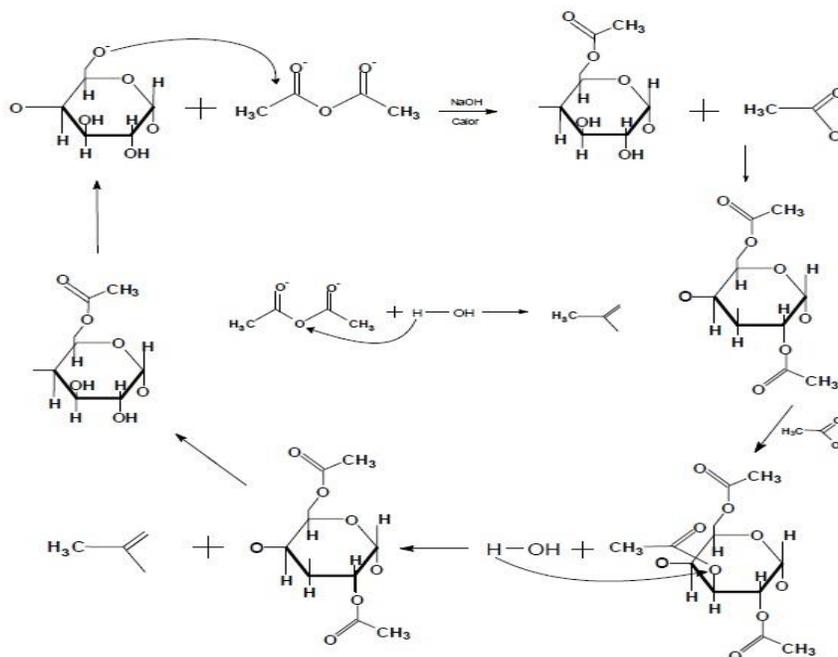
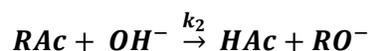


Figura 1.5 Reacciones químicas que se producen durante la acetilación del almidón
Fuente: (Guerra, 2007)

Durante la acetilación se producen diferentes derivados como productos secundarios: los restos de anhídrido no sustituidos se hidrolizan a acetato de sodio. (Toledo, 2017)



El medio alcalino favorece que el proceso de formación del éster de almidón sea reversible obteniéndose como productos finales ácido acético (HAc) y almidón nativo en estado de activación (RO^-). (Toledo, 2017)



En condiciones de alcalinidad y en suspensión acuosa el anhídrido acético tiene tendencia a desdoblarse en ácido acético e hidrolizar a acetato de sodio por lo que en estas

condiciones de reacción el agente modificante es atacado por el medio de reacción. (Toledo, 2017)



El promedio de sustituciones por UAG alcanzado durante la modificación química es superior en los almidones pre gelatinizados que en los que se encuentran en su estado natural, lo cual se debe al efecto positivo del fraccionamiento molecular en la facilidad de la sustitución nucleofílica, por lo que la combinación de ambos métodos de modificación es una alternativa efectiva que ha sido reportada alcanzando muy buenos resultados en procesos de eterificación como la acetilación. (Pérez et al., 2018b)

Los almidones acetilados con un alto grado de sustitución (GS), de 2 a 3, fueron objeto de investigaciones de 1950 a 1980, por su solubilidad en acetona y cloroformo, y su termoplaticidad. Debido a que no podían competir con los derivados de celulosa en costos y elasticidad, no se desarrollaron comercialmente. Los almidones con bajo grado de acetilación, con GS de 0.01 a 0.2, son de gran interés comercial, toda vez que se usaron en la formación de películas y en conferir adhesividad, estabilidad y textura a ciertos alimentos. Los almidones acetilados son los ésteres de almidón más importantes producidos industrialmente. (Graaf et al., 1995)

El éxito de la modificación depende del mantenimiento de las condiciones, que favorecen la acetilación sobre la hidrólisis producida por el anhídrido acético. La reacción debe ser realizada a pH controlado, y a temperatura ambiente, con una lenta adición de anhídrido acético. La eficiencia de la reacción puede ser cercana al 75 %. Los productos se recuperan por la neutralización a pH 5 con ácidos diluidos; posteriormente, se filtran, lavan con agua y se secan. Es posible obtener almidones acetilados conteniendo más del 5% de grupos acetilo, con un GS cercano a 0.2. Arriba de este nivel, los gránulos de almidón comienzan a hincharse y se dificulta la filtración. La mayoría de los almidones acetilados comerciales poseen un GS < 0.3. (TRUJILLO, 2014)

(Salcedo-Mendoza, 2016) ha comprobado que la acetilación de almidón en medio acuoso es un método eficaz, cuando se usa anhídrido acético (AA) como agente modificante y NaOH como catalizador, obteniendo buenos resultados de funcionamiento de los productos sintetizados en suspensión acuosa, especialmente a bajos GS, con mínimo consumo de agentes químicos.

Los almidones con propiedades modificadas químicamente presentan ventajas con respecto a los almidones nativos y modificados físicamente, ya que permite continuar mejorando dichas propiedades y garantizan mantenerse como materiales no tóxicos, biocompatibles y biodegradables. (Chen, 2007)

Los mayores usos de los ésteres de almidón están relacionados con el grado de esterificación. Una forma interesante de modificación química por esterificación es la acetilación. A través de ella se obtienen almidones acetilados por incorporación de grupos acetilo. Esta sustitución nucleofílica modifica el comportamiento hidrofóbico del polímero. (Guerra, 2007)

La acetilación constituye un método de modificación química de poca complejidad y bajos requerimientos tecnológicos con respecto a otros métodos, por ejemplo, la carboximetilación es de más requerimientos, pues no se desarrolla en medio acuoso, sino orgánico, cuyos compuestos orgánicos es necesario recuperar; además el producto de la carboximetilación no está autorizado utilizarlo en la industria alimentaria. (Tijssen et al., 2001)

1.4 Cinética de la reacción de acetilación

El objetivo de la cinética química es medir la rapidez de las reacciones químicas y encontrar ecuaciones que relacionen la velocidad de una reacción con variables experimentales. La velocidad de una reacción puede ser descrita a partir de la concentración de las especies involucradas en la reacción y una constante k , sin embargo, esta puede depender de numerosos factores (el solvente utilizado, el uso de catalizadores, fenómenos de transporte, material del reactor, etc.), haciendo muy complejo el proceso de determinación de velocidades de reacción. (Levespiel, 1999)

Varios autores reportan la esterificación catalizada en medio básico: la acetilación de almidones de diversas fuentes usando anhídrido acético (AA) como agente modificante, sin embargo, es limitada la referencia a la cinética y a las mejores condiciones de operación de este proceso.

(Salcedo et al., 2016) demostró que la acetilación de almidón nativo, con GS entre 0,01 y 0,037, modificó la superficie granular sin alterar la morfología del grano e incrementó la cristalinidad y el pico de viscosidad máxima mientras que la temperatura de gelatinización disminuyó respecto al material nativo.

(Pérez et al., 2018b) en la exploración de las condiciones de reacción para almidón acetilado, partiendo de almidón nativo y pregelatinizado los mejores resultados los alcanza partiendo de almidón pregelatinizado, la cinética de la acetilación de almidón de yuca en medio básico acuoso responde a un mecanismo de reacción complejo formado por la acetilación en paralelo con la hidrólisis del agente esterificante y de los productos polisustituídos.

(Lefnaoui and Moulai-Mostefa, 2015a) demostraron que la variable que más influencia ejerce en el GS es el tipo de almidón de partida y el efecto del incremento del GS es superior en el pregelatinizado que en el nativo lo cual se debe a que durante la gelatinización se produce un fraccionamiento parcial de las cadenas de amilosa y amilopectina generando una reducción del tamaño de las mismas que facilita la activación del monómero y acelera la inserción de los grupos acetilo. Este efecto favorece el avance de la reacción e incrementa el GS.

1.4.1 Cinética de la reacción de acetilación a partir de almidón nativo

(Guerra, 2007) mediante el estudio cinético de la acetilación de almidón nativo de yuca directamente disuelto en AA a elevadas temperaturas reportó resultados positivos, pero la aplicación industrial de dicho método requiere la recuperación y reciclaje del AA sin reaccionar.

Similar tratamiento analítico (Guerra, 2007), pero el medio de reacción empleado no es acuoso, sino que disuelve el almidón directamente en el anhídrido acético a una relación 0,1 mol de UAG/ 1,08 mol de AA y encuentra un comportamiento de pseudoprimer orden respecto a la concentración de almidón con constantes a 120 °C de 0,67 h⁻¹ partiendo de plátano y 0,23 h⁻¹ partiendo de maíz.

(Pérez et al., 2018a) estudió la cinética de la acetilación del almidón nativo en medio básico acuoso, resultando las constantes ($K= 0,003887$ L/mol min y $E= 5523,63$ J/mol) para la acetilación son de magnitud inferior a las obtenidas por (Guerra et al., 2008) con disolución directa del almidón en AA, pero existen diferencias considerables en la fuente de partida de los almidones, las temperaturas de experimentación y la composición del medio, resultando también que las constantes ($K= 0,07136$ L/mol min y $E= 12294,49$ J/mol) para la hidrólisis que se produce paralelamente, es superior que, para la acetilación, lo cual es un efecto importante para la operación del reactor, puesto que incrementos de temperatura

favorecen más la hidrólisis.

También, (Toledo, 2017) determinó el mecanismo para la acetilación de almidón nativo de yuca en medio básico acuoso, obteniendo la expresión cinética completa y un estudio de distribución de producto a través de la selectividad que demostró que a pH básico moderado inferior a 10, los procesos de hidrólisis se desarrollan en muy poca extensión. A través de las ecuaciones cinéticas obtenidas se considera un comportamiento de pseudo-primer orden con respecto al componente de partida: almidón nativo, en la secuencia de reacciones paralelas estudiadas.

Por otra parte (Pérez et al., 2018a) analizando las velocidades de arranque aprecia que a $\text{pH} < 10,5$ y temperatura constante de $40\text{ }^\circ\text{C}$ existe coincidencia entre r_{RAC} y r_{NaAc} , lo cual indica, junto a las bajas $-r_{\text{OH}^-}$, que en dichas condiciones de pH es muy limitada la ocurrencia de la hidrólisis. Sin embargo, a pH superiores se incrementa la r_{NaAc} respecto a r_{RAC} y aumenta exponencialmente la r_{OH^-} indicando un comportamiento cinético diferente en el cual la hidrólisis del AA afecta sensiblemente la acetilación; dichos resultados se muestran en la figura 1.6

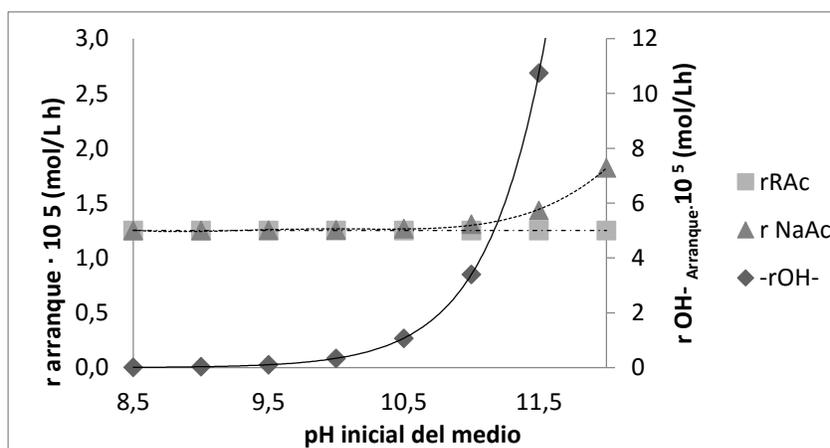


Figura 1.6 Velocidades de arranque de la reacción a $40\text{ }^\circ\text{C}$.

Fuente: (Pérez et al., 2018a)

Además, (Pérez et al., 2018a) determinó la selectividad para diferentes valores de pH en función de la temperatura, mostrando los resultados en la figura 1.7, los cuales manifiestan que a $\text{pH} < 10$, la temperatura y la concentración de reactantes no afectan la selectividad. Sin embargo, a pH superiores comienza a apreciarse el efecto de reducción de la selectividad con incrementos de temperatura. Para pH superiores a 12 la distribución de

producto no es favorable y el efecto se degrada con incrementos de temperatura. El análisis de las velocidades de arranque y de la selectividad se complementa y demuestra que el factor determinante en la cinética es la C_{OH^-} .

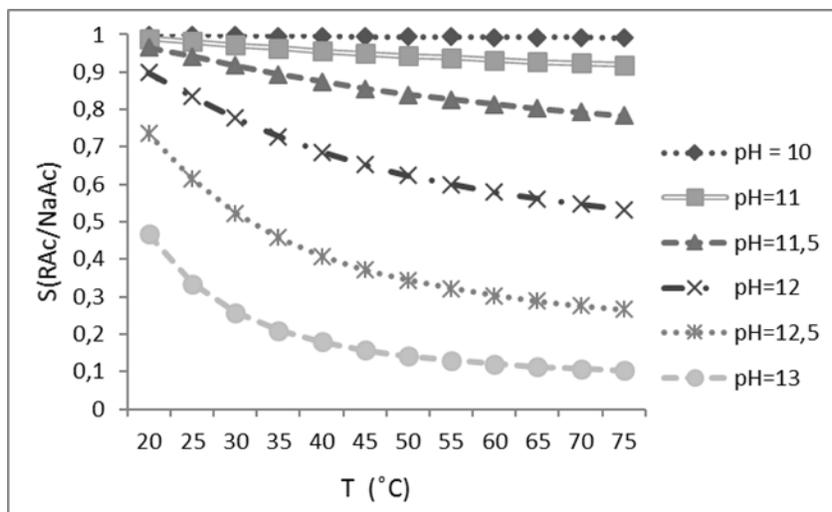


Figura 1.7 Selectividad a diferentes pH en función de la temperatura.

Fuente: (Pérez et al., 2018a)

1.4.2 Cinética de la reacción de acetilación a partir de almidones gelatinizados

(Graaf et al., 1995) reporta que la energía de activación de almidón gelatinizado de papa acetilado con vinilacetato es superior para la acetilación que para la hidrólisis que se produce paralelamente, lo que quiere decir que incrementos de temperatura favorecen más la acetilación ($E_{\text{Acetilación}} = 93200 \text{ J/mol}$, $E_{\text{Hidrólisis}} = 31975 \text{ J/mol}$).

(Negrín, 2016) realizó otro estudio de la cinética de la acetilación de almidón pre gelatinizado de yuca a 25 °C considerando solamente la ocurrencia de la reacción 1 y obtuvo un comportamiento de segundo orden con una constante de velocidad de 0,047 $\text{m}^3/\text{Kmol}\cdot\text{min}$.

(Pérez et al., 2018a) determina la cinética (expresión completa)

$$-r_{RO^-} = -\frac{dC_{RO^-}}{dt} = K_1 (C_{RO^-}) (C_{AA}) = 0,17 e^{-\left(\frac{10113,5}{121,8 T}\right)} (C_{RO^-}) (C_{AA}) \quad \text{mediante}$$

estudios experimentales, usando un exceso de anhídrido con respecto al almidón pregelatinizado y se aplica el método integral de análisis, y a partir del grado de sustitución, resulta la acetilación (reacción deseada) de primer orden respecto al almidón y al anhídrido, siendo dos el orden global. El factor de mayor influencia en la cinética es la concentración de hidroxilos. El mecanismo de reacción se corroboró a través del plan experimental

desarrollado, se determinó la variación de la concentración de acetato de almidón y el consumo de hidroxilos.

Los resultados del estudio cinético desarrollado por (Pérez et al., 2018a) permiten establecer que la acetilación de almidón de yuca con anhídrido acético y catálisis básica no se ve prácticamente afectada en términos de distribución de producto cuando el pH del medio es inferior a 10,5 pero incrementos de la alcalinidad por encima de pH 11.5 provocan una caída drástica de la velocidad de la reacción deseada respecto a la no deseada. En este mismo sentido la velocidad de la reacción deseada respecto a la no deseada se ve afectada por incrementos de temperatura solo cuando el medio tiene un pH superior a 11.5. Respecto a la concentración de agente modificante, por razones ambientales y económicas es necesario trabajar en los mínimos valores posibles.

1.5 Comercialización del almidón y sus aplicaciones

El precio de comercialización del almidón modificado por vía química está entre un 35 y un 60 % por encima del nativo, dependiendo del GS y del grado de purificación del mismo. En el caso del almidón nativo acetilado de bajo GS y grado alimenticio este valor puede ser considerado como 1,5 \$/kg con lo cual aún se encuentra por debajo del precio de comercialización de materiales de acción y usos similares como los estabilizantes de helados o la carboximetil celulosa. (CHETCHUDA, 2017)

La principal aplicación de los polisacáridos en alimentos es como agentes espesantes o gelificantes. La diferencia en el comportamiento depende de la estructura tridimensional que tiene el polisacárido, de su concentración y de la interacción con otros componentes del alimento. (Rembado and Sceni, 2009)

El almidón ha ganado importancia en el desarrollo de nuevos productos por el bajo costo y la alta disponibilidad a partir de diferentes las diferentes fuentes de las que es extraído. Además, se diferencia de todos los demás carbohidratos en que se presenta en la naturaleza como complejas partículas discretas (gránulos). (Flores, 2010)

Se calcula que anualmente se extraen unos 60 millones de toneladas de almidón de una gran variedad de cultivos: cereales, raíces y tubérculos, para uso en una asombrosa variedad de productos: como agentes estabilizadores en sopas y alimentos congelados, revestimiento para pastillas y papel, adhesivo para estampillas y madera laminada, para el acabado de textiles, como materia prima para elaborar etanol e incluso como agente de cohesión en el concreto. Un 10% de ese almidón se produce con las raíces de la yuca, un

cultivo más conocido por ser el alimento básico de millones de campesinos de bajos ingresos de África, Asia y América Latina. En América Latina y el Caribe está creciendo la producción comercial de almidón de yuca, con una fuerte tendencia a la producción de almidones modificados e hidrolizados, que obtienen precios más altos. En todos los países tropicales donde hay cierto grado de industrialización hay oportunidades de mercado para el almidón de yuca autóctono. Sin embargo, los nuevos participantes en este mercado sólo tendrán éxito si tienen suficiente capital de apoyo para esta empresa y si pueden ofrecer un suministro fiable de almidón que satisfaga las especificaciones del usuario a un precio competitivo. (FAO, 2006)

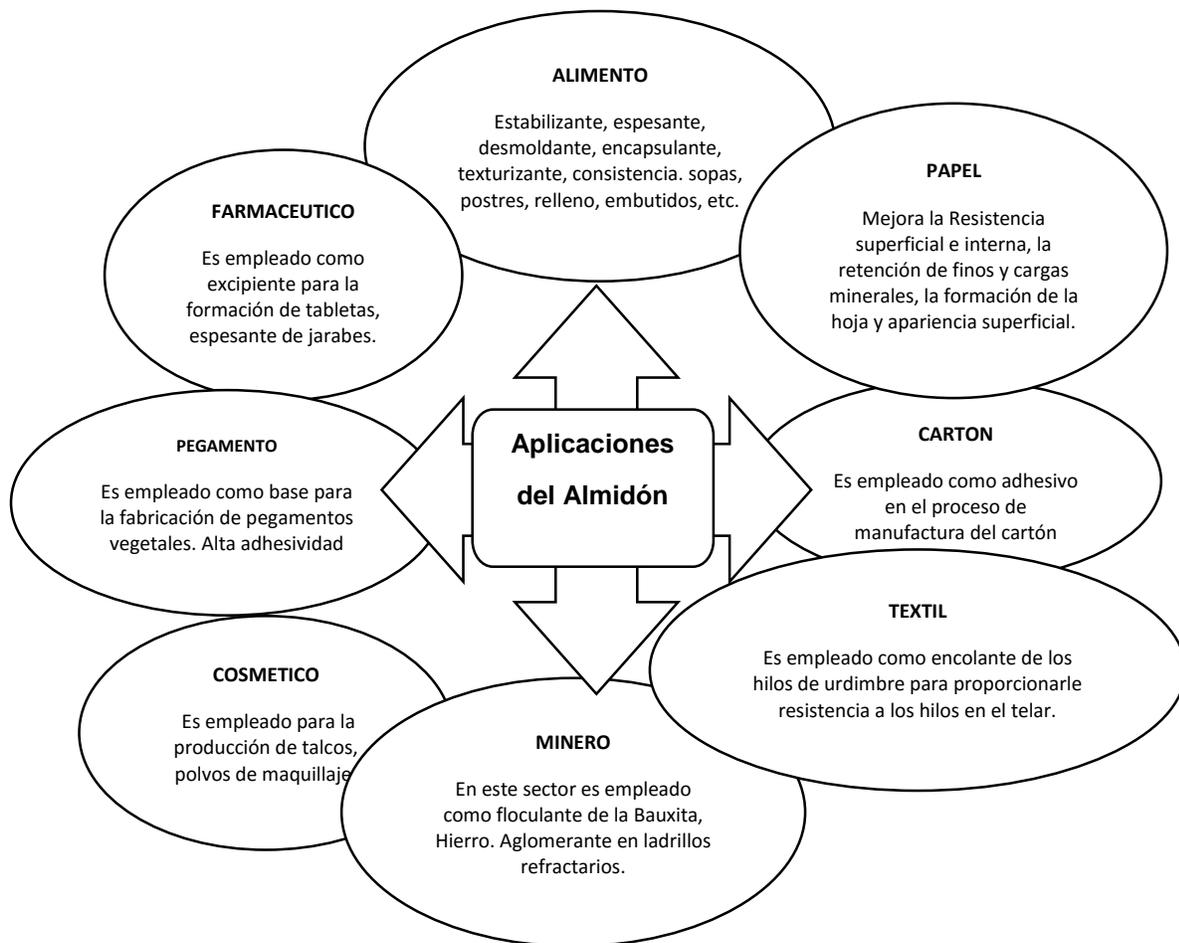


Figura 3 Resumen de las aplicaciones del almidón.

Fuente: (Mendoza, 2010)

1.5.1 Usos del almidón en productos alimentarios y no alimentarios

El almidón y los productos de almidón son usados en variedad de formas tanto en la industria de alimentos como en la no alimentaria. En la alimentación, se usa como ingrediente de diferentes preparados y en la industria no alimentaria como materia prima básica o producto auxiliar para la elaboración de una amplia gama de productos. El consumo de almidón se destina aproximadamente 75 % al sector industrial y el 25 % al sector de alimentos. La industria de fabricación de papel y cartón usan cerca del 80 % del almidón suministrado al sector industrial, seguido de textiles, adhesivos y otras industrias. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

Uso en productos alimentarios

En la industria de alimentos el almidón, tanto nativo como modificado, tiene un papel importante en la textura de varios preparados al aportar palatabilidad y aceptabilidad.

- ✚ Como protector contra la humedad, de diversos productos en polvo -como azúcares- pues los almidones absorben humedad sin apelmazarse.
- ✚ Como espesante, da cuerpo y textura al alimento preparado; para sopas, alimentos para infantes, salsas, gelatinas sintéticas.
- ✚ Como agente coloidal, imparte textura, sabor y apariencia. La cocción del almidón produce una solución coloidal estable, compatible con otros ingredientes en productos alimenticios.
- ✚ Como aglutinante, para el ligamento de componentes. En la preparación de salchichas y embutidos cocidos.
- ✚ Como emulsificante, produce una emulsión estable en la preparación de mayonesas y salsas similares.
- ✚ Como estabilizador, por su elevada capacidad de retención de agua es usado en productos mantecados-helados.
- ✚ Industria de edulcorantes.

Uso en productos no alimentarios:

- ✚ La industria de papel y cartón consume almidones con diversos tipos de modificación; el tipo varía en cada empresa de acuerdo a diversos factores como: el tipo de aplicación, el tipo de papel producido, entre otros. Esta industria exige tres

características básicas en el almidón: blancura, bajo contenido de fibra y pocas impurezas. El almidón se usa en esta industria en varias formas: como pegamento, para dar una textura lisa, mejorar su apariencia, evitar el desprendimiento superficial de fibras, impedir que la tinta se desprege en escritura o impresión, mejorar la resistencia a la humedad, como agente de revestimiento y como adhesivo.

- ✚ En la industria textil los almidones se usan en operaciones como encolado de la urdimbre, aprestado y estampado de tejidos o para producir diseños en varios colores sobre la superficie lisa de un tejido acabado. Además, se usa en lavandería para almidonar tejidos blancos y darles dureza y para restaurar apariencia y cuerpo a las prendas de vestir.
- ✚ El almidón y algunos almidones modificados se usan para la elaboración de adhesivos, ya sea para adhesivos de alta fuerza adhesiva o para colas de menor precio. Los adhesivos de almidón a base agua, son muy útiles para las empacadoras y etiquetadoras de alta velocidad por el costo relativamente bajo y la gran velocidad de adhesión.
- ✚ El almidón y algunos almidones modificados son ampliamente usados en la fabricación de píldoras o tabletas, en las cuales cumplen dos funciones: como agente de dispersión de polvo y como ligante del ingrediente activo de la tableta.
- ✚ En la industria cosmética, se emplea en la fabricación de polvos faciales finos, polvos compactos y polvos nutritivos. También actúa como absorbente, mejorador de viscosidad y como vehículo para sustancias pastosas, líquidas o semisólidas en la elaboración de cremas y lociones de uso dermatológico.

1.5.2 Aplicaciones de almidones modificados

Almidones pregelatinizados.

El proceso de pregelatinización hace que posible que el almidón pueda formar geles en frío. Se utilizan en productos que requieren viscosidad sin que se cocinen o que sometan a altas temperaturas. Se utilizan en bebidas, productos cárnicos, bollería y postres para dar consistencia y cuerpo. Es común en productos “instantáneos” ya que permiten que el alimento espese al añadir agua, leche u otro líquido en frío y sin la aparición de grumos. Además, mejoran el almacenamiento a bajas temperaturas de estos productos. (anónimo, 2015)

Los almidones pregelatinizados se producen comercialmente usando secadores de tambor y el proceso de extrusión: el almidón es calentado con exceso de agua a la temperatura de gelatinización, recuperado por secado para su consumo final, y se modifican sus propiedades funcionales de viscosidad, absorción y solubilidad en agua. (Martínez et al.)

Almidones hidrolizados.

Los almidones sometidos a hidrólisis (ácida, alcalina, enzimática) se utilizan principalmente en productos con alta concentración de almidón. Sus propiedades pueden ser muy variables, pero en general forman un gel fuerte en frío, pero de baja viscosidad a altas temperaturas, lo que permite tener altas concentraciones sin una viscosidad excesiva en productos de consumo en caliente, por ejemplo, sopas y otros platos precocinados. Un ejemplo típico de uso de almidón hidrolizado en frío lo encontramos en las grageas y gominolas que se suelen fabricar con azúcar, jarabe de glucosa y distintos emulsificantes como pectinas y almidón. (anónimo, 2015)

Almidones entrecruzados.

Con esta modificación se crean enlaces cruzados en los gránulos del almidón mejorando la resistencia a los procesos mecánicos y ambientes ácidos. El perfil de viscosidad del almidón se hace mucho más estable al reforzarse la estructura del gel. También se conocen como almidones reticulizados. El almidón entrecruzado se utiliza en productos de carácter ácido, por ejemplo, salsas como el ketchup, y productos congelados o sometidos a oscilaciones importantes de temperatura. (anónimo, 2015)

Almidón eterificado y esterificado.

La eterificación y la esterificación del almidón, por ejemplo, la acetilación persigue principalmente mejorar la estabilidad de los geles a baja temperatura previniendo un exceso de sinéresis y ruptura del gel. Su principal uso es en productos que se almacenan a bajas temperaturas y congelados. (anónimo, 2015)

Almidón retrogradado.

La deshidratación del hidrogel de almidón formado durante el calentamiento, por métodos químicos, conduce a la precipitación de la amilosa, fenómeno que se conoce como retrogradación. El almidón retrogradado presenta un estado sólido con una interacción molecular más sencilla, y diferente patrón regional de humedad que el almidón nativo. La naturaleza de los cristales retrogradados depende de: la relación amilosa/amilopectina, la

fracción lineal de amilosa, la longitud de la cadena ramificada de amilopectina, la temperatura y naturaleza del medio, y del mecanismo llevado a cabo durante la precipitación. La textura superficial que adquieren las partículas y los cambios sufridos en la red cristalina, le imparten propiedades de cohesión al almidón, conservando su capacidad desintegrante, lo que posibilita que sea una fuente potencial de materia prima farmacéutica, para utilizarlos en la elaboración de tabletas. (Garzón, 2006)

1.6 Descripción de los procesos de tratamiento industrial de la yuca

Los procesos de tratamiento industrial de la yuca son desarrollados por distintos métodos, los cuales están referidos por varios autores, por lo que en este trabajo se adaptan las etapas tecnológicas de la industrialización de la yuca al proceso de acetilación del almidón, desarrollando las etapas de modificación física y química: gelatinización y acetilación, y la etapa de secado del material gelatinizado, puesto que estas operaciones no han sido antes concebidas.

Los principios de la extracción del almidón de yuca se aplican en todas las tecnologías, aunque varían dependiendo de los equipos utilizados. Se encuentran procesos de manufactura artesanal, otros medianamente mecanizados y otras tecnologías modernas que mecanizan todas las etapas del proceso de manera eficiente. Al pasar de una tecnología media a una más evolucionada aumenta el nivel de extracción de almidón lo cual mejora notablemente la rentabilidad del proceso y generalmente son de gran capacidad, tienen altos costos de inversión, pero entregan productos de alta calidad. Las raíces una vez cosechadas deben ser transportadas a la planta procesadora dentro de las siguientes 24-48 horas para evitar su deterioro fisiológico y/o microbiano. Un factor importante en la producción de almidón de yuca de alta calidad, es que todo el proceso desde la cosecha de las raíces hasta el secado del almidón sea ejecutado en el más corto tiempo posible (Montoya, 2007)

1.6.1 Proceso tradicional

El proceso requiere primeramente de lavado/pelado profundo en húmedo, en la que se desprenden las impurezas y la cascarilla de las raíces, normalmente en esta etapa las pérdidas son de 2-3% del peso de las raíces frescas; seguido se realiza el rallado, en el que se reducen las raíces a una pulpa, la eficiencia de esta operación determina en gran medida el rendimiento total del almidón en el proceso de extracción; si el rallado no es eficiente, no se logran separar totalmente los gránulos de almidón de las fibras, por otra

parte, si el rallado es demasiado fino, los gránulos muy pequeños sufren daños físicos, más tarde deterioro enzimático, y pierden densidad lo que haría más lenta la sedimentación (Montoya, 2007)

La masa rallada pasa a ser filtrada (colada), empleando agua para favorecer la eficiencia de la operación. La lechada obtenida se somete a concentración por sedimentación; se obtienen tres capas definidas: el almidón (capa inferior), el almidón mezclado con material proteico denominado mancha (capa intermedia) y el residual sobrenadante (capa superior) (Alarcón and Dufour, 1998)

El almidón resultante se recolecta, transporta y desmenuza para ser secado por exposición al sol hasta que tenga aproximadamente 12 %; debe ser removido suavemente dos o tres veces durante este período; en esta operación el viento arrastra polvo de almidón ocasionado pérdidas de alrededor de 0,7 % (Alarcón and Dufour, 1998). El secado es una de las etapas más limitantes en el proceso de extracción de almidón de yuca en las agroindustrias de mediana escala ya que se requieren grandes extensiones de suelo para los patios de secado y contar con un clima soleado favorable. El almidón seco en forma de terrones es molido y posteriormente tamizado; su finura o granulometría depende de las características del almidón que se desea obtener. Finalmente, es empacado y almacenado (Aristizábal and Sánchez, 2007).

1.6.2 Proceso mecanizado

Primeramente, se lleva a cabo una etapa de prelimpieza donde se eliminan excesos de impurezas tales como pedúnculo o pequeños tallos remanentes y tierra, luego tiene lugar el lavado/pelado. La acción combinada de chorros de agua a alta presión y la abrasión de las raíces entre ellas, remueve más fácilmente la cascarilla. Después se realiza una clasificación e inspección de las raíces, a lo que se denomina selección, esta es visual y manual para retirar las impurezas existentes que puedan dañar algún equipo o interferir en la calidad del producto extraído. Luego de la inspección, las raíces lavadas y descascaradas son desintegradas, para reducir sustancialmente el tamaño de partícula, favoreciendo el contacto con la fase gluten. Luego se separa la fibra del almidón, se elimina el contenido de arena, se purifica con adición de agua y se concentra la lechada para retirar los almidones solubles y partículas extrañas. La etapa de purificación permite obtener un almidón refinado, lo que le añade valor para sus aplicaciones. Seguido se realiza la deshidratación, se separa el agua del almidón en la lechada hasta obtener un producto con

aproximadamente 45-48 % de humedad. La disminución de la humedad reduce el consumo de energía durante la etapa de secado. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

El almidón se conduce y seca por una corriente de aire caliente, este al ponerse en contacto con la pasta amilácea húmedo se enfría, gana humedad dando lugar a un proceso de transferencia masa y energía combinado donde el agua del almidón se transfiere al aire. Para reducir el período de secado con altas temperaturas es conveniente mezclar almidón húmedo con almidón seco, de ahí que se hace necesario la recirculación del almidón. Se obtiene el almidón seco en forma de polvo con una humedad entre 12-13 % y una temperatura media de 58 °C. Esta etapa es de suma importancia ya que garantiza la estabilidad del almidón tanto químico- física como microbiana, pues al garantizar una humedad de 12 % no hay posibles reacciones, ni crecimiento microbiano que puedan cambiar las propiedades del almidón, además de reducir el volumen de producto a empacar. El almidón es molido y tamizado para remover las partículas grandes. Luego es empacado y almacenado. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

Si se almacenara el producto a una alta temperatura con humedad residual, la humedad del almidón se condensará produciéndose la gelatinización del almidón, la formación de grumos y un aumento de la población microbiana. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

1.6.3 Uso y tratamiento de los residuos

Los residuos obtenidos en la producción de almidón de yuca pueden ser clasificados en dos categorías: sólidos que incluyen la fibra, la cascarilla de la yuca y la mancha y líquidos como las aguas residuales de las etapas de lavado, filtrado y sedimentación. La cascarilla puede ser usada como fertilizante, en la alimentación animal. La fibra, subproducto de la operación de filtrado, se usa como complemento de concentrados para animales o se da directamente como alimento animal. Este material contiene una humedad entre 85-90 %, cuya materia seca contiene 12-14 % de fibra cruda, 2 % de grasa y 2,5 % de proteína. La mancha obtenida luego del proceso de sedimentación, contiene almidón de baja densidad, 95 % de humedad y su materia seca contiene 4 % de proteína y 1 % de grasa; generalmente se utiliza en la alimentación de porcinos. Es recomendable, utilizar un filtro para el agua empleada en el proceso construido por capas de grava gruesa, grava fina y arcilla que reducen los minerales y sólidos en suspensión contenidos en las aguas. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

Se ha estimado que el proceso de extracción de almidón genera una carga contaminante de cerca de 180 kg de demanda química de oxígeno (DQO) por tonelada de raíces. Por ello, todas las tecnologías utilizadas para el proceso de extracción de almidón, deben realizar un tratamiento de las aguas efluentes del proceso y no contaminar las corrientes de agua. El agua más contaminada es la obtenida del proceso de sedimentación o deshidratación y el agua obtenida en las otras etapas del proceso es más clara y requiere menos tratamiento. Esta última puede ser reciclada para lavar con ella las raíces de yuca, lo que aumenta la rapidez y la eficiencia de esta operación y del proceso en general, ahorrando así cerca del 17 % del agua que consume todo el proceso de obtención de almidón. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

La mayoría de las plantas de almidón usan lagunas de sedimentación para el tratamiento de las aguas residuales. Un decantador puede ser útil en el tratamiento del agua de lavado, principalmente en el tratamiento anaeróbico con recuperación de biogás. En este caso, el tratamiento puede ser básicamente hecho con aguas diluidas, lo cual decrece el volumen de reacción en el tanque e incrementa la eficiencia y por lo tanto reduce la inversión. Se ha estimado que el biogás obtenido por el tratamiento de las aguas puede suplir hasta un 75 % la energía necesaria para un proceso de secado de almidón indirecto y hasta un 100 % de la energía si el proceso de secado es directo y que el biogás no libere ningún residuo durante su combustión. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

Según (Torres et al., 2005) en el proceso de extracción de almidón de yuca se generan subproductos tanto sólidos como líquidos. Las principales características son:

1. Afrecho

Es el subproducto de la operación de colado. Una vez secado al sol, el afrecho se usa como complemento de concentrados para animales o se ofrece directamente en la alimentación animal. El análisis químico indica que el material tiene un contenido de materia seca de 80 a 85%, del cual el 60 a 70% es almidón y el 12 a 14% es fibra.

2. Mancha

Al terminar la sedimentación, se obtienen tres capas: la inferior y más densa es el almidón; la intermedia, que es un almidón mezclado con material proteico, de espesor variable y menos denso que el almidón, es la mancha y la capa superior es el agua residual. La

mancha contiene almidón de baja densidad y menor calidad y su nivel de proteína es alto, empleándose en la alimentación de porcinos y en la elaboración de adhesivos.

Este material se sedimenta y en la mayoría de los casos, su separación es ineficiente debido al bajo tamaño de las partículas, lo que hace que finalmente sean arrastradas junto con el efluente líquido (agua residual). Este material líquido puede ser reutilizado en la etapa de lavado de la yuca, lo que representaría un ahorro del 17% del agua utilizada en el proceso. (Alarcón and Dufour, 1998)

3. Agua residual

Durante el proceso de extracción de yuca se utilizan de 8 a 9 m³ de agua por tonelada de yuca procesada. Considerando que se procesa 4 toneladas de yuca por día y que la yuca en sí tiene un alto contenido de agua, se estima que se produce 36 m³ diarios de agua residual. En el proceso se generan dos tipos de aguas residuales: las que provienen del lavado y pelado de la yuca, que se caracterizan por contener gran cantidad de sólidos suspendidos (material inerte y cascarilla), valores de DQO bajos y una proporción de cianuro del orden de 40 a 70%; y las provenientes de la etapa de sedimentación, que presentan altas cargas orgánicas de DBO y DQO. (Torres et al., 2005)

La forma de mitigar el impacto desfavorable de la descarga de los efluentes a los cuerpos de agua superficiales, es aplicar tratamientos antes de su descarga. Sin embargo, es indispensable plantear alternativas apropiadas desde el punto de vista de sostenibilidad y eficiencia de tratamiento. Dentro de las alternativas de tratamiento de aguas residuales existentes, los procesos de depuración biológica anaerobia se perfilan como una excelente opción dadas algunas ventajas comparativas como bajos requerimientos de área e infraestructura (tamaño de reactores, mínimo consumo de energía), generación de menores cantidades de lodo y adicionalmente, producción de metano que puede ser recuperado y utilizado como una alternativa energética (Torres et al., 2005)

Conclusiones parciales

1. El almidón nativo presenta ciertas limitaciones para aplicaciones industriales, por ello se recurre a la modificación física, química o enzimática, así se añade valor al producto y se incrementa el rango de aplicaciones en la industria alimenticia, farmacéutica, textil, entre otras.
2. La acetilación del almidón en medio básico acuoso y en presencia de anhídrido acético como agente modificante, es un proceso de esterificación conocido y de bajos requerimientos que ofrece ventajas estructurales interesantes para el uso del producto resultante como agente estabilizante en suspensión acuosa.
3. Estudios cinéticos referentes a la acetilación de almidón de yuca demuestran que en medio básico acuoso de $\text{pH} < 10$ los procesos de hidrólisis del agente y de los productos polisustituídos ocurren en muy poca extensión por lo que en dichas condiciones el proceso puede ser considerado como una reacción simple en fase homogénea de orden uno respecto a almidón activo y anhídrido
4. La velocidad de acetilación de almidón pregelatinizado de yuca es superior a la del nativo, debido a que los procesos de ruptura parcial de la estructura polimérica asociados a la gelatinización favorecen la sustitución nucleofílica.

Capítulo 2. Tecnologías para almidón acetilado. Balances de materiales y energía

2.1 Tecnologías para obtención de almidón

La tecnología para almidón nativo mediante la vía tradicional es muy usada todavía en países eminentemente agrícolas, en los que esta industria artesanal constituye la base de su economía (Torres et al., 2005). Esta alternativa difiere de la mecanizada en el desarrollo de las etapas por los equipos utilizados en cada una, pero no en la secuencia ni el tratamiento o procesamiento de la yuca, la raíz sufre las mismas modificaciones, por consiguiente, el producto es el mismo, aunque pueden variar aspectos como el tamaño de los gránulos, el % de humedad, entre otros.

2.1.1 Vía tradicional

El proceso requiere una primera etapa de lavado/pelado que se realiza en una máquina lavadora/ peladora que consta de un tambor cilíndrico el cual tiene agujeros que permiten la salida de desechos, al que se alimentan chorros de agua mediante un tubo bifurcado que entra por los extremos del cilindro, en otros casos el agua se suministra a través de un eje central perforado, en esta etapa se desprenden las impurezas y la cascarilla de las raíces con ayuda del agua y la fricción entre ellas; seguido se realiza el rallado, en un dispositivo formado por un cilindro de madera cubierto por una lámina de hierro galvanizado con perforaciones, el cual gira a gran velocidad hasta reducir las raíces a una pulpa, el rallador debe ser reemplazado frecuentemente debido a su rápido desgaste (Montoya, 2007)

La masa rallada pasa a ser filtrada (colada) en un filtro que consta de un cilindro asociado a un semieje el cual tiene aspas que mezclan la masa rallada de yuca con agua; gira a una velocidad de 20-22 rpm y se carga y descarga lateralmente; la lámina interior del cilindro está cubierta por una malla de tela o nailon la que permite el paso de la lechada de almidón y retiene la pulpa o material fibroso. La calidad del almidón, respecto a su contenido de fibras e impurezas, depende de la malla que se utilice; Para evitar que pequeñas partículas de fibra pasen a la lechada de almidón, se recomienda realizar un recolado con el objeto de retener las fibras finas que pudieron pasar, operación que se puede realizar usando un tamiz vibratorio. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

La lechada obtenida contiene almidón, fibra fina y material proteico en suspensión, esta se somete a concentración por sedimentación en canales que trabajan a flujo laminar, con un tiempo aproximado de retención de tres horas, o en tanques de sedimentación en los que

puede durar de seis a ocho horas; se obtienen tres capas definidas: el almidón (capa inferior), el almidón mezclado con material proteico denominado mancha (capa intermedia) y el residual sobrenadante (capa superior). La mancha es un subproducto que contiene algo de almidón y en ella se concentran las proteínas por lo que se usa directamente para la alimentación porcina. La sedimentación hecha en canales es más rápida, ya que un gránulo de almidón debe recorrer 0,8 m en un tanque de sedimentación y solo 0,1 m en los canales. (Alarcón and Dufour, 1998)

La capacidad de sedimentación de la lechada de almidón es una de las limitantes de esta tecnología. Si se emplean tanques de sedimentación la capacidad está limitada por el número de tanques de que se disponga. Los tanques se construyen con ladrillos y se recubren con baldosín, generalmente son de un volumen de 2-5 m³. Si se emplean canales de sedimentación la operación es continua. Estos son de concreto y están revestidos de baldosa o cerámica, lo que facilita la limpieza y evita el deterioro del concreto. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

El almidón resultante de los canales tiene una humedad entre 45 y 47 %, este se recolecta y transporta en bloques compactos, se desmenuza con un implemento quebrantador para ser secado por exposición al sol sobre patios de concreto o sobre bandejas, hasta que tenga aproximadamente 12 %; debe ser removido suavemente dos o tres veces durante este período con rastrillos; en esta operación el viento arrastra polvo de almidón ocasionado pérdidas de alrededor de 0,7 % (Alarcón and Dufour, 1998). El secado es una de las etapas más limitantes en el proceso de extracción de almidón de yuca en las agroindustrias de mediana escala ya que se requieren grandes extensiones de suelo para los patios de secado y contar con un clima soleado favorable.

El almidón seco en forma de terrones es molido y posteriormente tamizado en mallas o tamices, generalmente entre malla 100–200; su finura o granulometría depende de las características del almidón que se desea obtener. Finalmente, es empacado en bolsas de papel multipliegos o en bolsas de polipropileno (Aristizábal and Sánchez, 2007)

El resumen de la secuencia de las etapas está representado en el diagrama de bloques que se muestra en la figura 2.1.

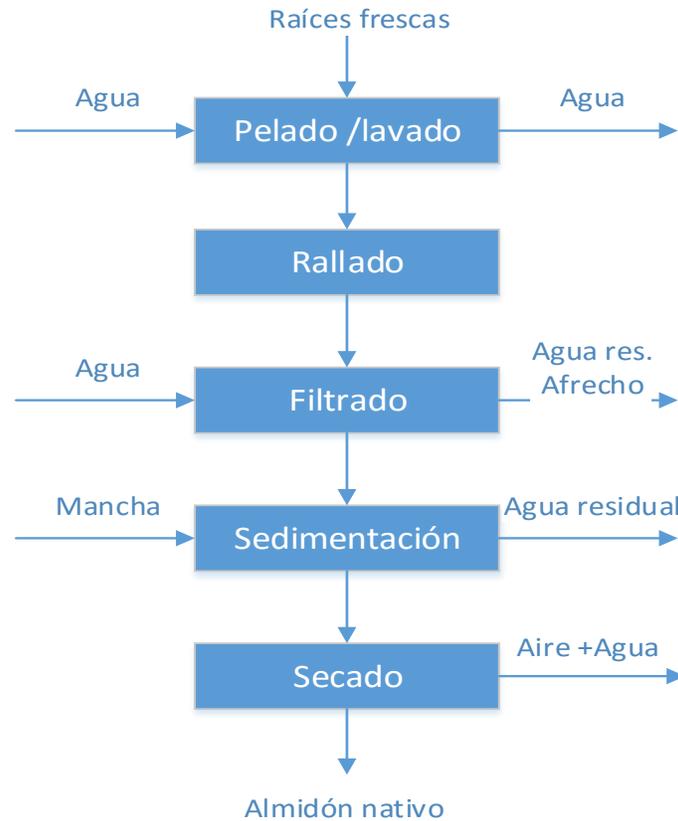


Fig. 2.1 Obtención de almidón por la vía tradicional. Ver Anexo 7

2.1.2 Tecnología para obtención de almidón mediante la vía mecanizada

El proceso, solo difiere demasiado del que se describe en el epígrafe 2.1.1 en el equipamiento utilizado.

Después de la recepción de las raíces, estas son conducidas por elevadores a una etapa de prelimpieza donde se eliminan excesos de impurezas tales como pedúnculo o pequeños tallos remanentes y tierra, luego a través de bandas transportadoras se alimentan a los lavadores que son tambores cilíndricos con un eje central provisto de aspas, diseñados para lavar y pelar las raíces simultáneamente. La acción combinada de chorros de agua a alta presión y la abrasión de las raíces contra las paredes del tambor y entre ellas, remueve más fácilmente la cascarilla (Aristizábal and Sánchez, 2007)

Mediante las bandas transportadoras que alimentan a los lavadores se realiza una clasificación e inspección de las raíces, a lo que se denomina selección, esta es visual y manual para retirar las impurezas existentes que puedan dañar algún equipo o interferir en la calidad del producto extraído. Luego de la inspección, las raíces lavadas y descascaradas

son alimentadas a un desintegrador cuya función es reducir sustancialmente el tamaño de partícula, favoreciendo el contacto con la fase gluten, este consiste en un cilindro rotativo que funciona a alta velocidad periférica con láminas dentadas en la superficie que rallan la yuca causando el rompimiento celular y la consecuente liberación del almidón (Fretes, 2010)

La reducción de tamaño debe realizarse hasta alcanzar un estado que facilite el secado y la extracción de almidón. (Pérez, 2013)

Para la separación de la fibra del almidón se emplea una centrifuga tamizadora o extractoras cónicas rotativas, estos extractores son montados en baterías con la finalidad de aumentar el rendimiento. La fibra, subproducto de la operación de filtrado, se usa como complemento de concentrados para animales o se da directamente como alimento animal. Este material contiene una humedad entre 85-90 %, cuya materia seca contiene 12-14 % de fibra cruda, 2 % de grasa y 2,5 % de proteína (Buitrago, 1990)

Luego se requiere de un hidrociclón para remover el contenido de arena de la suspensión extraída y de aquí se alimenta la misma mediante un tanque pulmón o de bombeo a las centrifugas purificadora (de platos) y concentradora, la adición de agua en la etapa de purificación y la posterior concentración permiten retirar los almidones solubles y partículas extrañas. Ambas son equipos compactos de alta eficiencia y homogeneidad en las características del material entregado, pero de alto costo de inversión y difícil construcción. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

El sistema utilizado para separar el agua del almidón en la lechada es por medio de un filtro de vacío, que consta de una tela cilíndrica perforada cubierta por tejidos que se remueven cada ocho horas, del cual se obtiene un producto con aproximadamente 45-48 % de humedad. La disminución de la humedad reduce el consumo de energía durante la etapa de secado. (Sritoth et al., 2000)

El almidón deshidratado al vacío sigue por una válvula rotativa que lo dosifica a un secador neumático, se conduce y seca por una corriente de aire caliente, este al ponerse en contacto con la pasta amilácea húmeda se enfría, gana humedad dando lugar a un proceso de transferencia masa y energía combinado donde el agua del almidón se transfiere al aire. Las temperaturas en estos equipos varían entre 120-170 °C. Cuando se usan filtros de vacío, el alto contenido de humedad en el almidón requiere bajas temperaturas con largos períodos de secado, para prevenir la gelatinización del almidón; para reducir el período de

secado con altas temperaturas es conveniente mezclar almidón húmedo con almidón seco, de ahí que se hace necesario la recirculación del almidón en el secadero. Si se usa un sistema de ventilación de presión negativa, con el ventilador colocado al final del secadero, se logra una reducción de la pérdida de almidón y menor consumo de energía que si se utiliza un sistema de ventilación de presión positiva. (Montoya, 2007)

Se obtiene el almidón seco en forma de polvo con una humedad entre 12-13 % y una temperatura media de 58 °C, este es conducido a un silo el cual tiene la función de enfriar y almacenar temporalmente el almidón resultante del proceso, si se almacenara a una alta temperatura con humedad residual, la humedad del almidón se condensará produciéndose la gelatinización, la formación de grumos y un aumento de la población microbiana. El secado es de suma importancia ya que garantiza la estabilidad del almidón tanto químico-física como microbiana, pues al garantizar una humedad de 12 % no hay posibles reacciones, ni crecimiento microbiano que puedan cambiar las propiedades del almidón, además de reducir el volumen de producto a empacar. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

El almidón seco es molido y tamizado para remover las partículas grandes, luego es transportado por alimentadores helicoidales a una envasadora automática. Para minimizar la pérdida de almidón durante el envasado y prevenir explosiones producidas cuando hay mucha concentración de almidón súper seco en el aire (< 10 % de humedad) es recomendable usar sistemas que permitan eliminar las cargas eléctricas estáticas en la salida del silo y en la entrada a la envasadora (Vilpoux, 2004)

El almidón es envasado en sacos multipliegos de papel con capacidad de 10, 25 y 50 kg que se pueden movilizar «a hombro», también se pueden usar grandes bolsas de 800 a 1 000 kg que deben ser transportadas con medios mecánicos. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

La secuencia de etapas se representa en el diagrama de bloques de la figura 2.2.

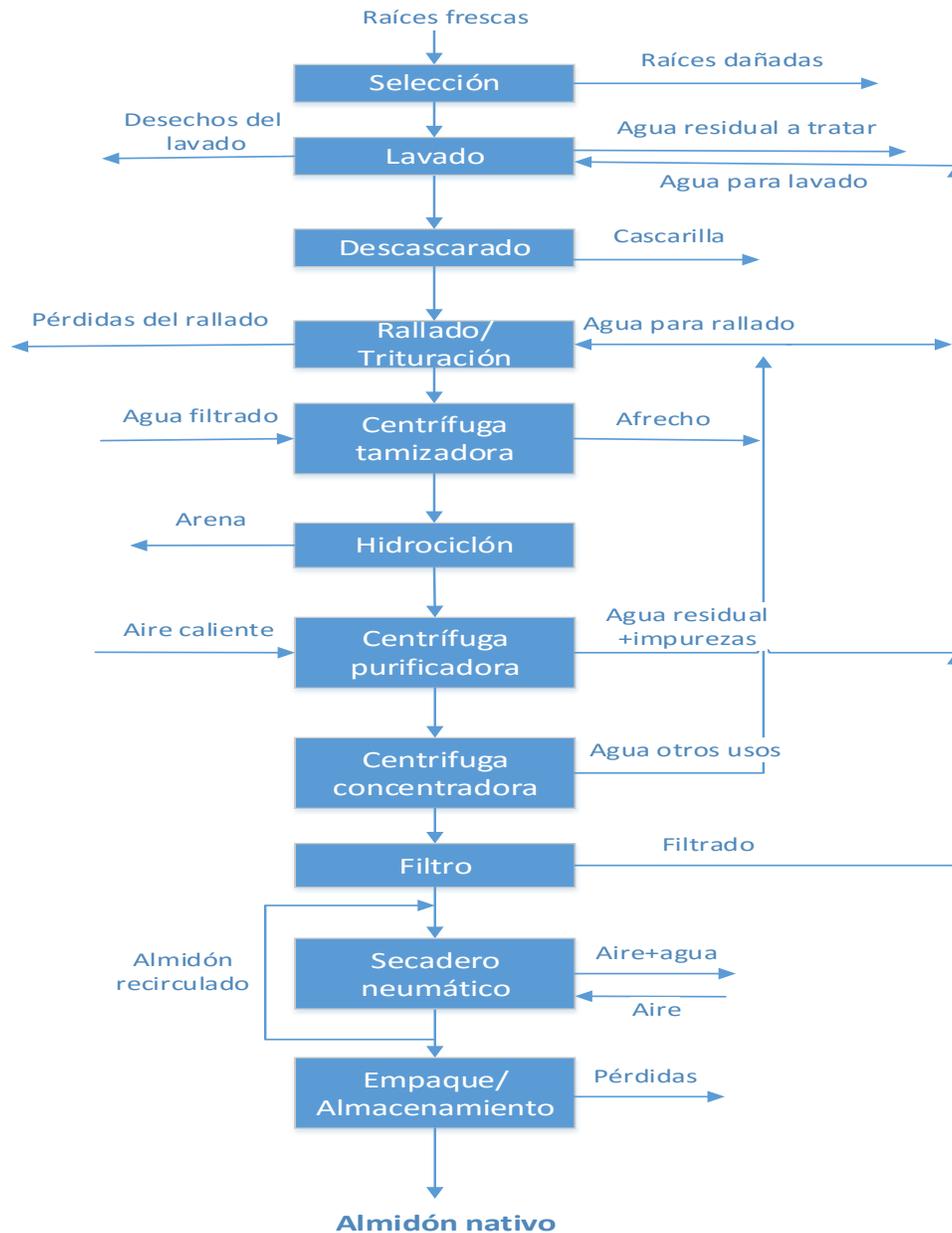


Fig. 2.2 Obtención de almidón nativo por vía mecanizada. Ver Anexo 8

2.1.3 Comparación de las vías tradicional y mecanizada

La obtención de almidón nativo por vía tradicional es muy sencilla en cuanto a los procedimientos por el equipamiento utilizado, las etapas que se llevan a cabo, los métodos utilizados, el rendimiento y la calidad del producto; sin embargo, la vía mecanizada ofrece mayor calidad y rendimiento, debido a que se utiliza equipamiento más eficiente y se

desarrolla el proceso en más etapas para lograr mejorar la producción; este método se usa en plantas modernas de mayor capacidad de producción y con mayores exigencias de calidad que las pequeñas y medianas instalaciones que usan el método tradicional.

Desde la recepción y la selección de las raíces se tienen en cuenta aspectos como el estado físico de las raíces y el tiempo de cosecha para no procesar raíces deterioradas. La etapa de lavado y descascarado tiene más eficiencia mediante la vía mecanizada, puesto que los lavadores son equipos tecnificados para la operación, además a estos se alimenta agua a alta presión, lo que facilita y perfecciona el lavado de las raíces; mientras que a través de la vía tradicional esta etapa es efectuada, en muchos casos con las manos y/o con los pies. El rallado mediante la vía tradicional se lleva a cabo muchas veces manualmente utilizando equipos que necesitan frecuentemente su reemplazo por su rápido desgaste; sin embargo, mediante la vía mecanizada se utilizan ralladores y desintegradores para aumentar la reducción del tamaño de las partículas.

La separación de la fibra utilizando la vía tradicional se lleva a cabo a través de filtros, que evidentemente no son técnicamente más eficientes que la centrífuga tamizadora que se utiliza en la vía mecanizada.

La vía mecanizada consta de una etapa de purificación que no existe en la vía tradicional, esta permite obtener un almidón refinado, que le añade valor al producto final; en la etapa de concentración se utiliza una centrífuga concentradora de alta eficiencia, y luego se ejecuta una etapa de deshidratación mediante un filtro al vacío, lo facilita el secado, ya que la alimentación al secadero presenta menor contenido de humedad que si se utiliza la sedimentación en canales o tanques, como es en la vía tradicional.

La etapa de secado en la vía tradicional es por exposición al sol, lo que requiere de un largo periodo y de buenas condiciones climáticas, este método ocasiona pérdidas, ya que el aire arrastra partículas lo que también se produce cuando el material se remueve para lograr un secado mejor. En la vía mecanizada se utiliza un secadero neumático, lo que implica que el agua se separa por métodos mecánicos lo que obviamente consigue menor contenido de humedad en el almidón obtenido, en esta etapa es necesario recircular el almidón seco a la corriente de entrada al secadero para ajustar la humedad del material húmedo proveniente de la etapa anterior, con el objetivo de evitar sobrecalentamiento y reducir el período de secado con altas temperaturas.

En este caso generalmente se utilizan secaderos neumáticos porque es el más apropiado, ya que por ejemplo un secadero rotatorio es más indicado para el secado de materiales granulares, puesto que un material en suspensión como es el almidón tiende a la formación de grumos, se adhiere a las paredes del equipo, lo que implicaría frecuente y difícil limpieza del mismo, además pérdida del almidón. En lo que respecta a un secadero trommel se considera en desventaja ya que requiere remover el material a secar.

Para la obtención de almidón de yuca utilizando la vía tradicional está comprobado (en la rallandería La Agustina, en el departamento del Cauca, Colombia) que procesando 1 tonelada de raíces frescas se obtienen 226 Kg de almidón; el rendimiento del proceso es de aproximadamente de 22.6%, o sea una relación raíces frescas: almidón de 4.4:1. (Alarcón and Dufour, 1998)

Sin embargo, si se utiliza la tecnología en que todas las etapas son mecanizadas, procesando entre 15-150 toneladas de almidón por día, el rendimiento varía entre 27-33 %, o sea una relación de peso de raíces frescas: almidón de 3-3,7:1. (Aristizábal and Sánchez, 2007)

Por todas las ventajas que presenta la vía mecanizada ante la vía tradicional, es evidente que es la más adecuada para obtener mayor cantidad de producto y de mejores propiedades como el contenido de humedad, el tamaño de partículas, color, pureza, sanidad, en fin, un producto de mayor valor y por tanto con más posibles aplicaciones: en la industria alimentaria y farmacéutica.

2.2 Tecnologías para obtención de almidón modificado

2.2.1 Tecnologías para obtención de almidón acetilado

La tecnología para almidón nativo por la vía mecanizada es adaptada al proceso de acetilación y a las condiciones de clima y suelos de Cuba, insertando la etapa de modificación química.

Etapas:

- Recepción y selección: se utiliza una tolva constituida por un cilindro de fondo cónico, utilizando además bandas transportadoras.
- Lavado- descascarado: es realizada en lavadores que consisten en tambores cilíndricos con un eje central provisto de aspas, diseñados para lavar y pelar las raíces simultáneamente. La acción de chorros de agua a alta presión y la abrasión

de las raíces contra las paredes del tambor (fricción) remueve fácilmente la cascarilla y garantiza los requerimientos de higiene para los productos de consumo humano (Aristizábal and Sánchez, 2007)

- Rallado y desintegración: se realiza en un triturador o desintegrador mecánico, este es un cilindro rotativo que funciona a alta velocidad periférica, con láminas dentadas en la superficie que rallan la yuca causando el rompimiento celular y la consecuente liberación del almidón; esta etapa se realiza teniendo en cuenta del grado de reducción de tamaño requerido (Aristizábal and Sánchez, 2007)
- Separación de la fibra: se realiza en una centrífuga tamizadora a la que se alimenta agua a contracorriente para separar mejor el almidón.
- Purificación: se utiliza una centrífuga de platos.
- Separación de arena: se realiza en un hidrociclón, este es un tipo de filtro muy común en Asia y frecuentemente encontrado en Brasil (Aristizábal and Sánchez, 2007)
- Concentración: se utiliza una centrífuga de discos; ambas son equipos compactos de gran eficiencia y que ofrecen homogeneidad de la materia de salida.

Luego de la concentración se inserta la etapa que permite la modificación química: la acetilación; esta es la única etapa que diferencia el proceso de obtención de almidón acetilado del proceso de obtención de almidón nativo, y la más importante.

- Acetilación: Se utiliza una batería de reactores continuos con agitación constante, enchaquetados que operan isotérmicamente a temperatura de 60 °C; se añade como agente modificante anhídrido acético, alimentando NaOH al 3% para mantener el pH entre 8- 8,5; la acetilación se detiene adicionando HCl, hasta ajustar el pH a 4,5.

Durante la acetilación se producen diferentes derivados como productos secundarios: los restos de anhídrido no sustituidos se hidrolizan a acetato de sodio, (Toledo, 2017)

En las condiciones indicadas anteriormente la reacción que se considera es la siguiente, debido a las conclusiones de los análisis bibliográficos realizados en el epígrafe 1.4.1, con respecto a las condiciones y cinética de la acetilación.



Otras etapas.

- Filtrado: se realiza en un filtro de vacío que consta de una tela cilíndrica perforada cubierta por tejidos que se remueven cada ocho horas, también puede ser en una canasta centrífuga que consta de un disco que gira a altas revoluciones. La ventaja de la canasta centrífuga es que permite obtener un producto con 33-35 % de humedad, mientras que con el filtro de vacío se obtiene un producto con aproximadamente 45-48 % de humedad. (Aristizábal and Sánchez, 2007)
- Secado: se produce en un secadero neumático con recirculación de almidón y alimentación de aire caliente proveniente de intercambiadores, muy similar a la etapa de secado descrita en el epígrafe 2.1.2 (Tecnología para obtención de almidón nativo por vía mecanizada)

En la Fig. 2.3 se representa en un diagrama de bloques la secuencia de etapas del proceso de obtención de almidón acetilado.

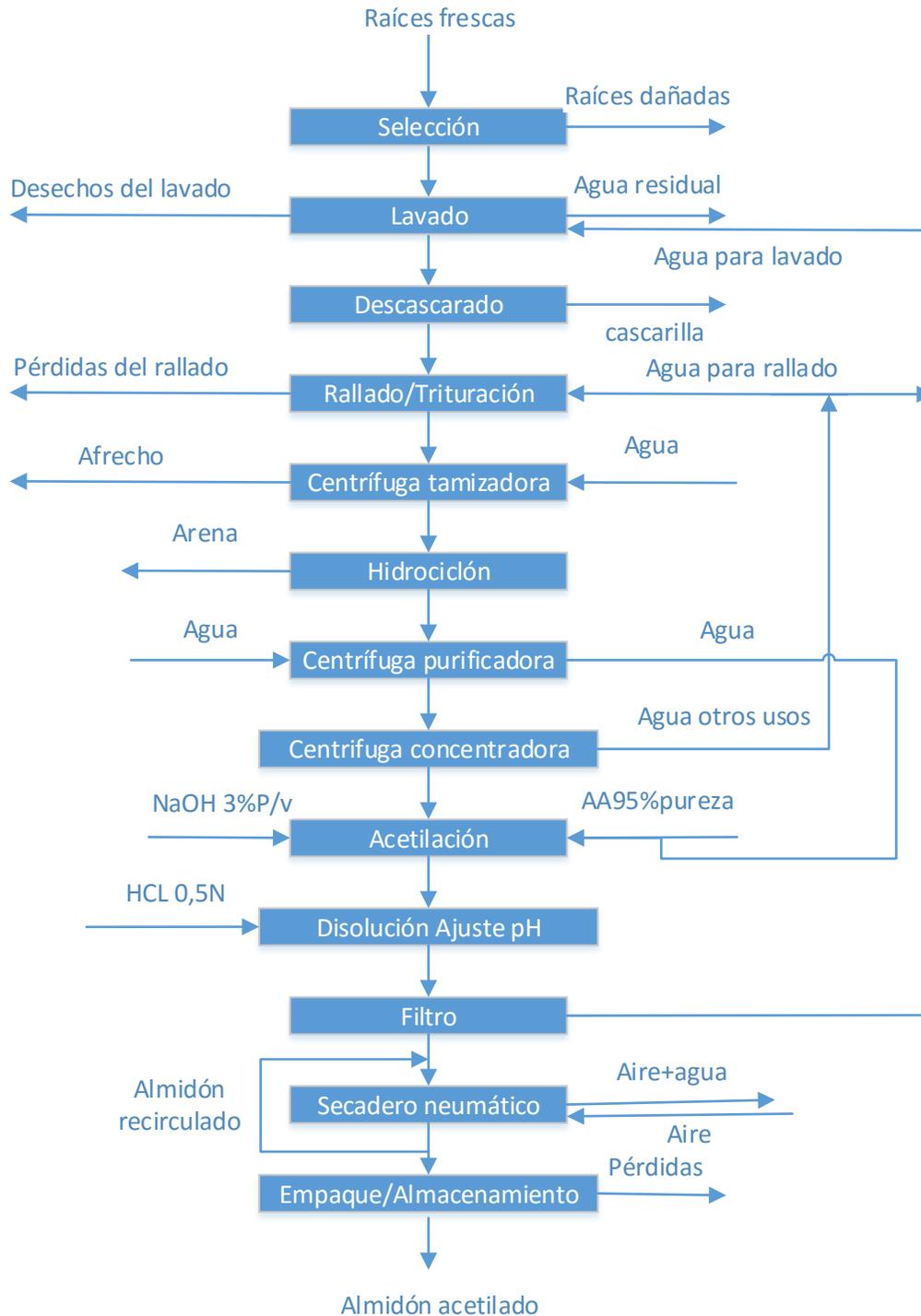


Fig. 2.3 Obtención de almidón acetilado.

2.2.2 Tecnología para obtención de almidón gelatinizado- acetilado

Reconociendo que la tecnología para almidón nativo por la vía mecanizada es esencialmente conocida y teniendo en cuenta las ventajas y rendimientos del cultivo de yuca en las condiciones de clima y suelos Cuba, es adaptada al proceso de acetilación

insertando las etapas de modificación física y química: gelatinización y acetilación, además la etapa de secado del material gelatinizado- acetilado.

En el proceso de obtención de almidón gelatinizado- acetilado las diferencias con el descrito en el epígrafe 2.1.3 son:

1. La existencia de la etapa de modificación física, que se inserta antes de la acetilación, debido a las ventajas de la acetilación del almidón gelatinizado, lo que quedó despejado en el estudio bibliográfico realizado en el epígrafe 1.4.2, con respecto a las condiciones y cinética de dichas modificaciones.
 - Gelatinización: es realizada en un tanque con chaqueta y agitación mecánica que trabaja de forma continua. La emulsión gelatinizada homogénea y fluida se logra, por contacto indirecto entre la suspensión de almidón y la corriente de agua caliente proveniente de un intercambiador de calor.
2. La acetilación proyecta resultados diferentes, puesto que no se parte del mismo material.
 - Acetilación: el almidón gelatinizado es acetilado utilizando el mismo equipamiento, con las mismas condiciones de operación, el mismo agente modificante, los mismos reactivos para mantener el pH de la reacción y para la neutralización que en la variante de almidón acetilado.
3. El secado del almidón gelatinizado- acetilado es una operación que requiere utilizar otro tipo de secadero.
 - Secado: se utiliza un secadero spray dryers con condiciones de calentamiento del aire similares a las del proceso con secadero neumático, pues no es posible extraer el agua de la suspensión gelatinizada acetilada por métodos mecánicos.

En la fig. 2.4 se represente a través de un diagrama de bloques el proceso de obtención de almidón gelatinizado- acetilado.

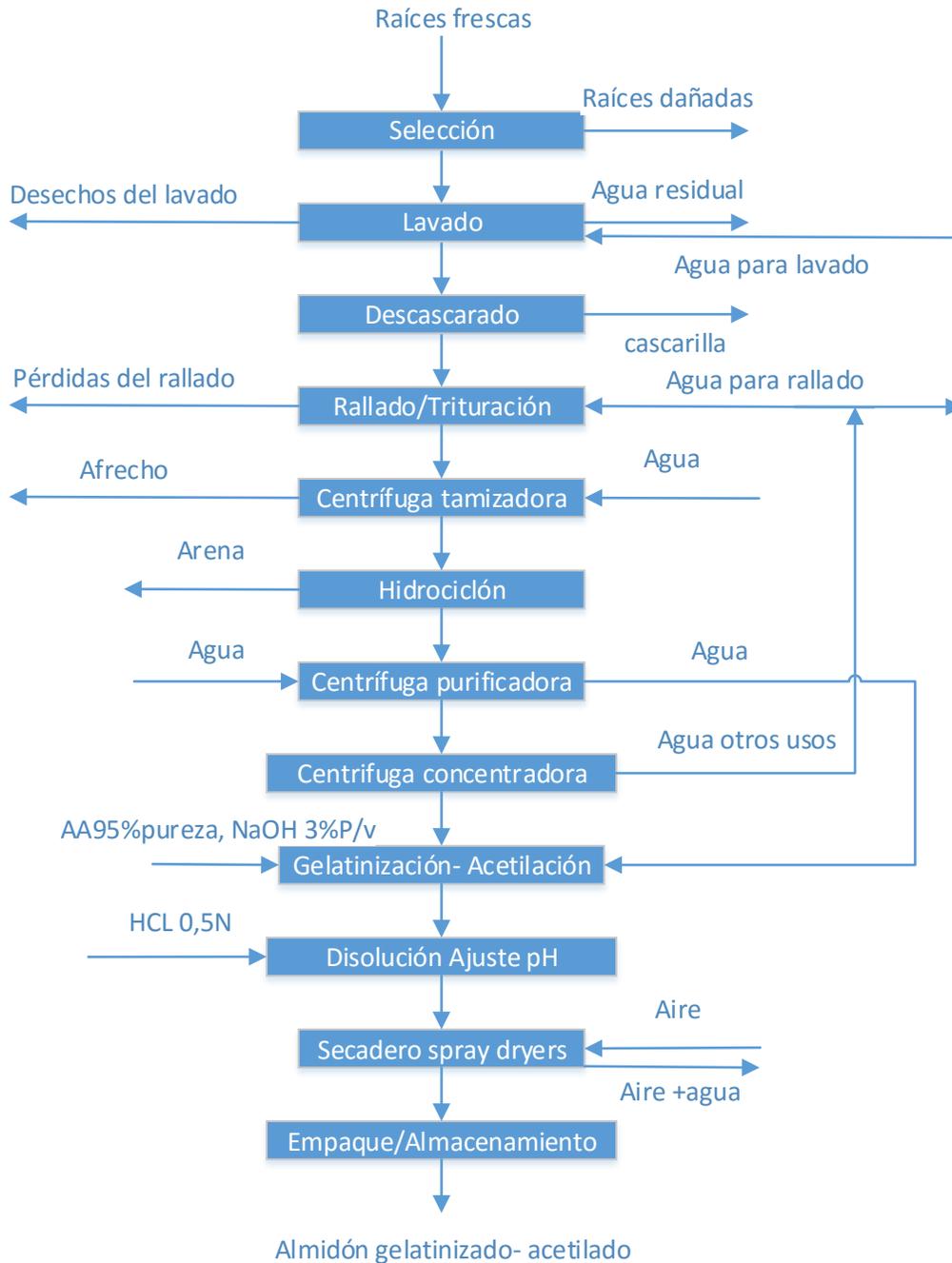


Fig. 2.4 Obtención de almidón gelatinizado acetilado.

2.2.3 Comparación de los procesos de obtención de almidón acetilado y gelatinizado- acetilado

En el proceso de obtención de almidón de yuca es posible y conveniente efectuar la modificación física y química cuando el producto está en disolución acuosa en lugar de

aislarlo como un sólido seco y disolverlo en agua posteriormente. Por ello, la situación tecnológica modificativa más común es la gelatinización directa.

Los procesos de obtención de almidón acetilado y gelatinizado- acetilado tienen en común las primeras etapas (selección, lavado, descascarado, trituración- desintegración, separación de la fibra, remoción de la arena, purificación, concentración).

El proceso de obtención de almidón gelatinizado- acetilado, como propiamente dice requiere de una etapa de modificación física: la gelatinización,

Esta etapa de modificación física permite en la acetilación más fácil la sustitución nucleofílica que en el almidón nativo, lo que favorece el avance de la reacción e incrementa el GS y permite obtener un producto con mejor modificación estructural. Por ello se define que los mejores resultados de acetilación se alcanzan con almidón gelatinizado.

(Pérez, 2018) determinó que incrementos de temperatura favorecen la hidrólisis que se produce paralelamente a la reacción de acetilación de almidón nativo en medio básico acuoso con AA como agente modificante; mientras que, (Graaf et al., 1995) reporta que incrementos de temperatura favorecen más la acetilación pero partiendo de almidón gelatinizado de papa con vinilacetato como agente modificante. Esto se debe a la tendencia del AA a desdoblarse en HAc, cuando está en disolución acuosa y la acetilación con HAc, que es muy lenta, se favorece más con incrementos de temperatura que la acetilación con vinilacetato.

Los resultados cinéticos alcanzados para almidón nativo y gelatinizado muestran la relación entre las constantes de velocidad para la acetilación en condiciones acuosas y básicas moderadas a escala productiva, esta resulta entonces en:

$\frac{K_{1\text{ gelatinizado},60\text{ }^{\circ}\text{C}}}{K_{1\text{ nativo},40\text{ }^{\circ}\text{C}}} = \frac{0,0426}{1,26 \cdot 10^{-3}} = 33,8$. Lo que demostró que la velocidad de reacción de acetilación es 34 veces superior cuando se parte de material gelatinizado. es improcedente a escala industrial considerar la acetilación de almidón nativo de yuca. (Pérez et al., 2018a) Por lo tanto, es evidente que la acetilación precedida de gelatinización es más conveniente, que la acetilación directa.

2.3 Proyección de industrialización de la yuca

Las producciones obtenidas de la yuca, como el almidón, destinadas a consumo humano han llegado hasta el presente como alimentos energéticos de buena aceptación en la región

del Caribe, incluyendo a Cuba, que se ha ido imponiendo en mercados más exigentes. (ORTEGA and VELÁSQUEZ, 2000); (ALMONTE, 2009)

La potencialidad mayor de este tubérculo está en las posibilidades que ofrecen sus productos industrializados, fundamentalmente el almidón. En Cuba se han desarrollado clones de yuca con fines industriales de alto rendimiento en materia seca y almidón. Al frente de este sector investigativo se encuentra el Instituto Nacional de Investigaciones en Viandas Tropicales (INIVIT). (OCHOA et al., 2014)

En 2013, por solicitud del Grupo Empresarial para la Protección de la Flora y la Fauna, se creó un equipo de trabajo para el desarrollo de los procesos de industrialización de la yuca, denominado Programa Nacional de Flora y Fauna, el cual estuvo liderado por la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas y estuvo formado además por el (INIVIT) y la Empresa Nacional de Proyectos Agropecuarios (ENPA). (UCLV, 2014)

En Villa Clara está en fase de aprobación una inversión para la mecanización del cultivo para la producción de harina, en la unidad productiva “Copa”, perteneciente al municipio de Santo Domingo, con la intención de cosechar yuca con destinos industriales, aplicando tecnologías y procedimientos adecuados para tal fin. El proyecto prevé cultivar 150 ha, con variedades de alto potencial genético y un rendimiento promedio de 16 t/ha para una producción de alrededor de 2400 t de raíces al año para una disponibilidad diaria de 8 t de raíces durante 300 días al año (ENPA, 2013)

Por estas razones los análisis estratégicos para el desarrollo de los procesos de industrialización de la yuca se efectuaron considerando una disponibilidad base de yuca de 8 t/día en las condiciones del programa de Copa, en Santo Domingo, Villa Clara, a precios internacionales.

En la figura 2.5 y en la Tabla 2.1 se precisa la ubicación geográfica del proyecto, este se localiza al sureste de Villa Clara, en el Municipio Santo Domingo en un área nombrada Copa, que formará parte de la UEB La Piedra, perteneciente a la Empresa para la Protección de la Flora y la Fauna en Villa Clara. Se tendrá en cuenta el establecimiento de una planta para la producción de almidón acetilado.

Tabla 2.1 Datos del proyecto

Forma Productiva.	Ubicación del Área del Proyecto	Coordenadas del Área.	
		Norte	Este
Unidad Copa Empresa para la Protección de la Flora y la Fauna	Municipio Santo Domingo. Zona Copa.	311153.42 -314067.74	557678.40- 561386.37

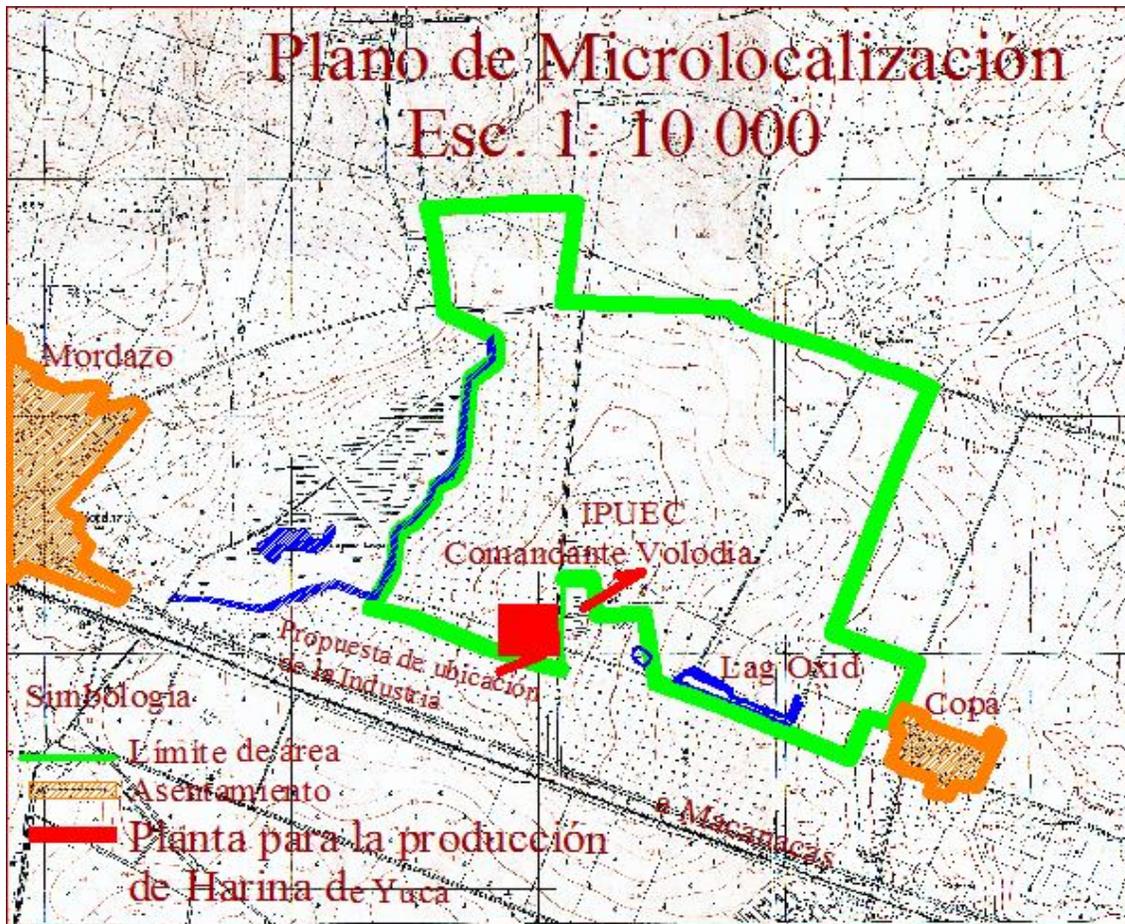


Figura 2.5 Plano de micro localización.

2.4 Balances de materiales y energía

Se desarrollaron los balances de masa para una disponibilidad de raíces frescas de 500 Kg/h, con base a 16 horas de trabajo diarias, durante 300 días al año, en dos turnos diarios. La simbología que a partir de este epígrafe se utiliza, se muestra en las leyendas.

2.3.1 Balance de materiales y energía para almidón acetilado

Los resultados de los balances de masa en la producción de almidón acetilado representados en la Tabla 2.2, revelan una producción de 120,91 Kg/h, lo que, con respecto a la disponibilidad de raíces a procesar, manifiesta un rendimiento de almidón de 30,23%.

Tabla 2.2 Balance de materiales y energía para almidón acetilado

Etapa	Datos	Ecuaciones	Resultados
Selección	$W_1=500 \text{ Kg/h}$ $x_{RD}=0,01 \text{ Kg}_{\text{raíces}}/\text{Kg}_{\text{raíces}}$	$W_2=(1-x_{RD})\cdot W_1$ $RD=x_{RD}\cdot W_3$	$W_2=495 \text{ kg/h}$ $RD=5 \text{ kg/h}$
Lavado	$FAL=1,2 \text{ L/Kg}_{\text{raíces}}$ $x_{DL}=0,01$ $\text{kg}_{\text{raíces}}/\text{kg}_{\text{raíces}}$	$AL=FAL\cdot W_1$ $W_3=(1-x_{DL})\cdot W_2$	$AL=600 \text{ Kg/h}$ $W_3=485,1 \text{ kg/h}$
Descascarado	$x_{\text{Cascarilla}}=0,06$ $\text{kg}_{\text{caso}}/\text{kg}_{\text{raíces}}$	$\text{Cascarilla}=x_{\text{Cascarilla}}\cdot W_2$ $W_4=(1-x_{\text{cascarilla}})\cdot W_3$	$\text{Casc}=29,1 \text{ kg/h}$ $W_4=455,94 \text{ kg/h}$
Rallado/ trituration	$x_{\text{RPT}}=0,01$ $\text{kg}_{\text{raíces}}/\text{kg}_{\text{raíces}}$ $FAR=0,9 \text{ L/kg}_{\text{raíces}}$	$W_5=[(1-x_{\text{RPT}})\cdot W_4+AR]$ $AR=FAR\cdot W_1$ $RSR=x_{\text{RPT}}\cdot W_4$	$W_5=811,43 \text{ kg/h}$ $AR=360 \text{ kg/h}$ $RSR=4,95 \text{ kg/h}$
Separación de la fibra (centrífuga tamizadora)	$FASF: 1 \text{ L/kg}_{\text{raíces}}$ $x_{\text{afrecho}}=0,12$ $\text{kg}_{\text{afrecho}}/\text{kg}_{\text{raíces}}$	$\text{Afrecho}=x_{\text{afrecho}}\cdot W_5$ $ASF=FASF\cdot W_5$ $W_6=W_5+ASF-\text{Afrecho}$	$\text{Afrecho}=60 \text{ kg/h}$ $ASF=649,15 \text{ kg/h}$ $W_6=1400,58 \text{ kg/h}$
Separación de arena (hidrociclón)	$x_{\text{arena}}=0,015$ $\text{kg}_{\text{arena}}/\text{kg}_{\text{lechada}}$	$\text{ASHC}=x_{\text{arena}}\cdot W_6$ $W_7=W_6-\text{ASHC}$	$\text{ASHC}=21,01 \text{ kg/h}$ $W_7=1379,57 \text{ kg/h}$
Purificación (centrífuga purificadora)	$FACP=0,45 \text{ L/kg}_{\text{lechada}}$ $x_{\text{SCT}}=0,07 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{lech}}$ $x_{\text{SCRCP}}=0,006 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{lech}}$ $x_{\text{SACP}}=0,0065 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{lech}}$	$ALP=FACP\cdot W_7$ $RCP=W_7+ALP-W_8$ $W_8=\frac{W_7\cdot x_{\text{SCT}}+RCP\cdot x_{\text{SRCP}}}{x_{\text{SCC}}}$	$ALP=620,80 \text{ kg/h}$ $RCP=471,21 \text{ kg/h}$ $W_8=1529,17 \text{ kg/h}$
Concentración (centrífuga concentradora)	$x_{\text{SRCC}}=0,003 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{lech}}$ $x_{\text{SCC}}=0,365 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{lech}}$	$RCC=W_8-W_9$ $W_9=\frac{W_8x_{\text{SCP}}+RCCx_{\text{SRCC}}}{x_{\text{SCC}}}$	$RCC=1016,94 \text{ kg/h}$ $W_9=512,24 \text{ kg/h}$
Acetilación	$m_{AA}=83,93 \text{ Kg/h}$ $m_{\text{dis(NaOH)}}=0,044 \text{ Kg/h}$		$W_{10}=522,88 \text{ Kg/h}$

Capítulo 2: Tecnologías para almidón acetilado. Balances de materiales y energía

<p>Deshidratación (filtro al vacío)</p>	<p>$x_{SF}=0,535 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{torta}}$ $x_{SRF}=0,01 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{residual}}$</p>	<p>$W_{11} = \frac{W_{10} \cdot x_{SCC} + RF \cdot x_{SF}}{x_{SF}}$ $RF=W_{10}-W_{11}$</p>	<p>$W_{11}= 199,05 \text{ kg/h}$ $RF=101,00 \text{ kg/h}$</p>
<p>Secado (secadero neumático)</p>	<p>$x_1= 0,465 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{pasta}}$ $x_2= 0,12 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{pasta}}$ $Y_1= 0,015 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{as}}$ $Y_2= 0,08 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{as}}$ $Y_{1m}= 0,03 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{as}}$ $C_{p\text{agua}}=4,18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ $C_{p\text{ss}}= 1,23 \text{ kJ/kg}_{\text{ss}} ^\circ\text{C}$ $C_{p\text{as}}= 1,005 \text{ kJ/kg}_{\text{as}} ^\circ\text{C}$ $t_1= 40^\circ\text{C}$ $t_2= 70^\circ\text{C}$ $T_{1\text{amb}}= 25^\circ\text{C}$ $T_{1m}= 44,5^\circ\text{C}$ $T_1= 170^\circ\text{C}$ $T_2= 90^\circ\text{C}$ $PC_{CN}= 44726 \text{ KJ/Kg}$</p>	<p>$MES=W_{11}+W_{13}$ $X_1 = \frac{x_1}{1-x_1}$ $X_2 = \frac{x_2}{1-x_2}$ $X_{1m} = \frac{W_5 x_1 + W_7 x_2}{MES}$ $x_{1m} = \frac{X_{1m}}{1+X_{1m}}$ $W_{12bs} = \frac{MES}{1+X_{1m}}$ $W_{12} = W_{12bs}(1+X_{1m})$ $R_{\text{Almidón}} = \frac{W_7}{W_6} \cdot 100$ $G_s = \frac{W_{12bs}(X_{1m} - X_2)}{(Y_2 - Y_{1m})}$ $G_1 = G_s(1+Y_{1m})$ $C_{pa} = 1,005 + 1,884(Y)$ $C_{ps} = 1,22 \cdot (1-X) + 4,18 \cdot X$ $t_{1m} = \frac{W_5 C_{ps} 25 + W_7 C_{ps} t_2}{MES}$ $Q_{\text{aire}} = G_1 C_{pMES}(T_1 - T_{1m})$ $Q_{\text{sól.}} = Q_{\text{evap}} + Q_{\text{cal}}$ $Ev = W_{12bs}(X_{1m} - X_2)$ $Q_{\text{evap}} = Ev[C_{p\text{agua}}(100 - t_2) + \lambda_{\text{agua}}]$ $Q_{\text{cal}}= Q_{\text{aire}} \cdot (1+\eta_{\text{cal}})$ $\eta_{\text{sec}} = [(Q_{\text{cal}} - Q_{\text{sól.}})/Q_{\text{cal}}] \cdot 100$ $G_{s \text{ recirc}} = \frac{G_s(Y_{1m} - Y_1)}{(Y_2 - Y_1)}$ $G_{s \text{ repos}} = G_s - G_{s \text{ recirc}}$ $\%R_{\text{aire}} = \frac{G_{s \text{ recirc}}}{G_s} \cdot 100$ $CN=Q_{\text{cal}} \cdot PC_{CN}$ $PE=X_{PE} \cdot W_{13}$ $W_{14}=(1-X_{PE}) \cdot W_9$ $R_{\text{toAlm}} = \frac{W_{14}}{W_1} \cdot 100$</p>	<p>$W_{13}=410 \text{ kg/h}$ $MES= 609,05 \text{ kg/h}$ $X_1= 0,87 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}$ $X_2= 0,14 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}$ $X_{1m}=0,3 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}$ $x_{1m}=0,23 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sh}}$ $W_{12bs} = 467,29 \text{ kg/h}$ $W_{12} = 531,03 \text{ kg/h}$ $R_{\text{Almidón}}= 67,31 \%$ $G_s= 1560,42 \text{ kg}_{\text{as}}/\text{h}$ $G_1= 1607,24 \text{ kg}_{\text{ah}}/\text{h}$ $C_{pMES}=1,05 \text{ kJ/kg}_{\text{ah}} ^\circ\text{C}$ $C_{p\text{asec}}=1,11 \text{ kJ/kg}_{\text{ah}} ^\circ\text{C}$ $C_{psMES}=1,9 \text{ kJ/kg}_{\text{sh}} ^\circ\text{C}$ $C_{psW_{11}}=1,57 \text{ kJ/kg}_{\text{sh}} ^\circ\text{C}$ $C_{psW_{10}}=2,80 \text{ kJ/kg}_{\text{sh}} ^\circ\text{C}$ $t_{1m}= 41,69^\circ\text{C}$ $Q_{\text{aire}}= 211267,17 \text{ kJ/h}$ $Q_{\text{cal}}=264083,96 \text{ kJ/h}$ $Q_{\text{sol}}= 210362,19 \text{ kJ/h}$ $Ev= 78,02 \text{ kg/h}$ $\eta_{\text{sec}}=79,65 \%$ $G_{s \text{ recirc}}= 468,12 \text{ kg/h}$ $G_{s \text{ reposic}}=1092,30 \text{ kg/h}$ $R_{\text{aire}} = 30 \%$ $CN= 4,43 \text{ kg/h}$ $R_{\text{toalmidón}}= 30,23 \%$</p>

Empaque/ almacenamiento		$W_{14} = W_{12} - W_{13}$	$W_{14} = 121,03 \text{ kg/h}$ $W_{15} = 120,91 \text{ Kg/h}$ $P = 0,12 \text{ kg/h}$
----------------------------	--	----------------------------	---

2.3.2 Balance de materiales y energía para almidón gelatinizado-acetilado

Los resultados de los balances de masa en la producción de almidón gelatinizado- acetilado representados en la Tabla 2.3, revelan una producción de 127,98 Kg/h, lo que, con respecto a la disponibilidad de raíces a procesar, revela un rendimiento de almidón de 31,99%.

Tabla 2.3 Balance de materiales y energía para almidón gelatinizado-acetilado

Etapa	Datos	Ecuaciones	Resultados
Selección	$W_1 = 500 \text{ Kg/h}$ $x_{RD} = 0,01 \text{ Kg}_{\text{raíces}}/\text{Kg}_{\text{raíces}}$	$W_2 = (1 - x_{RD}) \cdot W_1$ $RD = x_{RD} \cdot W_3$	$W_2 = 495 \text{ kg/h}$ $RD = 5 \text{ kg/h}$
Lavado	$FAL = 1,2 \text{ L/Kg}_{\text{raíces}}$ $x_{DL} = 0,01 \text{ kg}_{\text{raíces}}/\text{kg}_{\text{raíces}}$	$AL = FAL \cdot W_1$ $W_3 = (1 - x_{DL}) \cdot W_2$	$AL = 600 \text{ Kg/h}$ $W_3 = 485,1 \text{ kg/h}$
Descascarado	$x_{\text{Casarilla}} = 0,06 \text{ kg}_{\text{caso}}/\text{kg}_{\text{raíces}}$	$\text{Casarilla} = x_{\text{Casarilla}} \cdot W_2$ $W_4 = (1 - x_{\text{casarilla}}) \cdot W_3$	$\text{Casca} = 29,1 \text{ kg/h}$ $W_4 = 455,94 \text{ kg/h}$
Rallado/ trituration	$x_{\text{RPT}} = 0,01 \text{ kg}_{\text{raíces}}/\text{kg}_{\text{raíces}}$ $FAR = 0,9 \text{ L/kg}_{\text{raíces}}$	$W_5 = [(1 - x_{\text{RPT}}) \cdot W_4 + AR]$ $AR = FAR \cdot W_1$ $RSR = x_{\text{RPT}} \cdot W_4$	$W_5 = 901,43 \text{ kg/h}$ $AR = 450 \text{ kg/h}$ $RSR = 4,95 \text{ kg/h}$
Separación de la fibra (centrífuga tamizadora)	$FASF: 0,8 \text{ L/kg}_{\text{raíces}}$ $x_{\text{afrecho}} = 0,12 \text{ kg}_{\text{afrecho}}/\text{kg}_{\text{raíces}}$	$\text{Afrecho} = x_{\text{afrecho}} \cdot W_5$ $ASF = FASF \cdot W_5$ $W_6 = W_5 + ASF - \text{Afrecho}$	$\text{Afrecho} = 60 \text{ kg/h}$ $ASF = 721,15 \text{ kg/h}$ $W_6 = 1562,58 \text{ kg/h}$
Separación de arena (hidrociclón)	$x_{\text{arena}} = 0,015 \text{ kg}_{\text{arena}}/\text{kg}_{\text{lechada}}$	$ASH = x_{\text{arena}} \cdot W_6$ $W_7 = W_6 - ASHC$	$ASH = 23,43 \text{ kg/h}$ $W_7 = 1539,14 \text{ kg/h}$
Purificación (centrífuga purificadora)	$FACP = 0,45 \text{ L/kg}_{\text{lechada}}$ $x_{\text{SCT}} = 0,07 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{lech}}$ $x_{\text{SRCP}} = 0,001 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{lech}}$ $x_{\text{SCP}} = 0,0065 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{lech}}$	$ALP = FACP \cdot W_7$ $RCP = W_7 + ALP - W_8$ $W_8 = \frac{W_7 \cdot x_{\text{SCT}} + RCP \cdot x_{\text{SRCP}}}{x_{\text{SCC}}}$	$ALP = 692,61 \text{ kg/h}$ $RCP = 505,60 \text{ kg/h}$ $W_8 = 1726,16 \text{ kg/h}$
Concentración (centrífuga concentradora)	$x_{\text{SRCC}} = 0,001 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{lech}}$ $x_{\text{SCC}} = 0,10 \text{ kg}_{\text{sól}}/\text{kg}_{\text{lech}}$	$RCC = W_8 - W_9$ $W_9 = \frac{W_8 \cdot x_{\text{SCP}} + RCC \cdot x_{\text{SRCC}}}{x_{\text{SCC}}}$	$RCC = 554,75 \text{ kg/h}$ $W_9 = 1171,40 \text{ kg/h}$

<p>Gelatinización-acetilación</p>	<p> $C_{RO^-}^0 = 0,73 \text{ mol/L}$ $C_{AA}^0 = 0,14 \text{ mol/L}$ $X_{RO^-} = 0,00973$ $X_{Agua} = 0,9854$ $X_{AA} = 0,00003$ $X_{RAC} = 0,00243$ $X_{NaAc} = 0,00243$ $MM_{RO^-} = 162 \text{ g/mol}$ $MM_{RAC} = 210 \text{ g/mol}$ $MM_{NaAc} = 82 \text{ g/mol}$ $MM_{agua} = 18 \text{ g/mol}$ $MM_{AA} = 102,1 \text{ g/mol}$ $Cp_{W9} = 3,88 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ $T_{gel} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{W9} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\Delta H_{gel} = 15,5 \text{ kJ/kg}$ $\eta_{cal} = 60 \%$ $\rho_{W9} = 1,07 \text{ kg/L}$ $T_0 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\Delta H_f^0 \text{ glucosa} = -1271 \text{ kJ/mol}$ $\Delta H_f^0 \text{ Acetil glucosa} = -1216 \text{ kJ/mol}$ $\Delta H_f^0 \text{ AA} = -56,5 \text{ kJ/mol}$ $\Delta H_f^0 \text{ NaAc} = -607,7 \text{ kJ/mol}$ $Cp_{glucosa} = 0,22 \text{ kJ/mol } ^\circ\text{C}$ $Cp_{acetil glucosa} = 0,50 \text{ kJ/mol } ^\circ\text{C}$ $Cp_{AA} = 0,2 \text{ kJ/mol } ^\circ\text{C}$ $Cp_{NaAc} = 0,08 \text{ kJ/mol } ^\circ\text{C}$ $Cp_{AE} = 4,18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ $T_{m2} = 33 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{m0} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ </p>	<p> $C_{RAC} = GS \cdot C_{RO^-}^0$ $n_{RAC} = C_{RAC} \cdot W_7$ $n_{NaAc/HAc} = GS \cdot C_{RO^-}^0$ $n_{RO^-} = n_{RO^-}^0 - GS \cdot C_{RO^-}^0$ $W_{10} = n_{RAC} + n_{UAG} + n_{NaAc/HAc} + n_{inertes}$ $W_{10} = W_{10M} \cdot MM_{W10}$ $MM_{W_i} = \sum x_i MM_i$ $Q_{gel} = W_9 Cp_{W_9} (T_{gel} - T_{W_9}) + W_9 \Delta H_{gel}$ $Q_{cal} = Q_{gel} + (100 - \eta_{cal}) Q_{gel}$ $CN_{gel} = Q_{cal} / PC_{CN}$ $W_{9V} = \frac{W_9}{\rho_{W9}}$ $X_{conv-Ui} = \frac{(C_{RO^-}^0 - C_{RO^-})}{C_{RO^-}^0}$ $\Delta H_r = \Delta H_r^0 + \Delta H_R + \Delta H_P$ $\Delta H_r^0 = \sum n_P \Delta H_{fP}^0 - \sum n_R \Delta H_{fR}^0$ $\Delta H_R = \sum n_{Ri} Cp_{Ri} (T_0 - T_R)$ $\Delta H_{Pi} = \sum n_{Pi} Cp_{Pi} (T_P - T_0)$ $Q_{Ui} = W_{9V} \Delta H_r C_{RO^-} X_{conv-Ui}$ $AE_{Ui} = \frac{Q_{Ui}}{Cp_{AE} (T_{m2} - T_{m0})}$ $AE_{total} = \sum AE_{Ui}$ </p>	<p> $C_{RAC} = 0,14 \text{ mol/L}$ $n_{RAC} = 0,131 \text{ kmol/h}$ $n_{NaAc/HAc} = 0,131 \text{ kmol/h}$ $n_{RO^-} = 0,523 \text{ kmol/h}$ $W_{10M} = 53,12 \text{ kmol/h}$ $W_{10} = 1189,37 \text{ kg/h}$ $MM_{W10} = 19,83 \text{ kg/kmol}$ $Q_{gel} = 160481,09 \text{ kJ/h}$ $Q_{cal} = 224673,53 \text{ kJ/h}$ $CN_{gel} = 5,02 \text{ kg/h}$ $W_{9V} = 1050 \text{ L/h}$ $X_{conv-U1} = 7,66 \%$ $X_{conv-U2} = 9,84 \%$ $X_{conv-U3} = 3,63 \%$ $\Delta H_r^0 = -495,98 \text{ kJ/mol}$ $\Delta H_r = -490,37 \text{ kJ/mol}$ $\Delta H_R = -14,7 \text{ kJ/mol}$ $\Delta H_P = 20,03 \text{ kJ/mol}$ $Q_{U1} = 26065,0 \text{ kJ/h}$ $Q_{U2} = 30895,3 \text{ kJ/h}$ $Q_{U3} = 10298,5 \text{ kJ/h}$ $AE_{U1} = 779,45 \text{ kg/h}$ $AE_{U2} = 923,9 \text{ kg/h}$ $AE_{U3} = 307,96 \text{ kg/h}$ $AE_{total} = 2011,32 \text{ kg/h}$ </p>
<p>Secado (secadero spray dryers)</p>	<p> $x_1 = 0,895 \text{ kg}_{agua}/\text{kg}_{pasta}$ $x_2 = 0,12 \text{ kg}_{agua}/\text{kg}_{pasta}$ </p>	<p> $X_1 = \frac{x_1}{1 - x_1}$ $X_2 = \frac{x_2}{1 - x_2}$ </p>	<p> $X_1 = 8,66 \text{ kg}_{agua}/\text{kg}_{ss}$ $X_2 = 0,14 \text{ kg}_{agua}/\text{kg}_{ss}$ </p>

Capítulo 2: Tecnologías para almidón acetilado. Balances de materiales y energía

	$Y_1 = 0,015 \text{ kg agua/kg as}$ $Y_2 = 0,08 \text{ kg agua/kg as}$ $Y_{1m} = 0,03 \text{ kg agua/kg as}$ $C_{p\text{agua}} = 4,18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ $C_{p\text{ss}} = 1,23 \text{ kJ/kg ss } ^\circ\text{C}$ $C_{p\text{as}} = 1,063 \text{ kJ/kg as } ^\circ\text{C}$ $t_2 = 70 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_{1\text{amb}} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_1 = 170 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_2 = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\lambda_{\text{agua}} = 2250,99 \text{ kJ/kg}$ $PC_{\text{CN}} = 44726 \text{ kJ/kg}$ $\eta_{\text{cal}} = 0,75$	$W_{11\text{bs}} = \frac{W_{10}}{1 + X_1}$ $W_{11} = W_{11\text{bs}}(1 + X_1)$ $G_s = \frac{W_{11\text{bs}}(X_1 - X_2)}{(Y_2 - Y_{1m})}$ $G_1 = G_s(1 + Y_{1m})$ $C_{pa} = 1,005 + 1,884(Y)$ $C_{ps} = 1,22 \cdot (1 - X) + 4,18 \cdot X$ $t_{1m} = \frac{W_5 C_{ps} 25 + W_7 C_{ps} t_2}{\text{MES}}$ $Q_{\text{aire}} = G_1 C_{p\text{MES}}(T_1 - T_{1m})$ $Q_{\text{sól.}} = Q_{\text{evap}} + Q_{\text{cal}}$ $Ev = W_{12\text{bs}}(X_{1m} - X_2)$ $Q_{\text{evap}} = Ev[C_{p\text{agua}}(100 - t_2) + \lambda_{\text{agua}}]$ $Q_{\text{cal}} = Q_{\text{aire}} + (100 - \eta_{\text{cal}})Q_{\text{aire}}$ $\eta_{\text{sec}} = [(Q_{\text{cal}} - Q_{\text{sól.}})/Q_{\text{cal}}] \cdot 100$ $G_{s\text{ recirc}} = \frac{G_s(Y_{1m} - Y_1)}{(Y_2 - Y_1)}$ $G_{s\text{ repos}} = G_s - G_{s\text{ recirc}}$ $\%R_{\text{aire}} = \frac{G_{s\text{ recirc}}}{G_s} \cdot 100$ $CN = Q_{\text{cal}} \cdot PC_{\text{CN}}$ $R_{\text{toAlm}} = \frac{W_{12}}{W_1} \cdot 100$	$W_{11\text{bs}} = 123,15 \text{ kg/h}$ $W_{11} = 139,95 \text{ kg/h}$ $G_s = 20988,31 \text{ kg}_{\text{as}}/\text{h}$ $G_1 = 21617,96 \text{ kg}_{\text{ah}}/\text{h}$ $C_{p\text{MES}} = 1,06 \text{ kJ/kg}_{\text{ah}} \text{ } ^\circ\text{C}$ $C_{p\text{secadero}} = 1,1 \text{ kJ/kg}_{\text{ah}} \text{ } ^\circ\text{C}$ $C_{p\text{S}_{W10}} = 3,88 \text{ kJ/kg}_{\text{sh}} \text{ } ^\circ\text{C}$ $t_{1m} = 44,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ $Q_{\text{aire}} = 2\ 841\ 625,09 \text{ kJ/h}$ $Q_{\text{sól.}} = 2300817,41 \text{ kJ/h}$ $Ev = 1049,42 \text{ kg/h}$ Q_{ev} $Q_{\text{cal}} = 3552031,37 \text{ kJ/h}$ $\eta_{\text{sec}} = 71,61 \%$ $G_{s\text{ recirc}} = 6296,49 \text{ kg/h}$ $G_{s\text{ rep}} = 14691,81 \text{ kg/h}$ $R_{\text{Aire}} = 30 \%$ $CN_{\text{secado}} = 59,56 \text{ kg/h}$ $CN_{\text{total}} = 65,12 \text{ kg/h}$ $R_{\text{toalmidón}} = 31,99 \%$
Empaque/ almacenamiento	$X_{\text{PE}} = 0,001 \text{ kg}_{\text{almidón}}/\text{kg}_{\text{almidón}}$	$W_{12} = (1 - X_{\text{PE}}) \cdot W_{11}$ $PE = X_{\text{PE}} \cdot W_{11}$	$W_{12} = 127,98 \text{ kg/h}$ $PE = 0,13 \text{ kg/h}$

En los dos procesos los balances de masa se realizaron para la misma disponibilidad de raíces frescas, obteniéndose similares cantidad y rendimiento de producto; sin embargo, la etapa de secado del proceso de almidón gelatinizado- acetilado demanda altos requerimientos energéticos: gran consumo de crudo nacional, mientras que en la otra variante no es muy significativo este aspecto.

Conclusiones parciales:

1. La vía mecanizada para obtención de almidón nativo entrega un producto refinado de mayor calidad y aplicabilidad respecto a la vía tradicional, lo cual unido al incremento del rendimiento alcanzado por dicha vía permite seleccionar dicho proceso cuando se requiere obtener materiales de uso alimentario y altas eficiencias de extracción.
2. La etapa de modificación física en el proceso de obtención de almidón gelatinizado-acetilado confiere propiedades estructurales al producto que aumentan su rango de aplicaciones industriales, pero impide la aplicación de procesos físicos en la separación del material modificado por lo que se requiere la aplicación del secado en spray que es un método de mayores requerimientos inversionistas operacionales y energéticos que el secado neumático.
3. Los balances de masa ofrecen resultados que permiten concluir que la tecnología para obtener almidón acetilado presenta ventajas ante la variante de almidón gelatinizado-acetilado, en cuanto a los requerimientos energéticos, puesto que esta última demanda un alto consumo de crudo para la etapa de secado, mientras que en cuanto al rendimiento de almidón no presentan relevantes diferencias.

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica

3.1 Dimensionamiento, selección y diseño del equipamiento

Se utilizan diferentes métodos en el dimensionamiento, selección y diseño de los principales equipos para las operaciones de acetilación, gelatinización y secado de los procesos de obtención de almidón acetilado y gelatinizado- acetilado.

3.1.1 Diseño del Gelatinizador

El equipamiento para la gelatinización es un tanque enchaquetado agitado que opera de manera continua, con circulación de agua caliente proveniente de un intercambiador de calor tubular indirecto con combustión de CN.

Ecuaciones utilizadas:

El volumen:

$V_{gel} = \text{residencia} * W_9 / \text{densidad lechada}$

El diámetro se despeja $H = d$

Vol=

La potencia del agitador (ROSABAL and VALLE, 1998):

$$K_N = \frac{N}{\rho n^3 d^5}$$

El Reynolds de mezclado:

$$Re_m = \frac{nd^2 \rho}{\mu}$$

El coeficiente pelicular de transferencia de calor en recipientes enchaquetados agitados para el fluido interior (Kern, 1988):

$$h_i = J \frac{k}{D_j} \left(\frac{c\mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}$$

El coeficiente pelicular de transferencia de calor referido al diámetro exterior:

$$h_{i0} = h_i \frac{D_i}{D_o}$$

El coeficiente total de transferencia de calor limpio:

$$U_c = \frac{h_i h_{i0}}{h_i + h_o}$$

El coeficiente total de transferencia de calor sucio:

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_c} + R_d$$

Área de transferencia de calor para flujo en mezcla perfecta del agente de intercambio en la camisa (Viera, 2007):

$$A_{TC} = \frac{Q}{U_D(\Delta T)}$$

El % aprovechamiento del área disponible para la chaqueta;

$$\%_{aprov} = \frac{A_{TC}}{A_{Disp\ chaq}} \cdot 100$$

Tabla 3.1

Datos	Factores de diseño	Resultados
W tres n Kn cμ/k μ μ _w Dj J _i k Rd	V _{total}	2,97
	V _{cilindro}	2,67
	D	2,1
	D _i	1,5
	Rem	0,75
	N	4,71
	h _i	2794,6
	h _{io}	2788,9
	U _c	1395,9
	U _d	943,2
	A _{TC}	6,8
	H _{chaqueta}	1,44
	A _{disp chaqueta}	7,12
	%Aprov. chaqueta	96

3.1.2 Diseño de un reactor

El diseño de un reactor continuo con agitación y enchaquetado según (Levespiel, 1999), y (Fogler, 2001a), se realiza mediante la aplicación de la ecuación de diseño del RMP, considerando la expresión cinética determinada para la acetilación de almidón acetilado y gelatinizado acetilado de yuca, se determinaron las concentraciones de RO- y los requerimientos mínimos de AA que aparecen reflejados en la Tabla 3.2.

Se tuvieron en cuenta las siguientes ecuaciones:

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

$$\tau = \frac{VC_{A0}}{F_{A0}} = \frac{V}{v_0} = \frac{C_{A0}(X_{Af} - X_{Ai})}{(-r_{Af})}$$

$$-r_{Af} = K_1 C_A^\alpha C_B^\beta$$

$$V = \pi \frac{D^2}{4} H$$

Tabla 3.2 Cálculo del Reactor de acetilación

		Acetilación	Gelat- acet.
	Temp (C)	40	60
Constante cinética a 40 C (L/mol min)	K1	0,00126	0,042602122
Concentración inicial de RO- (Mol/L)	C ⁰ _{RO-}	1,357901302	0,660619258
Concentración inicial de AA (Mol/L)	C ⁰ _{AA}	0,185818073	0,136842105
Tiempo espacial (h)	tau	29,38	20,72
Concentración deseada de RO- (Mol/L)	C _{RO-}	0,13579013	0,132123852
Conversión en base a almidón activado	X _{af}	0,1	0,2
Conc. de RO- sin reaccionar (mol/L)	C _{RO-}	1,222111171	0,528495407
Velocidad de reacción Mol/Lmin	- r _A	7,7036E-05	0,000106232
Concentración de AA a X	CAA	0,050027943	0,004718254
Volumen del reactor (m3)	V	13,68043667	20,52366276
Flujo volumétrico de alim reactor m3/h	W7	0,47	0,99

3.1.3 Diseño de batería de tres RMP en serie para la producción de almidón acetilado

La batería de tres unidades de acetilación se ubica en serie para el almidón, con alimentación de AA en la primera unidad. Con ello, junto a la operación en medio ligeramente básico, se garantizan las mejores condiciones de distribución de producto y la mínima presencia de restos del agente en el producto final. Con la intención de evitar pérdidas por evaporación y presencia de olores acéticos en el área productiva las unidades se construyen cerradas, aunque trabajan a presión atmosférica.

Mediante la aplicación de la ecuación de diseño del reactor de mezcla perfecta en cada unidad, considerando la expresión cinética determinada para la acetilación de almidón acetilado y pregelatinizado acetilado de yuca. Con ello se efectuó también el diseño del equipamiento para la gelatinización y la acetilación

En el diseño de cada reactor continuo con agitación y enchaquetado según (Levespiel, 1999), y (Fogler, 2001a) las variables a calcular son:

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

El tiempo espacial definido entre las concentraciones de la etapa i y la i-1 para la velocidad de desaparición de A que a la concentración de salida de la etapa Ci a través de la ecuación de diseño de la batería se define como:

$$\tau_i = \frac{(C_i - C_{i-1})}{-r_{A_i}}$$

Utilizando la expresión de velocidad:

$$-r_{Af} = K_1 C_A^\alpha C_B^\beta$$

El volumen total de la batería se determinó mediante la sumatoria del volumen de cada unidad:

$$V_T = \sum V_i$$

El volumen de cada unidad se calculó:

$$V_i = \tau^*(C_{A0} * F_{A0})$$

Como criterio de diseño se consideró que H = D, por lo que, para el cálculo se despeja de la ecuación del volumen:

$$V = \pi \frac{D^2}{4} H$$

El Reynolds de mezclado:

$$Re_m = \frac{nd^2\rho}{\mu}$$

La potencia del agitador (ROSABAL and VALLE, 1998):

$$K_N = \frac{N}{\rho n^3 d^5}$$

El coeficiente pelicular de transferencia de calor en recipientes enchaquetados agitados para el fluido interior (Kern, 1988):

$$h_i = J \frac{k}{D_j} \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

El coeficiente pelicular de transferencia de calor referido al diámetro exterior:

$$h_{io} = h_i \frac{D_i}{D_o}$$

El coeficiente total de transferencia de calor limpio:

$$U_c = \frac{h_i h_{io}}{h_i + h_o}$$

El coeficiente total de transferencia de calor sucio:

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_c} + R_d$$

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

Área de transferencia de calor para flujo en mezcla perfecta del agente de intercambio en la camisa (Viera, 2007):

$$A_{TC} = \frac{Q}{U_D(\Delta T)}$$

Siendo la variación de temperatura:

$$\Delta T = T_m - T$$

El % aprovechamiento del área disponible para la chaqueta;

$$\%_{aprov} = \frac{A_{TC}}{A_{Disp\ chaq}} \cdot 100$$

A partir de los datos necesarios para las ecuaciones antes expuestas, los cuales aparecen en la Tabla 3.3, se llega a los resultados mostrados en la misma.

Tabla 3.3

Equipo	Datos	Resultados	
		Acetilado	Gelatinizado- Acetilado
Batería de rectores (Levespiel, 1999) (Fogler, 2001a)	C_{Ao}, μ_0 $K_1, C_{Ao}, \alpha, \beta$	$\tau_1= 7,46$ h $\tau_2= 6,28$ h $\tau_3= 4,53$ h $-r_{Af}=7,7E-05$ mol/Lmin	$\tau_1= 2,15$ h $\tau_2= 2,56$ h $\tau_3= 2,37$ h $-r_{Af}=1,06E-04$ mol/Lmin
	H/D	$V_1=3,47$ m ³ $V_2=2,93$ m ³ $V_3=2,11$ m ³	$V_1=2,13$ m ³ $V_2=2,53$ m ³ $V_3=2,34$ m ³
	d, n (determinada por escalado), ρ, μ	$Re_{m1}=276618,13$ $Re_{m2}=280417,27$ $Re_{m3}=282481,15$	$Re_{m1}=228415,08$ $Re_{m2}=260125,24$ $Re_{m3}=285079,71$
	K_N	$K_N=5$	$K_N=5$
	$\kappa, C, \mu, \mu_w, D_i, J$	$h_1=2453,43$ KJ/hm ² °C $h_2=2572,11$ KJ/hm ² °C $h_3=2822,42$ KJ/hm ² °C	$h_1=2886,26$ KJ/hm ² °C $h_2=2896,92$ KJ/hm ² °C $h_3=2722,16$ KJ/hm ² °C
	Do	$h_w=2448,79$ KJ/hm ² °C $h_w=2566,97$ KJ/hm ² °C $h_w=2816,13$ KJ/hm ² °C	$h_w=2879,85$ KJ/hm ² °C $h_w=2690,96$ KJ/hm ² °C $h_w=2716,31$ KJ/hm ² °C
		$U_c=1225,55$ KJ/hm ² °C $U_c=1284,77$ KJ/hm ² °C $U_c=1409,63$ KJ/hm ² °C	$U_c=1441,52$ KJ/hm ² °C $U_c=1346,89$ KJ/hm ² °C $U_c=1359,62$ KJ/hm ² °C
	Bo	$U_d=862,24$ KJ/hm ² °C $U_d=891,14$ KJ/hm ² °C $U_d=949,47$ KJ/hm ² °C	$U_d=963,83$ KJ/hm ² °C $U_d=920,59$ KJ/hm ² °C $U_d=926,52$ KJ/hm ² °C
	T, T_{m0}, T_{m2} $T_m=T_{m2}$	$\Delta T_{m0}=25$ °C $\Delta T_{m2}=33$ °C $A_{TC1}=0,78$ m ² $A_{TC2}=0,38$ m ² $A_{TC3}=0,18$ m ²	$\Delta T_{m0}=25$ °C $\Delta T_{m2}=33$ °C $A_{TC1}=1,00$ m ² $A_{TC2}=1,24$ m ² $A_{TC3}=0,41$ m ²
	$A_{Disp\ chaq}$	$\%A_p=9,89$ $\%A_p=5,51$ $\%A_p=3,21$	$\%A_p=17,57$ $\%A_p=19,41$ $\%A_p=8,77$

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

En el proceso de almidón acetilado, la diferencia de volumen entre el considerado en la batería y el correspondiente a un reactor es de 5 m³ lo cual es un comportamiento evidente dado el orden de la reacción (Levenspiel, 1999); (Fogler, 2001b) y demuestra la selección adecuada de tecnología para esta etapa.

En el proceso de almidón gelatinizado- acetilado, la diferencia de volumen entre el considerado en la batería y el correspondiente a un reactor es de 13,5 m³ lo cual es un comportamiento evidente dado el orden de la reacción (Levenspiel, 1999); (Fogler, 2001b) y demuestra la selección adecuada de tecnología para esta etapa.

3.1.4 Diseño del secadero neumático

Para el diseño del secadero neumático según (Perry, 1984) las variables a calcular son:

El coeficiente volumétrico de transferencia de calor:

$$U_a = \left(\frac{0,5 G_{1sup}^{0,67}}{D} \right) : \frac{J}{sm^3K}$$

Para llegar al coeficiente volumétrico se calcula:

El diámetro del secadero mediante la ecuación:

$$D_{secadero} = \sqrt{\frac{4G_1}{\pi v_{gas}}}$$

El flujo másico relativo entre el gas y el sólido a través de la ecuación:

$$G_1 = (v_{gas} - v_{sólido}) \cdot \rho_{gas}$$

Para hallar la velocidad del sólido se utiliza la ecuación:

$$v_{sólido} = 0,8 \cdot v_{gas}$$

La fuerza impulsora:

$$(\Delta T)_m = \frac{(T_{G1} - T_{W1}) - (T_{G2} - T_{W2})}{\ln \left(\frac{T_{G1} - T_{W1}}{T_{G2} - T_{W2}} \right)}$$

El flujo de aire en base inerte requerido para el secado:

$$G_s = \frac{Ls (X_{1m} - X_2)}{(Y_2 - Y_{1m})}$$

El calor total transferido en el secadero:

$$Q_t = G_s C_{pas} (T_1 - T_2)$$

El volumen del secadero:

$$V = \frac{Q_t}{U_a (\Delta T)_m}$$

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

La longitud de la sección de secado:

$$L_{\text{secadero}} = \frac{V}{\eta D^2}$$

La caída de presión en el transporte neumático (McCabe et al., 1998):

$$\Delta P_n = \frac{\left(\frac{g}{g_c}\right)(1+r)(\Delta Z) + \frac{r(v_{sb}^2 - v_{sa}^2)}{2g_c} + h_f}{\frac{1}{\rho_{\text{media}}} + \frac{1}{\rho_s}}$$

Las pérdidas por fricción:

$$h_f = \left(\frac{fL}{D} + \sum K\right) \frac{v^2}{2g}$$

La presión de succión soplador de aire:

$$P_{\text{succión}} = P_{\text{descarga}} + \Delta P_n$$

El consumo de potencia del soplador (ROSABAL and VALLE, 1998):

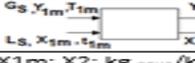
$$N_{\text{sopl}} = \frac{\left(\frac{\Delta P_n}{\rho_{\text{media}}}\right) G_{\text{media}}}{\eta}$$

Para llegar a calcular el consumo de potencia del soplador es necesario determinar el flujo de aire medio de entrada al secadero:

$$G_{\text{media}} = \frac{G_1 + G_2}{2}$$

Los datos necesarios para las ecuaciones antes expuestas y los resultados aparecen en la Tabla 3.4

Tabla 3.4

Equipos	Datos	Resultados
Secadero neumático (Perry, 1984)	$v_{\text{gas}} = 25 \text{ m/s}$; $\rho_{\text{gas}} : \text{kg/m}^3$ $G_{\text{sup}} : \text{kg/s m}^2$	$v_{\text{sólido}} = 20 \text{ m/s}$ $G_s = 5 \text{ Kg/sm}^2$ $Ua = 2562,43 \text{ J/sm}^2\text{K}$ $D_{\text{sec.}} = 0,151 \text{ m}$
		$\Delta T_m = 83,73$
	$X1m, X2 : \text{kg agua/kg s.s.}$ $Y1m, Y2 : \text{kg agua/kg a.s.}$ $G_s : \text{K}$ kg a. s./h $L_s : \text{kg s. s./h}$	$G_s = 0,43 \text{ Kg/s}$
	$Cp_{\text{as}} : \text{kJ/kg a.s. } ^\circ\text{C}$	$Q_t = 36851,53 \text{ J/s}$
		$V = 0,17 \text{ m}^3$
		$L_{\text{sec}} = 2,4 \text{ m}$
	$\Delta Z = L_{\text{secadero}} : \text{m}$ $r : \text{kg sol/kg aire}$ $\sum K, f$ $g_c : \text{m/s}^2$ $\rho_{\text{media}} : \text{kg/m}^3$ $\rho_s : \text{kg/m}^3$ $D : \text{m}$ $L : L_{\text{secadero}} + L_{\text{ciclón}}$ $g/g_c = 1$	$\Delta P_n = 152,53 \text{ Kg/m}^2$
	$P_{\text{descarga}} = 101325 \text{ Pa}$	$h_f = 612,53 \text{ Pa}$
	η	$P_{\text{succión}} = 101487,53 \text{ Pa}$
		$N_{\text{sopl}} = 0,291 \text{ KW}$ $G_{\text{media}} = 0,43 \text{ Kg/s}$

3.1.5 Diseño de un secadero spray dryers

Para el diseño del secadero spray dryers según (Masters, 1985), y (Ángeles, 2009) las variables a calcular son:

El diámetro Sauter de la cámara de secado:

$$D_{VS} = \frac{14000L_1^{0,24}}{[(nh)^{0,12}(ND_r)^{0,6}]}$$

El diámetro de la cámara de secado:

$$D_{95} = 1,4 D_{VS}$$

El diámetro de la gota en el punto crítico:

$$D_C = D_{95} \left[\frac{\rho_s}{\rho_{SS}} \frac{1 + X_2}{1 + X_1} \right]^{1/3}$$

La cantidad de agua removida en el punto crítico:

$$a_r = \frac{\pi}{6} (D_{95}^3 - D_C^3) \rho_w$$

El agua remanente en el punto crítico:

$$a_p = \frac{\pi D_{95}^3}{6} x_1 \rho_s - a_r$$

La humedad crítica:

$$X_c = \frac{a_p}{\left(\frac{\pi D_{95}^3}{6} \right) C_{alim}}$$

El tiempo de secado a velocidad relativa entre la gota y el aire despreciable:

$$t_T = t_c + t_d$$

La temperatura crítica del sólido:

$$T_{SC} = T_{bh} a Y_C$$

La humedad absoluta del aire en el punto crítico:

$$Y_C = Y_1 + \frac{L_S(X_1 - X_C)}{G_S}$$

La temperatura del aire en el punto crítico:

$$T_{ac} = \frac{H_{ac} - \lambda_0 Y_C}{C_{p_a} + C_V Y_C} + T_0$$

La entalpía del aire en el punto crítico:

$$H_{ac} = \frac{L_S(h_{s1} - h_{sc})}{G_S} + H_{a1}$$

La entalpía del aire entrada del secadero (Treybal, 1985):

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

$$H_{a1} = Cp_{a1}(T_{a1} - T_0) + Y_1\lambda_0$$

La entalpía del sólido en el punto crítico:

$$h_{sc} = Cp_{ss}(T_{sc} - T_0) + X_c Cp_w(T_{sc} - T_0)$$

La entalpía del sólido en la entrada:

$$h_{s1} = Cp_{ss}(T_{s1} - T_0) + X_1 Cp_w(T_{s1} - T_0)$$

El tiempo de secado en el período de velocidad constante:

$$t_c = \frac{\lambda_{bhc}\rho_w}{8\Delta T_c K_{dl}} (D_{95}^2 - D_c^2)$$

La fuerza impulsora en el período de velocidad constante:

$$\Delta T_c = \frac{(T_{a1} - T_{s1}) - (T_{ac} - T_{sc})}{Ln\left(\frac{T_{a1} - T_{s1}}{T_{ac} - T_{sc}}\right)}$$

El tiempo de secado en el período de velocidad decreciente:

$$t_d = \frac{\lambda_{bh}\rho_{ss}D_c^2}{12\Delta T_d K_{dl}} (X_c - X_2)$$

La fuerza impulsora en el período de velocidad decreciente:

$$\Delta T_d = \frac{(T_{ac} - T_{sc}) - (T_{a2} - T_{s2})}{Ln\left(\frac{T_{ac} - T_{sc}}{T_{a2} - T_{s2}}\right)}$$

La velocidad radial de las gotas atomizadas:

$$V_{r0} = \left(\frac{\rho_s Q_v^2 (2\pi N)^2 \frac{D_r}{2}}{3\mu_s h_p^2} \right)^{1/3}$$

El flujo volumétrico de alimentación por paleta:

$$Q_v = \frac{L_1}{\rho_s n}$$

La velocidad tangencial de las gotas:

$$V_{t0} = \pi D_r N$$

La velocidad resultante de la gota atomizada:

$$V_{res} = \sqrt{V_{r0}^2 + V_{t0}^2}$$

El radio de la cámara de secado:

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

$$R_C = (1 + \varphi) \left\{ \left[2,4 t_T \cdot V_{res} \left(b \frac{D_r}{2} \right)^{1/2} \right]^{1/2} + \frac{D_r}{4} \right\}$$

El ancho del chorro de aire anular atomizado imaginario a la composición de la salida y velocidad y momento de la alimentación (Gluckert, 1996):

$$b = \frac{L_1}{\rho_{a2} 2 \pi \frac{D_r}{2} V_{res}}$$

La densidad del aire a la salida del secadero:

$$\rho_{a2} = \frac{1 + Y_2}{v_{h2}}$$

El volumen húmedo del aire a la salida del secadero (Treybal, 1985):

$$v_{h2} = (0,0252 + 0,0405Y_2)(T_{a2} + 460)$$

La relación altura /diámetro (Alamilla et al., 2005):

$$\frac{H_{cámara}}{D_{cámara}}: 1,2 - 3,2$$

Las dimensiones de la cámara de secado:

$$H_{cámara} = 2,3 \cdot D_{cámara}$$

$$H_{cono} = \left(R_{cámara} - \frac{D_{cono}}{2} \right) \tan(\alpha_{cono})$$

$$H_{cono\ total} = (R_{cámara}) \tan(\alpha_{cono})$$

$$D_{cono} = \frac{H_{cámara}}{10}$$

$$V_{total} = V_{cilindro} + V_{cono\ total} - V_{cono\ ficticio}$$

$$V_{cilindro} = \pi R_{cámara}^2 H_{cilindro}$$

$$V_{cono\ total} = \frac{1}{3} \pi R_{cámara}^2 H_{cono\ total}$$

$$V_{cono\ ficticio} = \frac{\pi D_{cono}^2}{3 \cdot 4} (H_{cono\ total} - H_{cono})$$

Los datos requeridos por las ecuaciones antes expuestas y los resultados obtenidos aparecen en la Tabla 3.5

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

Tabla 3.5

Equipos	Datos	Resultados
Secadero spray dryers (Masters, 1985), (Ángeles, 2009)	Dr: Diámetro del atomizador (m) N: velocidad angular de atomización (min^{-1}) μ s: Viscosidad de la alimentación (Pas) L_1 : Flujo másico alimentado (kg/h) h: Altura de la paleta(m) n: Número de paletas	Dvs=441,82 μ m
		D ₉₅ =618,55 μ m
	ρ_s : Densidad alimentación (kg/m^3) ρ_{ss} : Densidad sólido seco (kg/m^3) X_1 : Humedad alimentación $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{ss}$ X_2 : Humedad salida $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{ss}$	Dc=301,41 μ m
	ρ_w : Densidad del agua (kg/m^3)	$a_r= 1,1\text{E}-07$ Kg/s
	x_1 : Humedad alimentación $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{sh}$	$a_p=1,0\text{E}-08$ Kg/s
	C_{alim} : Concentración de sólidos secos en la alimentación ($\text{kg}_{ss}/\text{m}^3_{alim}$)	$X_c=0,74\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{Kg}_{ss}$
	t_c : tiempo del período de velocidad constante t_d : tiempo del período de velocidad decreciente	$t_T=0,98$ s
	T_{bh} a Y_c : Temperatura de bulbo húmedo del aire en el punto crítico (a Y_c y T_{ac}) ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{SC} = 49^{\circ}\text{C}$
	Ls: Flujo másico sólidos base inerte (kg_{ss}/s) Gs: Flujo másico aire base inerte (kg_{as}/s) X_1 : Humedad sólido a la entrada ($\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{ss}$) Y_1 : Humedad absoluta aire entrada secadero ($\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{as}$)	$Y_c=0,076$ $\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{Kg}_{ss}$

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

Equipos	Datos	Resultados
Secadero spray dryers (Masters, 1985), (Ángeles, 2009)	Cv: Capacidad calorífica del vapor de agua (J/kg°C) Cp _a : Capacidad calorífica del aire seco (J/kg _{as} °C) λ ₀ : Calor latente de vaporización del agua a la temperatura de referencia (J/kg) T ₀ : temperatura de referencia (°C)	T _{ac} = 88,19°C
		H _{ac} =267478,18J/Kg
	Cp _{a1} : Capacidad calorífica del aire a la humedad de entrada al secadero (J/Kg °C) T _{a1} : temperatura de bulbo seco del aire entrada secadero (°C)	H _{a1} =256929,9J/Kg _{as}
		h _{sc} =443409,95J/Kg _{ss}
	Cp _{s1} : Capacidad calorífica del sólido entrada (J/kg °C) Cp _w : Capacidad calorífica del agua (J/kg°C)	hs1=22197113,54J/Kg _{ss}
	λ _{bhc} : Calor latente de vaporización a la temperatura de bulbo húmedo del punto crítico (kJ/kg) K _{dl} : Conductividad térmica de la película de aire que rodea la gota (W/m K)	t _c =0,63 s
	T _{s1} : temperatura sólido entrada (°C)	ΔT _c =46,79°C
		t _d =0,34 s
	T _{a2} : Temperatura de bulbo seco del aire salida (°C) T _{s2} : temperatura sólido salida (°C)	ΔT _d =11,98°C

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

Equipos	Datos	Resultados
Secadero spray dryers (Masters, 1985), (Ángeles, 2009)	ρ_s : densidad de la alimentación (lb/pie ³) μ_s : viscosidad de la alimentación (Cp) Qv: Flujo volumétrico de alimentación por paleta (Pie ³ /s) Dr: Diámetro del atomizador (pie) Hp: Altura de la paleta (pie) N: Velocidad giro atomizador (s ⁻¹)	$V_{r0}=0,025\text{m/s}$
		$Q_v=1,16\text{E}-0,5$
		$V_{t0}=314,16\text{m/s}$
		$V_{res}=314,16\text{m/s}$
	ϕ : factor de aprovechamiento del volumen de la cámara	$R_c=0,79\text{m}$
	ρ_{a2} : Densidad del aire en condiciones de salida (kg/m ³)	$b=0,00099\text{m}$
		$\rho_{a2} = 1,019\text{Kg/m}^3$
	T_{a2} : temperatura de salida del aire (°F)	$V_{h2}=15,36$
		$H/D=2,3$
	$R_{cámara}$ $H_{cilindro}$	$H_{cámara}=3,63\text{ m}$ $H_{cono}=1,05\text{ m}$ $H_{cono\ total}=1,37\text{ m}$ $D_{cono}=0,36\text{ m}$ $V_{total}=5,55\text{ m}^3$ $V_{cilindro}=5,06\text{ m}^3$ $V_{cono\ total}=0,89\text{ m}^3$ $V_{cono\ ficticio}=0,21\text{m}^3$

3.2 Estimado de la inversión, costos e ingresos

En este epígrafe, se presenta una valoración económica de las propuestas tecnológicas, donde se evaluaron los costos de inversión y producción.

Una definición amplia y moderna del balance económico lo representa la diferencia que se presenta entre los ingresos y egresos producidos en una operación comercial o productiva, lo cual determina su rentabilidad. Para ello se pueden emplear indicadores estáticos y dinámicos. El balance económico para un proyecto en su expresión elemental, permite conocer el beneficio como diferencia entre el precio del producto o valor de producción

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

anual (VP) y el costo total de producción (CTP). Esta diferencia determina la ganancia. (Castillo, 2005)

La ganancia representa la eficiencia de la actividad productiva. Es un indicador Estático, pues para su estimación no se considera el cambio de valor del dinero en el tiempo. No obstante, es un indicador muy importante, pues cuando la $G < 0$, existen pérdidas en el proceso (Cervantes, 2010)

3.2.1 Estimado de la inversión, costos e ingresos para almidón acetilado

Para determinar los costos totales de inversión es necesario calcular el costo del equipamiento a utilizar. Para actualizar el costo se tiene en cuenta los índices de costo y el costo original, este se determina teniendo en cuenta las capacidades de los equipos en cuestión, según las ecuaciones siguientes (Peters, 1991)

El índice de costo actual es tomado de (Engineering, 2018)

Costo actualizado = Costo original $\cdot (I_a/I_o)$,

Costo original= Costo de referencia $\cdot(\text{Capacidad}_i/\text{Capacidad referencia})$

Tabla 3.6 Costo del equipamiento

Equipo	Valores estimados
Tolva receptora	\$ 2.988,04
Transportadores de bandas	\$ 13.870,61
Lavador-descascarador	\$ 12.619,90
Trituradores	\$ 17.991,89
Centrifugas separadoras de fibra e hidrociclón	\$ 32.560,08
Tanque pulmón y centrífuga purificadora	\$ 18.150,00
Centrifuga concentradora	\$ 14.850,00
Batería de Reactores	49.006,86
Filtro rotatorio al vacío	\$ 18.587,40
Secador neumático	\$ 42.435,81
Digestor anaeróbico	\$ 6.068,36
Empacado	\$ 3.483,18
Costo total equipamiento	\$ 171.588,91

Se procede al cálculo del costo total de inversión, integrado por los parámetros necesarios en dependencia del costo del equipamiento tecnológico, que permitirán conocer el desembolso necesario para llevar a cabo el proyecto.

Costo de la planta=CD+CI

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

Capital Fijo Directo=CP+ Contratistas+ Contingencias

Costos Totales de Inversión=CFD+CT

Tabla 3.7 Costo total de inversión

	Índice (%)	Costo \$
Equipamiento tecnológico	121236,01	121.236,01
Instalación	35,00	42.432,60
Tuberías	10,00	12.123,60
Instrumentación	6,00	7.274,16
Aislamiento	0,50	606,18
Equipamiento eléctrico	8,00	9.698,88
Edificaciones	15,00	18.185,40
Mejoramiento del terreno	6,00	7.274,16
Equipamiento auxiliar	35,00	42.432,60
Terreno	4,00	4.849,44
Arrancada	0,50	606,18
Costos Directos		
Ingeniería	5,00	6.061,80
Construcción	7,00	8.486,52
Costos Indirectos		
Contratista	10,00	12.123,60
Contingencias	5,00	6.061,80
Capital de trabajo	20,00	24.247,20
Costo total de planta		281.267,54
Capital fijo directo		299.452,94
Costo total de Inversión		323.701,14

Siguiendo el cálculo de los costos, se determinan los consumos de materias primas, el precio y así su costo:

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

Tabla 3.8 Consumo y costos de materias primas.

Materia prima	Consumo(kg/día)	Precio (\$/kg)	Costo (\$/a)
Yuca	8000,00	0,07	168000,00
Anhídrido acético	176,71	0,80	42410,30
Hidróxido de sodio	0,026	0,61	4,79
Ácido clorhídrico	0,003355	0,50	0,50
Total			210415,60

El costo total de producción se determinó a partir de la Tabla 27 de (Peters, 1991)

Costos de Fabricación=CD+CF+CE

CTP = CF + GG

Los parámetros para estimar los costos totales de producción se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Costos totales de producción.

	Índice %	Costo (\$/año)
Costos Directos		524336,31
Materia prima	0,3	205.632,17
Mano de obra (MO)	0,2	30.277,77
Supervisión	0,15	4.541,66
Requerimientos	0,1	95.908,65
Agua		339,30
Electricidad		81.351,51
Energía crudo nacional		11.305,02
Tratamiento de agua residual		2.912,81
Mantenimiento y reparaciones	0,02	6.055,55
Suministros	0,05	15.138,88
Análisis de laboratorio	0,1	30.277,77
Patentes	0,02	3.027,78
Costos Fijos (CF)		39.966,65
Depreciación	0,1	30.277,77
Impuestos locales	0,03	7.569,44
Seguros	0,01	2.119,44
Costos Externos		2.043,75
Costos externos	0,05	2.043,75
Gastos Generales		23.274,37
Costos administrativos	0,15	6.131,25
Costos de distribución y ventas	0,02	3.027,78
Costos de investigación y desarrollo	0,05	7.569,44
Intereses financieros	0,02	6.545,90
Costos de fabricación		565.885,40
Costo total de Producción (\$)		510.043,24

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

Al definir los CTP se determinaron los Indicadores Dinámicos de Rentabilidad para chequear la factibilidad.

Los indicadores dinámicos para el análisis de inversiones son los siguientes:

- Valor actual neto (VAN).
- Tasa interna de rendimiento (TIR).
- Período de recuperación al descontado (PRD).

Estos métodos se complementan y no son excluyentes entre sí, de ahí la conveniencia que en la práctica no se aplique uno solo de ellos sino varios de manera conjunta. El valor actual neto o valor capital de una inversión es el valor actualizado de todos los flujos de caja esperados; las ventajas de este indicador son: considera el valor del dinero en el tiempo, expresa de forma absoluta los rendimientos del proyecto y tiene carácter aditivo. La tasa de rendimiento interna es el tipo de descuento que hace equivalente los valores actuales de los flujos netos y del costo de inversión, ofrece la oportunidad de conocer el rendimiento en términos relativos (%) o la riqueza máxima prometida que puede brindar el proyecto de inversión. El criterio del PRD expresa el momento exacto en que se recupera la inversión, es efectivo pues considera el valor del dinero en el tiempo. El mejor proyecto es el que tenga un menor valor de (PRD) período de recuperación al descontado. (Castillo, 2005)

Los resultados muestran que es factible la propuesta, ya que los valores los I.

Tabla 3.10 Indicadores Dinámicos de Rentabilidad

VAN	\$727.031,63
TIR	34%
P.R.D(años)	2,2

La siguiente curva muestra la trayectoria de los flujos de efectivo del proyecto, demostrando que el tiempo de recuperación de la inversión es de 2,4 años, considerando diez años de explotación de la planta.

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

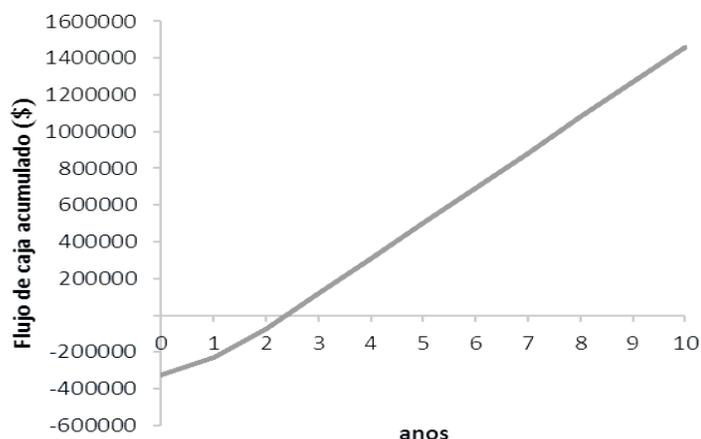


Figura 3.2 Perfil del VAN

3.2.2 Estimado de la inversión, costos e ingresos para almidón gelatinizado-acetilado

Para determinar los costos totales de inversión es necesario calcular el costo del equipamiento a utilizar. Para actualizar el costo se tiene en cuenta los índices de costo y el costo original, este se determina teniendo en cuenta las capacidades de los equipos en cuestión, según las ecuaciones: (Peters, 1991)

El índice de costo actual es tomado de (Engineering, 2018)

Costo actualizado = Costo original $\cdot (I_a/I_o)$,

Costo original= Costo de referencia $\cdot (Capacidad_i/Capacidad\ referencia)$

Tabla 3.11 Costo del equipamiento.

Equipo	Valores estimados
Tolva receptora	\$ 2.988,04
Transportadores de bandas	\$ 13.870,61
Lavador-descascarador	\$ 12.619,90
Trituradores	\$ 17.991,89
Centrifugas separadoras de fibra e hidrociclón	\$ 31.981,15
Tanque pulmón y centrifuga purificadora	\$ 18.150,00
Centrifuga concentradora	\$ 14.850,00
Gelatinizador	\$ 15 382,08
Batería de Reactores	\$ 41.224,08
Filtro rotatorio al vacío	\$ 18.587,40
Secador spray dryers	\$ 47.999,82
Digestor anaeróbico	\$ 2.903,40
Empacado	\$ 3.327,42
Costo total equipamiento	\$ 223.288,37

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

Se procede al cálculo del costo total de inversión, integrado por los parámetros necesarios en dependencia del costo del equipamiento tecnológico, que permitirán conocer el desembolso necesario para llevar a cabo el proyecto.

Costo de la planta=CD+CI

Capital Fijo Directo=CP+ Contratistas+ Contingencias

Costos Totales de Inversión=CFD+CT

Tabla 3.12 Costo total de Inversión.

	Índice (%)	Costo \$
Equipamiento tecnológico	223288,37	223.288,37
Instalación	35,00	78.150,93
Tuberías	10,00	22.328,84
Instrumentación	6,00	13.397,30
Aislamiento	0,50	1.116,44
Equipamiento eléctrico	8,00	17.863,07
Edificaciones	15,00	33.493,26
Mejoramiento del terreno	6,00	13.397,30
Equipamiento auxiliar	35,00	78.150,93
Terreno	4,00	8.931,53
Arrancada	0,50	1.116,44
Ingeniería	5,00	11.164,42
Construcción	7,00	15.630,19
Contratista	10,00	22.328,84
Contingencias	5,00	11.164,42
Capital de trabajo	20,00	44.657,67
Costos de la planta		518.029,02
Capital Fijo Directo		551.522,28
Costos Totales de Inversión		596.180,95

Siguiendo el cálculo de los costos, se determinan los consumos de materias primas, el precio y así su costo:

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

Tabla 3.13 Consumo y costos de materias primas.

Materia prima	Consumo(kg/día)	Precio (\$/kg)	Costo (\$/a)
Yuca	8000,00	0,07	168000,00
Anhídrido acético	276,69	0,80	66405,45
Hidróxido de sodio	0,054	0,61	9,93
Ácido clorhídrico	0,007	0,50	1,09
Total			234416,47

El costo total de producción se determinó a partir de la Tabla 27 de (Peters, 1991)

Costos de Fabricación=CD+CF+CE

CTP = CF + GG

Parámetros para estimar los Costos Totales de Producción.

Tabla 3.14 Costo Total de Producción

	Índice %	Costo (%/año)
Costos Directos		1.008.915,67
Materia prima	0,3	\$ 234.416,47
Mano de obra (MO)	0,2	\$ 55.152,23
Supervisión	0,15	\$ 8.272,83
Requerimientos	0,1	\$ 305.900,06
Agua		\$ 380,99
Electricidad		\$ 134.154,66
Energía crudo nacional		\$ 169.622,38
Tratamiento de agua residual		\$ 1.742,04
Mantenimiento y reparaciones	0,02	\$ 11.030,45
Suministros	0,05	\$ 27.576,11
Análisis de laboratorio	0,1	\$ 55.152,23
Patentes	0,02	\$ 5.515,22
Costos Fijos (CF)		\$ 72.800,94
Depreciación	0,1	\$ 55.152,23
Impuestos locales	0,03	\$ 13.788,06
Seguros	0,01	\$ 3.860,66
Costos Externos		\$ 3.722,78
Costos externos	0,05	\$ 3.722,78
Gastos Generales		\$ 42.395,22
Costos administrativos	0,15	\$ 11.168,33
Costos de distribución y ventas	0,02	\$ 5.515,22
Costos de investigación y desarrollo	0,05	\$ 13.788,06
Intereses financieros	0,02	\$ 11.923,62
Costos de Fabricación		1.008.915,67
Costo total de Producción (\$)		\$ 1.051.310,90

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

Al definir los CTP se determinaron los Indicadores Dinámicos de Rentabilidad para chequear la factibilidad.

Tabla 3.15

VAN	\$577.033,53
TIR	11%
P.R.D(años)	6

La siguiente curva muestra la trayectoria de los flujos de efectivo del proyecto, demostrando que el tiempo de recuperación de la inversión es de 6 años, considerando diez años de explotación de la planta.

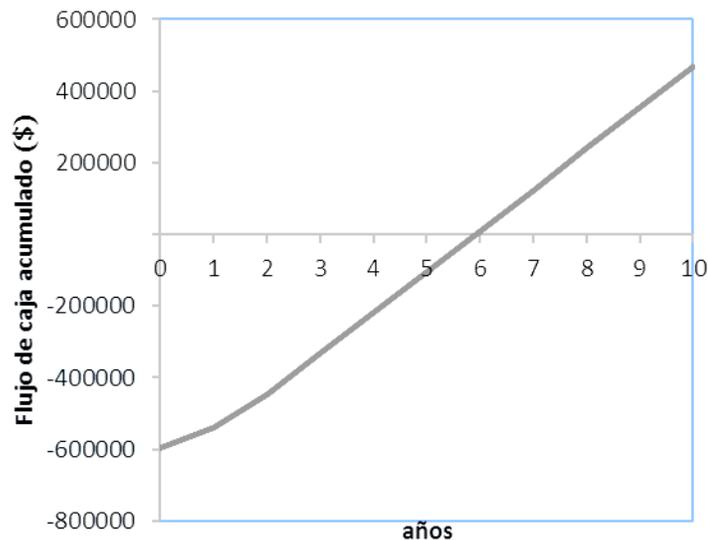


Figura 3.2 perfil del VAN

Atendiendo a los resultados de la evaluación técnico económica realizada, la producción de almidón gelatinizado acetilado no alcanza resultados adecuados de rentabilidad lo cual, como se vio anteriormente es debido a que en las condiciones de este proyecto el secado de la suspensión de almidón gelatinizado con humedad inicial del 10 % pp es exigente en requerimientos tecnológicos y energéticos. Una vía efectiva para mejorar estos resultados es el incremento de la capacidad d estas instalaciones de tal forma que sea técnica y económicamente posible la inclusión de generadores de vapor y por consiguiente de evaporadores a múltiple efecto en el esquema tecnológico. Ello facilitaría la remoción de

Capítulo 3: Dimensionamiento y adaptación de tecnologías para obtención de almidón acetilado. Evaluación técnico- económica.

parte del agua previa al secado aprovechando la energía producida en los primeros vasos del sistema de evaporación favoreciendo la eficiencia energética del proceso.

Atendiendo a estos resultados la producción de almidón acetilado para instalaciones de baja capacidad como las concebidas en el programa nacional de flora y fauna se conduce más favorablemente considerando la acetilación directa del almidón nativo.

Conclusiones parciales:

1. Se diseñaron los equipos fundamentales que se utilizan en las etapas de gelatinización, acetilación y secado para los procesos de obtención de almidón acetilado y almidón gelatinizado- acetilado.
2. Se realizó una evaluación económica de las tecnologías para almidón acetilado y almidón gelatinizado- acetilado, para ello se estimaron los costos totales de inversión a partir de los costos del equipamiento y otros aspectos, y se estimaron los costos totales de producción. Para almidón acetilado el costo total de inversión es de \$ 323.701,14 y el costo total de producción es de \$ 510.043,24; para almidón gelatinizado- acetilado el costo total de inversión es de \$ 596.180,95 y el costo total de producción es de \$ 1.051.310,90

Conclusiones generales:

1. La acetilación de almidón de yuca con AA como agente esterificante en medio básico acuoso de $\text{pH} < 10$, se conduce como una reacción simple en fase homogénea de orden uno respecto a almidón activo y al AA siendo dos el orden global.
2. La adaptación de las tecnologías conocidas y el desarrollo de los procesos para las etapas de gelatinización, acetilación y secado proporciona una vía efectiva para la propuesta y evaluación técnico económica de las tecnologías de producción de almidón acetilado.
3. La producción de almidón acetilado a partir de almidón nativo requiere una inversión total de \$ 323.701,14, requiere un costo total de producción de \$ 510.043,24, con ingresos por ventas de \$ 764948,81 , por lo cual los indicadores de rentabilidad de dicho proyecto muestran resultados favorables en las condiciones del programa nacional de flora y fauna alcanzando valores de VAN = \$727.031,63, TIR = 34% y PRD = 2,2
4. La producción de almidón gelatinizado acetilado es una opción perspectiva que incrementa las posibilidades de aplicación y que tiene ventajas asociadas al incremento de la velocidad de acetilación, pero el secado de los materiales gelatinizados es exigente desde el punto de vista tecnológico y energético por lo que, en las condiciones del Programa Nacional de Flora y Fauna, esta variante no muestra resultados positivos de factibilidad.

Recomendaciones

1. Considerar en el Programa Nacional de Flora y Fauna la producción de almidón acetilado como una opción para el incremento del valor agregado, la aplicabilidad de los surtidos obtenidos y la sustitución de importaciones.
2. Continuar las valoraciones de la variante de producción de almidón gelatinizado acetilado en proyectos que consideren el uso de la evaporación a múltiple efecto como una opción para la reducción de los requerimientos asociados al secado spray.
3. Desarrollar estudios vinculados con las mejores condiciones de operación en el tratamiento anaeróbico de los efluentes y el procesamiento de los subproductos.

23. GARZÓN, M. D. L. 2006. Retrograded starch for direct compaction. I. Process and characterization of chayotes starch. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*.
24. GRAAF, R. A., BROEKROELOFS, G. A. & JANSSEN, L. P. 1995. The kinetics of the acetylation of gelatinised potato starch.
25. GUERRA, D. 2007. *Efecto del nivel de acetilación en las características morfológicas y moleculares del almidón de plátano*. Universidad Autónoma de México.
26. GUERRA, D., BELLO, L. A., GONZÁLEZ, R. A., SOLORZA, J. & ARAMBULA, G. 2008. Efecto del tiempo de reacción en la acetilación de almidón de plátano. *Rev. Mex. Ing. Quim*, 7, 283-291
27. KERN, D. Q. 1988. *Procesos de transferencia de calor*, La Habana, Cuba.
28. LEFNAOUI, S. & MOULAI-MOSTEFA, N. 2015a. Synthesis and evaluation of the structural and physicochemical properties of carboxymethyl pregelatinized starch as a pharmaceutical excipient. *Saudi Pharmaceutical Journal* 23, 698-711.
29. LEVENSPIEL, O. 1999. *Chemical Reaction Engineering*, New York, USA, Willey Press.
30. LÓPEZ, J. M. 1994. Estudio del tratamiento térmico extrusión sobre las propiedades funcionales y reológicas del almidón de yuca (Manihot esculenta Crantz)
31. MARTÍNEZ, F., LÓPEZ, M. & ZAZUETA, J. J. PREPARATION AND PROPERTIES OF PRE-GELATINIZED CASSAVA (Manihot esculenta. Crantz) AND JÍCAMA (Pachyrhizus erosus) STARCHES USING OHMIC HEATING.
32. MASTERS, K. 1985. *Spray Drying Handbook*, London, George Godwin.
33. MCCABE, W. L., SMITH, J. C. & HARRIOT, P. 1998. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, Madrid, España.
34. MENDOZA, R. 2010. Proyecto de Inversión para una Planta Procesadora de raíces de Yuca para la obtención del Almidón y Pulpa de Yuca. Estudio de Factibilidad Económico-Financiero.
35. MIRMOGHTADAIE, L., KADIVAR, M. & SHAHEDI, M. 2009. Effects of cross-linking and acetylation on oat starch properties. *ELSEVIER*.
36. MOLLEGA, S. 2007. *DESARROLLO DE ALMIDONES PREGELATINIZADOS FUNCIONALIZADOS Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS PARA SU APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA*. UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
37. MONTOYA, S. 2007. *INDUSTRIALIZACIÓN DE LA YUCA*. Obtención de almidón y sus aplicaciones. Manejo de sólidos y fluidos ed. Cali, Colombia.
38. NEGRÍN, Y. F. 2016. Propuesta tecnológica para la acetilación de almidón de yuca en medio acuoso. Santa Clara.
39. OCHOA, M., SARDINAS, L., MAZA, N., LIMA, M., ÁLVAREZ, M., FALCO, A. S., PÉREZ, W., HERNÁNDEZ, G. & FRAGA, R. 2014. Evaluación de harina y almidón de yuca obtenidos de diferentes clones. *Cienc. Tecnol. Aliment*.
40. ORTEGA, E. & VELÁSQUEZ, E. 2000. El Casabe: II. Diversidad de productos y comercialización. *FONAIAP DIVULGA*.
41. OSWALDO, S., ARÁMBULA, G. & ROSAS, J. L. EL USO DE YUCA Y CAMOTE EN LA INDUSTRIA ALIMENTICIA, COMO RECURSO POTENCIAL PARA LA OBTENCIÓN DE ALMIDONES Y ALTERNATIVA DE DESARROLLO PARA LA AGRICULTURA RURAL
42. PEÑARANDA, O. I. 2008. "Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos." *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*
43. PÉREZ, D. 2013. *Diseño tecnológico y análisis técnico- económico de plantas para la obtención de harina y almidón a partir de yuca*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

44. PÉREZ, O., LEY, N. & E. GONZÁLEZ SUAREZ, C. V. V. 2017. Modificación hidrotérmica del almidón de yuca para su empleo como estabilizador de helados. *AFINIDAD LXXIV*. Santa Clara.
45. PÉREZ, O., LEY, N. & GONZALES, E. 2018a. CINÉTICA Y DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTO EN LA SÍNTESIS DE ACETATO DE ALMIDÓN DE YUCA DE BAJO GRADO DE SUSTITUCIÓN. *Centro Azúcar*.
46. PÉREZ, O., LEY, N. & GONZÁLEZ, E. 2018b. DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE REACCIÓN Y CINÉTICA EN LA ACETILACIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA. *Revista Centro Azúcar*.
47. PERRY, R. H. 1984. *Chemical Engineers' Handbook*.
48. PETERS, M. S. 1991 *PLANT DESIGN AND ECONOMICS FOR CHEMICAL ENGINEERS*.
49. PRIETO, J., TREJO, C. L. & PRIETO, F. 2010. Acetylation and characterization of the barley starch *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*
50. REIS, R. L. & CUNHA, A. M. 2005. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*
51. REMBADO, M. & SCENI, P. 2009. *LA QUÍMICA EN LOS ALIMENTOS*, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. República Argentina. .
52. ROSABAL, J. & VALLE, M. 1998. *Hidrodinámica y Separaciones mecánicas. Tomo II*, La Habana.
53. SALCEDO-MENDOZA, J. G. R.-L., M.C.; FIGUEROA-FLÓREZ, J.A. 2016. EFECTO DE LA ACETILACIÓN EN LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y FUNCIONALES DE ALMIDONES DE YUCA *Rev. Mex. Ing. Quim* 15, 787-796
54. SALCEDO, J., FIGUEROA, JA., HERNÁNDEZ, EJ. 2017. *Agroindustria de productos amiláceos II: Métodos y técnicas de caracterización*.
55. SALCEDO, J. G., RODRÍGUEZ, M. C. & FIGUEROA, J. A. 2016. Efecto de la acetilación en las propiedades estructurales y funcionales de almidones de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y Ñame (*Dioscorea alata* cv. Diamante 22). *Rev. Mex. Ing. Quim*, 15, 787-796.
56. SRITOTH, K., PIYACHOMKWAN, K., WANLAPATIT, S. & OATES, C. 2000. Cassava Starch Technology: The Thai Experience.
57. TIJSEN, C. J., VONCKEN, R. & BEENACKERS, A. A. 2001. Design of a continuous process for the production of highly substituted granular carboxymethyl starch. *Chemical Engineering Science*
58. TOLEDO, L. 2017. *Determinación de la influencia de la cinética en la propuesta tecnológica para la acetilación de almidón de yuca*. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
59. TORRES, P., RODRÍGUEZ, J. & ROJAS, O. 2005. Cassava starch extraction. Integral management and control of contamination.
60. TREYBAL, R. E. 1985. *Operaciones con transferencia de masa*.
61. TRUJILLO, C. T. 2014. "OBTENCIÓN DE PELÍCULAS BIODEGRADABLES A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta* Crantz) DOBLEMENTE MODIFICADO PARA USO EN EMPAQUE DE ALIMENTOS" PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE: INGENENIERO AGROINDUSTRIAL "Madre de Dios Capital de la Biodiversidad del Perú" UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS
62. UCLV 2014. Informe resumen de las actividades investigativas para el desarrollo de productos industrializados de yuca. Santa Clara.
63. VIERA, R. 2007. *Diseño y análisis de reactores químicos*, La Habana, Cuba.
64. VILPOUX, O. 2004. Cassava starch production process in Brasil, Thailand and China. *Technology, use and potencialities of Latin American starchy tubers*. São Paulo, Brasil.

Anexos

Anexo 1 Requerimientos de calidad de las raíces de yuca según su uso.

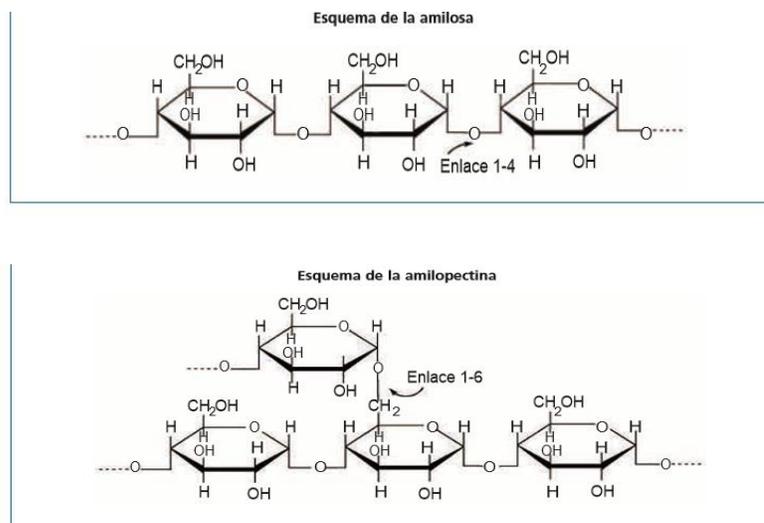
Requisitos de calidad de raíces de yuca según su uso

Parámetro o atributo	Almidones y dietas animales	Consumo fresco	Proceso industrial para alimentación humana
Rendimiento de campo	(1)	(2)	(1)
Contenido de cianuro	(3) La yuca amarga es preferida; requiere menos vigilancia contra robo en el campo.	(1) Sólo se aceptan las variedades de yuca dulce.	(1) Sólo se aceptan las variedades de yuca dulce.
Color del parénquima	(2) Para almidones debe ser blanco. Para alimentos balanceados de color anaranjado (mayor contenido de carotenos)	(1) En general se prefiere blanco, aunque en algunas regiones las raíces amarillas tienen aceptación.	(2) Actualmente, se procesan raíces de corteza blanca. Las de color amarillo, sin embargo, ofrecen algunas ventajas nutricionales.
Aspecto externo de la raíz	(3) No es requisito. La yuca debe tener buena calidad sanitaria.	(1) Importante cuando a las raíces se les somete a técnicas de conservación.	(3) No es requisito. La yuca debe tener buena calidad sanitaria.
Tolerancia a plagas y enfermedades de la raíz	(2) Solo en cuanto a su efecto sobre el rendimiento en el campo	(2) Si afectan la prestación externa de la raíz influirá en el precio en el mercado de consumo en fresco.	(1) Si afectan la prestación externa de la raíz influirá en el precio en el mercado para uso industrial.
Contenido de materia seca	(1) Debe ser lo más alto posible. El precio del producto se ve afectado por este criterio.	(3) Las variedades de consumo fresco generalmente tienen niveles intermedios de materia seca. Altos niveles afectan la calidad culinaria.	(1) En general se prefiere alto contenido de materia seca. La proporción de azúcares es importante para el procesamiento.
Calidad culinaria	(3) Se prefiere incluso un material de baja calidad, pues este no requerirá de vigilancia contra robo en el campo.	(1) Es un criterio fundamental para el consumo humano.	(2) Lo importante es la calidad del producto procesado. Raíces de yuca de calidad culinaria intermedia pueden ser excelentes para el sector industrial.

Nota: importancia relativa de cada requerimiento de calidad. (1) muy importante (2) medianamente importante, (3) menos importante.

Fuente: (ceballos, 2002)

Anexo 2 Esquemas de la amilosa y la amilopectina.



Fuente: (Aristizabal, 2007)

Anexo 3 Propiedades de los componentes del almidón.

Propiedades de los componentes del almidón

Propiedad	Amilosa	Amilopectina
Estructura	Lineal	Ramificada
Longitud promedio de la cadena	Aprox. 1 000	20-25
Peso molecular	40 000 hasta 10 ⁶	200 000 hasta 10 ⁹
Grado de polimerización	Aprox. 1 000	10 000-100 000
En solución	Hélice extendida o enrollada	Esfera irregular
Estabilidad en soluciones acuosas	Retrógrada	Estable
Acomplejamiento	Con facilidad	Con dificultad
Retrogradación	Rápida	Muy lenta
Gel	Firme e irreversible	Suave y reversible
Formación de complejos	Favorable	Desfavorable
Patrón de rayos X	Cristalino	Amorfo
Digestibilidad de la β -amilasa	Casi completa	Cerca de 60 %
Reacción con yodo	19-20 %	5-9 %
Color con la solución de yodo	Azul profundo	Violeta
Longitud de onda máxima (nm)	Aprox. 660	530-550

Fuente: (Skeist, 1977) y (Aspinal, 1983)

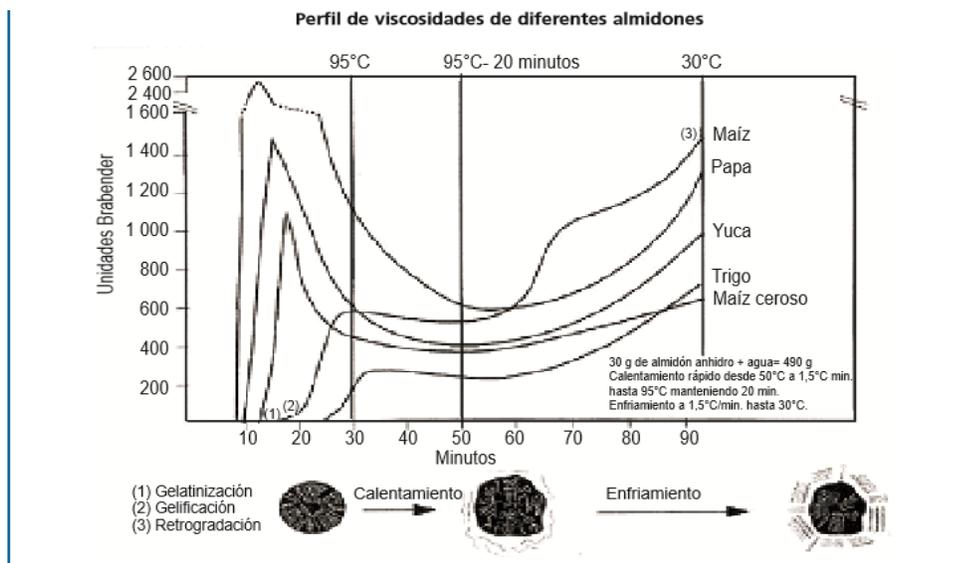
Anexo 4 Características de los gránulos del almidón.

Características de los gránulos de almidón

Almidón	Tipo	Morfología	Diámetro (μ m)	Contenido de amilosa (%)	Temperatura de gelatinización ($^{\circ}$ C)	Temperatura de gelificación ($^{\circ}$ C)	Propiedades de cocción
Maíz	Cereal	Redondo poligonal	5-30	25	62-72	80	Gel opaco
Maíz ceroso	Cereal	Redondo poligonal	5-30	<1	63-72	74	Claro cohesivo
Yuca	Raíz	Ovalado truncado	4-35	17	62-73	63	Claro cohesivo tendencia a gelificar
Papa	Tubérculo	Ovalado esférico	5-100	20	59-68	64	Claro cohesivo tendencia a gelificar
Trigo	Cereal	Redondo lenticular	1-45	25	58-64	77	Gel opaco
Arroz	Cereal	Esférico poligonal	3-8	19	68-78	81	Gel opaco
Sago	Tronco	Ovalado truncado	15-65	26	69-74	74	Gel opaco

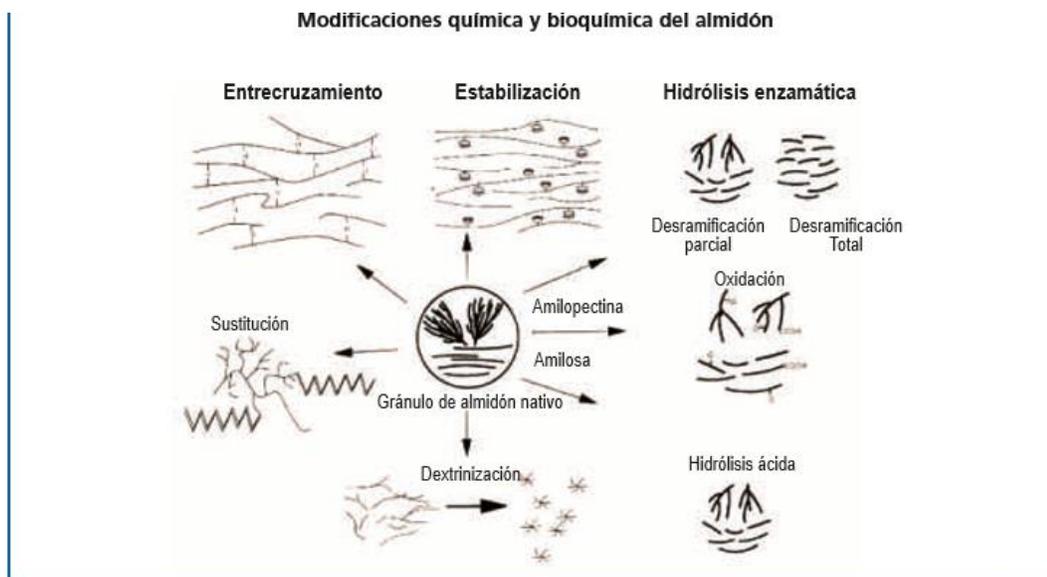
Fuente: (Taggart, 2004)

Anexo 5 Perfiles de viscosidad de diferentes almidones.



Fuente: (Taggart, 2004)

Anexo 6 Modificaciones del almidón



Fuente: (Taggart, 2004)

Anexo 7 Algunos equipos utilizados en la vía tradicional de obtención de almidón nativo.



Lavadora- peladora



Rallador



Filtro y tamiz vibratorio



Canales de sedimentación



Secado en patios de concreto y en bandejas



Fuente: (Aristizabal, 2007)

Anexo 8 Algunos equipos utilizados en la vía mecanizada de obtención de almidón nativo.



Prelimpieza



Lavado y pelado



Inspección



Triturador



Desintegrador



Centrífuga tamizadora



Centrifugas purificadora y concentradora



Filtro al vacío



Secador flash y silo de enfriamiento



Silo de almacenamiento de fibras

Fuente: (Aristizabal, 2007)