

Propuestas tecnológicas para productos industrializados de *Manihot esculenta Crantz* aplicables en la industria alimentaria cubana

Technological proposals for industrialized products of *Manihot esculenta Crantz* applicable in the Cuban food industry

Omar Pérez-Navarro^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-6963-1327>

Erenio González-Suarez¹ <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

Néstor Ley-Chong¹ <https://orcid.org/0000-0001-5575-246X>

¹Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Villa Clara, Cuba

Autor para la correspondencia: opnavarro@uclv.cu

RESUMEN

Atendiendo a las potencialidades para el cultivo y cosecha de variedades industriales de *Manihot esculenta Crantz* (yuca) en Cuba, el objetivo del trabajo es establecer propuestas tecnológicas efectivas y sostenibles para instalaciones industriales procesadoras de yuca, obteniendo surtidos de alto valor agregado y aplicabilidad como materias primas o aditivos en la industria alimentaria y química. Se consideró la adaptación y evaluación de tecnologías y la selección de surtidos, sus combinaciones y modificaciones. Los surtidos primarios presentados fueron almidón nativo, harina, casabe y su combinación en una instalación multipropósito. Como surtidos modificados se consideró el almidón precoloidal, el gelatinizado-acetilado y el acetilado. Tecnologías conocidas fueron adaptadas a las condiciones tecnológicas, empresariales y de mercado nacionales, desarrollando procesos para las nuevas etapas. Como métodos de análisis ingenieril se aplicó selección de tecnologías, estimado de demandas de proceso a través de balances de materiales y energía, diseño tecnológico, análisis técnico económico y ambiental y diseño óptimo económico. Las propuestas tecnológicas alcanzaron indicadores de factibilidad

work is to establish effective and sustainable technological proposals for industrial cassava processing facilities, obtaining assortments of high added value and applicability as raw materials or additives in the food and chemical industry. The adaptation and evaluation of technologies and the selection of assortments, their modifications and modifications are proposed. The primary assortments presented were native starch, casabe, flour and their combination in a multipurpose facility. Precolloidal, gelatinized-acetylated, and acetylated starch are desired as modified assortments. Known technologies were adapted to the technological, business and market national conditions, developing processes for the new stages. As engineering analysis methods, the selection of technologies, estimation of process demands through material and energy balances, technological design, economic and environmental technical analysis and optimal economic design were applied. The technological proposals indicate adequate feasibility and sustainability. For casabe, a small facility was designed to generate consumption and establish a market perspective. For flour and starch, energy improvements are proposed with

Palabras clave: propuestas tecnológicas; almidón modificado de yuca; diseño óptimo económico; acetilación; almidón precoloidal.

ABSTRACT

Taking into account the potential for the cultivation and harvest of industrial varieties of *Manihot esculenta Cranz* (cassava) in Cuba, the objective of the drying in pneumatic equipment with recirculation of solids. The precolloidal starch reached satisfactory behaviors in the rheological, functional and sensory aspects when it was used as a stabilizer for ice creams. The optimal parameters for acetylated starch were reached at a productive capacity of 12,57 t_{roots}/d , degree of substitution of 0,505 and air supply to the pneumatic dryer at 124,98 °C.

Keywords: technological proposals; modified cassava starch; optimal economic design; acetylation; precolloidal starch.

Recibido: 16/01/2025

Aceptado: 20/04/2025

Introducción

En las condiciones de clima y suelos cubanos, el cultivo y cosecha de *Manihot esculenta* Cranz (yuca) con fines de industrialización presenta amplias potencialidades.⁽¹⁾ Los surtidos elaborados a partir de raíces de yuca tienen aplicación en múltiples sectores económicos y de forma especial en la industria alimentaria y química en general. A partir del almidón nativo de yuca es posible la modificación estructural por vía física y química, obteniendo materiales de propiedades funcionales mejoradas que son idóneos en múltiples aplicaciones industriales, entre ellas, como facilitadores de suspensiones acuosas para la industria alimentaria. Por ello, el desarrollo de una industria procesadora y transformadora de yuca constituye una opción interesante y muy poco explorada hasta el presente como vía de integración material y fuente de desarrollo.⁽²⁾ Los procesos de gelatinización y acetilación constituyen las vías de modificación física y química del almidón con menor complejidad y requerimientos tecnológicos.^(3,4) Las dificultades para el aislamiento del producto por métodos físicos que implica la gelatinización pueden resolverse a través de un tratamiento hidrotérmico en la zona previa a la gelatinización, con modificación parcial y reversible de la estructura en el límite entre la zona cristalina y la coloidal, obteniéndose almidón precoloidal, que es un producto novedoso, de propiedades funcionales mejoradas respecto al nativo y con potenciales usos como estabilizante alimentario.⁽⁵⁾ La acetilación en medio básico acuoso de almidón nativo y gelatinizado de yuca mejora sus propiedades funcionales, entre ellas la solubilidad en agua fría, lo cual incrementa su aplicabilidad y valor agregado. Estos productos, junto con surtidos más tradicionales como el almidón nativo, la harina y el casabe no han sido elaborados en las condiciones actuales de la agroindustria cubana con la efectividad y calidad requerida para los fines mencionados.

Por esas razones, el objetivo del trabajo es establecer propuestas tecnológicas efectivas y sostenibles para instalaciones industriales procesadoras de yuca, obteniendo surtidos de alto valor agregado y aplicabilidad como materias primas o aditivos en la industria alimentaria y química.

Materiales y métodos

Las bases metodológicas para la conducción de procesos inversionistas para las propuestas tecnológicas de productos de yuca se establecieron previamente considerando la importancia de la disponibilidad de materias primas en la agroindustria cubana actual, los procesos de fortalecimiento agrícola y la proyección de crecimiento de la disponibilidad de yuca, con base en el diagnóstico inicial, la demanda y el tamaño mínimo del proyecto.^(2, 6, 7)

Considerando dichas bases y las recomendaciones metodológicas para la optimización durante la fase de diseño, reportadas por Acosta y colaboradores, se propuso un procedimiento para la consideración del diseño óptimo económico de las instalaciones que resultaron factibles de acuerdo al análisis técnico-económico realizado en los antecedentes metodológicos reportados para este caso.⁽⁷⁾ La selección de una escala productiva óptima para la instalación industrial permitió determinar el comportamiento más conveniente de los costos de inversión y de operación. En este sentido, también fueron definitorios los parámetros de proceso en las etapas de acetilación y secado neumático. El secado resultó decisivo en la efectividad energética, ambiental y técnico-económica. La temperatura óptima del gas de secado permitió combinar costos fijos y variables que garantizaron indicadores de efectividad óptimos para las inversiones necesarias. Este principio también se aplicó al grado de sustitución (GS), como expresión de la conversión durante la acetilación. Mayor sustitución nucleofílica implicó mayor valor agregado en el producto final pero exigió más requerimientos de inversión y de proceso.

Se siguió un procedimiento de modelación estadística y optimización de los indicadores dinámicos de efectividad de la inversión para cada propuesta. Para el diseño y determinación de los indicadores económicos se aplicaron métodos tradicionales de ingeniería y estudios cinéticos de la acetilación de almidón de yuca de la variedad INIVIT Y-93-4, reportados anteriormente.^(8, 9) El estimado de la inversión y de las demandas de proceso a través del balance de materiales y energía, así como la selección y diseño del equipamiento, se realizaron en función de las variables de optimización.^(10, 11) En el caso de los almidones modificados, a lo anterior se unió el desarrollo de nuevos procesos para las etapas de gelatinización, acetilación y secado en similar entorno de optimización.⁽¹²⁾

Como indicadores económicos óptimos se consideró la ganancia, los costos totales de producción, las ventas totales del producto principal y del subproducto afrecho en el caso de los almidones y los indicadores dinámicos de rentabilidad, Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación al Descontado (PRD). Como variables de optimización se consideraron la capacidad productiva del proyecto, el GS y la temperatura de alimentación del aire al secadero neumático. Para la determinación de los ingresos y los costos totales de producción se consideró un aprovechamiento de la capacidad instalada de 50 % para el primer año, 80 % para el segundo año y 100 % a partir del año 3. La vida útil del proyecto se estimó en 15 años y el factor de descuento en 10%.^(10, 11) Los precios de adquisición de las raíces se consideraron como 0,07 USD/kg.^(2, 11) Los precios de venta fueron considerados en 1,44 USD/kg para casabe,⁽²⁾ 0,46 USD/kg para harina,⁽¹⁰⁾ 1 USD/kg para almidón nativo y precoloidal⁽²⁾ y para los almidones gelatinizados fueron utilizadas las funciones del GS reportadas previamente.⁽¹²⁾

Para la modelación estadística del comportamiento de los indicadores dinámicos de rentabilidad con los ($k=3$) factores mencionados anteriormente, se utilizó un Diseño Experimental Central Compuesto (DCC).⁽¹³⁾ Se consideró un rango de variación de la capacidad de producción entre 1991 y 4009 t_{yuca}/a , con una capacidad agrícola máxima de la región seleccionada de 4100 t_{yuca}/a . Para el GS se consideró una gama de valores entre 0,097 y 0,602 en el límite de los valores bajos.⁽²⁾ Para el aire de secado se consideró un rango de temperaturas entre 124,21 y 250,56 °C; con tiempos de secado de hasta 3 s para evitar el deterioro del producto.^(10, 11) Se generó un diseño factorial completo 2^k para la porción factorial del DCC, un punto central en el cubo y 2k puntos axiales a una distancia rotacional $\alpha=1,681$ desde el centro del diseño para un total de 15 corridas. Los modelos para cada parámetro dinámico de rentabilidad se ajustaron a través de análisis de regresión y se optimizaron las superficies de respuesta obtenidas mediante análisis de cordillera, utilizando respuestas múltiples. Con el objetivo de encontrar el mejor punto posible dentro de la región experimental se utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), con respuestas por separado y respuestas múltiples, comenzando por el centro de la cordillera óptima.⁽¹⁴⁾

En el caso de las tecnologías para surtidos combinados, donde es conveniente utilizar diseños de mezclas debido a que una de las variables a optimizar es la distribución de la disponibilidad de raíces entre los surtidos primarios, se generó un Diseño de Vértices Extremos (DVE) de segundo grado. Para ello, se utilizaron los vértices de la región restringida como base del diseño, junto con puntos entre el centroide global y el centroide de la región experimental ajustando a un modelo canónico cuadrático y optimizando por determinación del mejor punto dentro de la región experimental delimitada por un polígono irregular mediante la MSR.⁽¹²⁾

Resultados y discusión

En la figura 1 se muestra el procedimiento para el diseño óptimo económico dentro del análisis inversionista en instalaciones industriales procesadoras de yuca. El mismo complementa los análisis metodológicos de este tema e incluye, a través de los bloques iniciales, el tratamiento metodológico que ha sido reportado con anterioridad.^(2, 7) Para considerar metodológicamente el diseño óptimo, a las propuestas factibles y sostenibles se les define el problema de optimización y se aplica un diseño experimental que facilita la obtención de un modelo matemático para el criterio de optimización. Para obtener dicho modelo, se aplican métodos de ingeniería que pueden vincularse a experimentación, balances de materiales y energía, selección y diseño de tecnologías, contabilización de gastos e ingresos, determinación de indicadores económicos dinámicos, etcétera. El modelo se valida estadísticamente y se optimiza aplicando estrategias previamente reportadas,⁽¹³⁾ y se continúa con el diseño tecnológico detallado en condiciones óptimas y la evaluación económica y ambiental final.

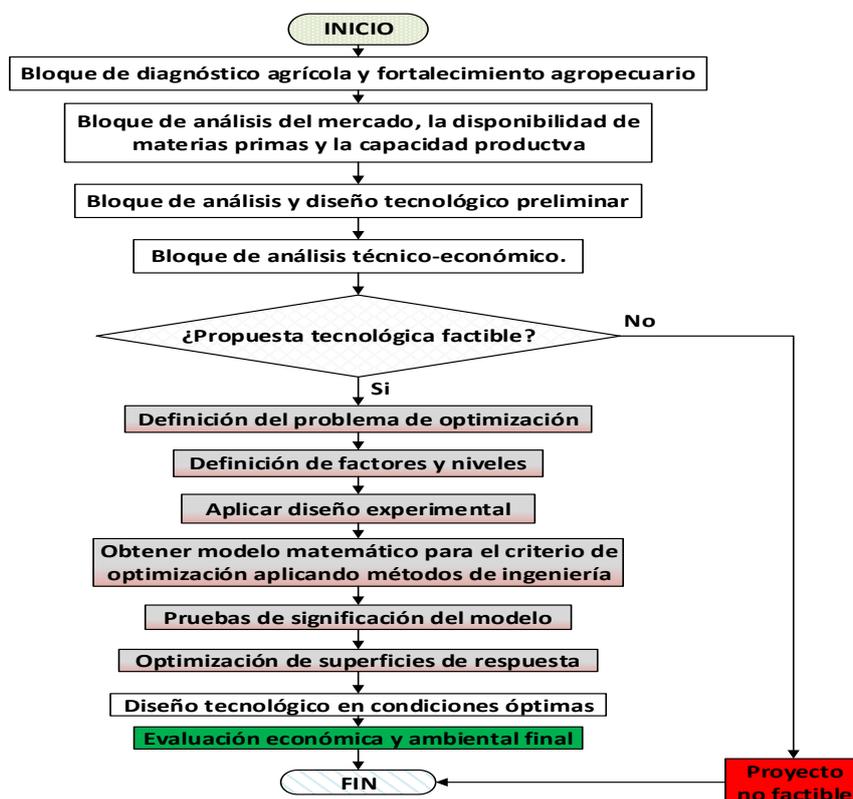


Fig. 1- Diagrama heurístico del procedimiento para el diseño óptimo económico en el análisis inversionista de instalaciones industriales procesadoras de yuca

Siguiendo el procedimiento mostrado en la figura 1 y sus precedentes, se efectuó la definición de surtidos y tamaño de los proyectos. Se propusieron como surtidos primarios el casabe, la harina y el almidón nativo. Como surtidos modificados se seleccionó el almidón precoloidal, como caso de modificación física, el almidón acetilado como caso de modificación química y al almidón gelatinizado acetilado como caso de modificación física y química.

La selección de tecnologías para estas propuestas ha sido reportada previamente considerando los requerimientos de las etapas de tratamiento primario de las raíces y las etapas específicas de cada surtido. ^(2,10, 12, 15,16)

Para el tratamiento primario se consideró la recepción, el lavado-descascarado y la trituración. El lavado-descascarado combinó la limpieza en húmedo y en seco. En húmedo se efectuó una preselección y limpieza con agua a presión, combinada con descascarado a fricción. ^(17, 18, 19) La trituración se efectuó con agua o en seco, en diferentes equipos dependiendo del nivel de industrialización de la instalación, del tipo de surtido y del grado de reducción de tamaño deseado. ^(18, 19) Los residuos sólidos y líquidos recibieron tratamientos y destinos acordes con su composición y potencialidades, siendo

el uso como abonos, el riego agrícola, la alimentación animal y la digestión anaeróbica los destinos principales.^(2, 18, 20)

Para elaborar casabe se propuso una tecnología mecanizada que garantiza calidad, seguridad e inocuidad. Se incluyó un descascarado a fondo durante la limpieza en húmedo y el rayado y la desintegración se efectuaron en seco. Al material rallado se le redujo la humedad por prensado mecánico. El moldeado se efectuó con rodillo de troquelado y la formulación con los aditivos por sistema alimentador-mezclador tipo sinfín. Como aditivos se emplearon cárnicos, quesos, preparados a base de maní, mantequilla y otros saborizantes. El horneado final garantizó la conformación crujiente del producto terminado.^(2, 21)

Para la elaboración de harina se seleccionó el secado en pasta logrando mayor efectividad y una adecuada distribución de la humedad, la temperatura y el flujo de alimentación a un secadero neumático.⁽¹⁰⁾ En la elaboración de almidón nativo se consideró la vía mecanizada. Para la separación de la fibra se propusieron centrífugas tamizadoras y para la purificación y concentración de la lechada centrífugas de platos y discos. La deshidratación de la torta refinada se efectuó en filtros rotatorios al vacío.^(2, 12) La alimentación de agua de fuentes externas se efectuó en las centrífugas tamizadora y purificadora. Parte del efluente de la concentradora se alimentó a la trituración y el resto, junto al efluente de la purificadora se utilizó en el lavado, pasando posteriormente al tratamiento de residuales.^(2, 7) Los tratamientos de estos residuales se propusieron a través de filtros anaeróbicos de flujo horizontal con diferentes soportes, logrando eficiencias de remoción del 79 % para DQO y del 90 % para sólidos totales.⁽²⁰⁾

Para surtidos primarios combinados se utilizó una variante semi-mecanizada con lavado de la fibra en un trommel giratorio, con orificios de 0,5-1 μm , donde se efectuó el lavado de los gránulos y su separación en forma de lechada seguida de la sedimentación de la pasta de almidón en canales de concreto.⁽²²⁾

Las suspensiones con 10 % p/p de almidón nativo, gelatinizadas a 60 °C alcanzan una viscosidad del orden de 0,01 Pa·s.^(2, 23, 24) Para el tratamiento de las mismas se propusieron agitadores de placas perforadas y deflector vertical, facilitando la operación y la limpieza y logrando patrones de flujo radial y axial que eliminan las zonas estancadas. Para la gelatinización se seleccionó un

tanque enchaquetado agitado que opera de manera continua con suministro de calor por intercambio indirecto. Para la acetilación se propuso una batería de reactores continuos con agitación y enchaquetados que operan isotérmicamente por intercambio térmico con el efluente de la centrífuga purificadora. ^(2, 16)

En la tabla 1 se muestran los resultados del cálculo de requerimientos, diseño tecnológico de los equipos principales y el análisis técnico económico a las capacidades seleccionadas para casabe y almidón nativo. Para la harina se muestran los resultados del diseño óptimo económico.

Tabla 1- Requerimientos, diseño y evaluación técnico económica de surtidos primarios de yuca. Fuente: Adaptada de ^(2, 10, 21)

Surtido			CASABE ⁽²¹⁾	HARINA ⁽¹⁰⁾	ALMIDÓN ⁽²⁾
Capacidad		t _{yuca} /d	2,25	44,14	8
Producción		t/d	0,92	15,3	2,54
Requerimientos	Agua uso tecnológico	m ³ /d	3,38	52,9	22,62
	Aire secado	m ³ /d	-	484 260	33 688
Combustible	Petróleo crudo nacional	t _{CN} /d	0,032	0,682	0,124
	Índice de consumo	t _{CN} /t	0,035	0,04	0,05
Residuos	Sólidos	t/d	0,23	3,28	1,08
	Líquidos	m ³ /d	2,7 ^a	52,9 ^a	24,3 ^b
Rendimiento en base a yuca		%	26,47	34,66	31,69
Dimensiones del equipamiento principal	Tolva receptora	m ³	2,2	59,65	10,81
	Lavador-	m ³	2	2,9	4,4
	Centrífugas primarias	m ³ /h	-	-	2,0
	Horno Boundare	m ³	21	-	-
	Secadero neumático	m	-	106	3
Inversión total requerida		USD	222 302	680 780	558 802
Costos totales de producción		USD/a	355 974	1 030548	451 297
Ingresos por ventas anuales		USD/a	394 418	1 437 520	774 927
VAN		USD	359 489	3 440 237	1 674 927
TIR		%	34	54	44
PRD		años	4	2,95	3,0

^aAgua de lavado para riego agrícola ^b Efluente de las centrífugas para riego agrícola

Para casabe; producto tradicional desde la época de los aborígenes que, a falta de ofertas de calidad e inocuidad estables; fue perdiendo aceptación entre la población cubana, se consideró una instalación pequeña que permitió generar un consumo y establecer un mercado perspectivo, alcanzando resultados técnico-económicos favorables, garantizando los prerrequisitos del sistema de gestión de la inocuidad y determinando además el punto de equilibrio inversionista.⁽²¹⁾ Para la harina, atendiendo a que bajas capacidades no brindan resultados adecuados, ⁽²⁾ se efectuó el diseño óptimo económico de una

instalación de secado en pastas que arrojó una capacidad óptima de 2,21 t_{yuca}/h , partiendo de una solución energética a partir de mezclas de biogás generado con residuales porcinos y petróleo crudo nacional a 113,34 °C en la alimentación del gas al secadero neumático, presentando indicadores dinámicos óptimos adecuados y demandando, como equipamiento principal, un secador neumático con cámara de 30,42 m^3 y longitud de 26,90 m, con índice de consumo de combustible es de 0,04 t_{CC}/t_{Harina} . Este índice se ve favorecido por la utilización de biogás como alternativa energética primaria debido a que, en las condiciones de disponibilidad de biogás consideradas, se redujo el consumo de combustible en 0,016 t_{CC}/h equivalentes a 0,022 t_{CC}/t_{Harina} . Atendiendo a ello, la decisión inversionista resultante combina adecuadamente los factores energéticos, ambientales y técnico-económicos.⁽¹⁰⁾

Para almidón nativo vía mecanizada se obtuvieron resultados adecuados de efectividad y sostenibilidad ambiental y económica debido a que es una tecnología de menores requerimientos energéticos que la harina, siendo un proyecto robusto, muy atractivo debido a las múltiples aplicaciones de este material en la industria química y por ser la materia prima principal para la obtención de almidones modificados, productos de valor agregado y aplicabilidad superior.⁽²⁾

En la tabla 2 se muestran los resultados del diseño óptimo económico para los surtidos combinados en una instalación multipropósito que incluye el cálculo de requerimientos, diseño tecnológico de los equipos principales, valores óptimos de los criterios utilizados e indicadores económicos principales. Para este caso, una combinación con 10 % de la disponibilidad de yuca dedicada a producir casabe, 30 % a harina y 40 % a almidón representó una propuesta viable y factible para instalaciones multipropósito de 10 t_{yuca}/d .⁽²⁵⁾

Tabla 2- Diseño óptimo económico para surtidos combinados de yuca en planta multipropósito. Fuente: Adaptada de.⁽²⁵⁾

Surtidos combinados			CASABE	HARINA	ALMIDÓN
Capacidad óptima		t_{yuca}/d	10		
Distribución óptima de la disponibilidad		%	10	30	40
Producción		t/d	0,44	1,16	1,33
Requerimientos	Agua uso tecnológico	m^3/d	7,8		
	Aire secado	m^3/d	-	33 240	
Combustible	Petróleo crudo nacional	t_{CN}/d	0,353		
	Índice de consumo	t_{CN}/t	0,12		
Residuos	Sólidos	t/d	0,13		
	Líquidos	m^3/d	9,3 ^a		
Rendimiento total en base a yuca		%	29,32		
Dimensiones del equipamiento principal	Tolva receptora	m^3	17		
	Lavador-descascarador	m^3	1,5		
	Filtro rotatorio al vacío	m^2	155		
	Horno Boundare	m^3	12	-	-
	Secadero neumático	m	111 (10 horquillas de 5 m en U)		
Inversión total requerida		USD	654 267		
Costos totales de producción		USD/a	456367		
Ingresos por ventas anuales		USD/a	712 228		
VAN máximo		USD	1196173		
TIR máxima		%	33		
PRD mínimo		años	3,9		

^a Mancha proveniente de la sedimentación y destinada a la alimentación animal

En la tabla 3 se muestran los resultados del análisis técnico económico para almidón precoloidal y del diseño óptimo económico para el almidón gelatinizado acetilado y para el acetilado. En el caso del almidón precoloidal, debido a que la mejora funcional y estructural no requiere gelatinización,⁽²⁶⁾ y por lo tanto el aislamiento del producto requiere menor consumo energético y menor complejidad tecnológica,^(5, 15) se alcanzan resultados técnico económicos muy favorables a capacidades inferiores que en el resto de los productos modificados.

Para almidón gelatinizado acetilado (AGA), considerando una instalación con capacidad para tratar 8 t_{yuca}/d , que produce 3,12 t_{AGA}/d con $GS=0,6$, las principales demandas tecnológicas están dadas en el gelatinizador de 2,15 m^3 y tres unidades acetiladoras de 0,666 m^3 cada una que operan a concentraciones inicial e intermedias de UAG activas de 0,638; 0,401 y 0,303 $kmol/m^3$ respectivamente y una concentración de salida de 0,255 $kmol/m^3$ para una concentración final de acetato de almidón de 0,383 $kmol/m^3$. La cámara de

secado requiere un volumen de 18,07 m³ y un aspersor de 0,3 m de diámetro con una velocidad de 6000 min⁻¹ (2, 16)

Tabla 3- Resultados del análisis técnico económico y el diseño óptimo para surtidos modificados. Fuente: Adaptado de. (2, 11, 12)

Surtido			PRECOLOIDAL (2)	GELATINIZADO ACETILADO (11)	ACETILADO (12)
Capacidad		t _{yuca} /d	8	11,515	12,569
Producción		t/d	2,54	3,794	5,697
Requerimientos	Agua uso tecnológico	m ³ /d	36,96	18,2	19,87
	Aire secado	m ³ /d	33 825	43 136	112 220
	NaOH	t/d	-	0,005	0,03
	Anhídrido acético	t/d	-	0,962	1,135
Combustible	Petróleo crudo nacional	t _{CN} /d	0,237	2,08	0,313
	Índice de consumo	t _{CN} /t	0,09	0,548	0,055
Residuos	Sólidos	t/d	0,79	0,917	1,00
	Líquidos	m ³ /d	37,99 ^a	9,851 ^a	27,52 ^a
Rendimiento en base a yuca		%	31,81	32,95	45,32
Equipamiento	Intercambiador de	m ²	6,75	-	-
	Gelatinizador	m ³	-	3,1	-
	Batería acetiladora	m ³	-	6,33	34,90
Inversión total requerida		USD	681 214	784 623	1 398 617
Costos totales de producción		USD/a	493 845	872 022	1 040 799
Ingresos por ventas anuales		USD/a	777 805	1 216 884	2 683 002
VAN		USD	1 352 727	2 862 010	8 901 357
TIR		%	34	46	76
PRD		años	3,8	3	1,75

^a Efluentes de centrifugas a tratamiento de residuales

Analizando el diseño óptimo de dicha alternativa se aprecian resultados técnico económicos favorables cuando se procesan 11,515 t_{yuca}/d a temperatura de alimentación del aire al secadero por aspersion de 184 °C. Sin embargo debido al bajo nivel de sólidos en la alimentación (10,54 % p/p), (16) el índice energético es de 0,548 t_{CN}/t_{AGA}.

Atendiendo a que, la velocidad de acetilación es 75 veces superior cuando la suspensión de almidón está gelatinizada, (2) es de esperar que, a escala industrial, no sea efectiva la acetilación directa de almidón nativo y que sea muy ventajosa la gelatinización previa a la etapa química. Sin embargo, el tratamiento de pastas gelatinizadas no permite la deshidratación de la misma por los métodos físicos tradicionales, forzando el uso del secado por aspersion que presenta elevados consumos energéticos. (16) Atendiendo a ello, el análisis

tecnológico realizado fue más integral al optimizar el diseño acetilando directamente la suspensión de almidón nativo y aplicando el filtrado al vacío y el secado neumático de la suspensión no gelatinizada en lugar del secado por aspersión.⁽¹²⁾

Según los resultados mostrados en la tabla 3, los parámetros óptimos de diseño de la instalación productora de almidón acetilado (AA) se corresponden con una capacidad productiva de 12,57 $t_{raíces}/d$, $GS = 0,505$ y $124,98\text{ }^{\circ}C$ en la alimentación del aire al secadero neumático, produciendo 5,7 t_{AA}/d con indicadores dinámicos de rentabilidad muy favorables. Dicha propuesta tecnológica demanda un calentador de lechada de $0,5\text{ m}^3$, una batería de tres unidades acetiladoras de 35 m^3 de capacidad que opera isotérmicamente a $48\text{ }^{\circ}C$ y un secadero neumático de $2,53\text{ m}^3$, con diámetro estandarizado de 0,3 m y una longitud de 36 m distribuido espacialmente en una bancada de 3 horquillas en forma de U de 5 m cada una y 6 m ocupados por los accesorios y el resto del conducto hasta el separador ciclónico. La concentración de sólidos a la entrada del secadero se incrementa hasta 45 % p/p, reduciendo drásticamente el consumo energético hasta $0,055\text{ } t_{CN}/t_{AA}$.⁽¹²⁾ Dicho indicador energético garantiza la efectividad y sostenibilidad de la propuesta respecto a la variante con gelatinización previa a la acetilación aunque con un incremento considerable de la capacidad de la sección de acetilación.

Conclusiones

El procedimiento metodológico desarrollado permite una conducción efectiva de los procesos de concepción, diseño y evaluación en apoyo a la toma de decisiones empresariales e inversionistas para los procesos industriales de tratamiento de yuca. Dicho procedimiento garantiza que la adopción de tecnologías existentes y el desarrollo de nuevas etapas y procesos responda a las disponibilidad de materias primas y de energía, al comportamiento de los mercados y al resto de los parámetros fundamentales de desempeño dentro del complejo escenario económico productivo actual ponderando siempre el logro de eficiencia y sostenibilidad, encadenamientos productivos entre los surtidos obtenidos y máximo valor agregado. La elaboración de surtidos primarios, combinados y modificados de yuca es eficiente y sostenible. Para

elaborar casabe, harina y almidón pueden utilizarse opciones tecnológicas independientes o una instalación multipropósito. El almidón precoloidal y el acetilado pueden elaborarse a través de las propuestas presentadas utilizando procesos compactos, seguros y sostenibles que permiten producir aditivos de amplias perspectivas de aplicación como estabilizantes y facilitadores de suspensiones acuosas en la industria alimentaria y química.

Referencias bibliográficas

1. BEOVIDES, Y., MILIÁN, M. D., RODRÍGUEZ, D., GÁLVEZ, L., RODRÍGUEZ, K., FERNÁNDEZ, M. I., MOLINA, A., CAMEJO, M., ARCIA, O., MOREJÓN, Z., OLIVA, M., MOLINA, O., RAYAS, A. & BASAIL, M. Cultivares cubanos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) con rendimiento y potencial genético para la agroindustria. *Centro Agrícola* [en línea]. 2013, **40** (3), 71-78. ISSN 2072-2001 [consultado 15 Abril 2023]. Disponible en: http://cagricola.uclv.edu.cu/descargas/pdf/V40-Numero_3/cag123131934.pdf
2. PÉREZ, O. Procedimiento estratégico de desarrollo de procesos agroindustriales complementado con asimilación tecnológica aplicado a los productos de *Manihot esculenta* Crantz. Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, 2018.
3. PEÑARANDA, O. I., PERILLA, J. E. & ALGECIRA, N. A. Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos. *Revista ingeniería e investigación* [en línea]. 2008, **28** (3), 47-52. [consultado 15 Abril 2013]. DOI:10.15446/ing.investig.v28n3.15119
4. MIRMOGHTADAIE, L., KADIVAR, M. & SHAHEDI, M. *Effects of cross-linking and acetylation on oat starch properties*. *Food Chemistry* [en línea]. 2009, **116** (3), 709-713 [consultado 10 Abril 2024]. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.03.019
5. PÉREZ, O., LEY, N., GONZÁLEZ, E., VALDÉS, C. Modificación hidrotérmica del almidón de yuca para su empleo como estabilizador de helados. *AFINIDAD* [en línea]. 2017, **74** (580), 171-177. [consultado 15 Julio 2024]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/329842/420511>
6. PÉREZ, O., DE ARMAS, A., MARTÍNEZ, Y. & PÉREZ, A. Estrategia Innovativa en el estudio de alternativas de industrialización de la yuca como oportunidad de negocios. *Centro Azúcar* [en línea]. 2014, **41** (4), 59-66. ISSN: 2223-4861. [consultado 11 Diciembre 2023]. Disponible en: http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/273

7. PÉREZ, O., LEY, N. & GONZÁLEZ, E. Procedimiento estratégico de desarrollo de procesos agroindustriales complementado con asimilación tecnológica. *Centro Azúcar* [en línea]. 2021, **88** (1), 47-58. ISSN: 2223-4861 [consultado 7 Octubre 2024]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n1/2223-4861-caz-48-01-47.pdf>
8. PÉREZ, O., LEY, N., GONZÁLEZ, E., TOLEDO, L. C. Cinética y Distribución de Producto en la Acetilación de Almidón de bajo Grado de Sustitución. *AFINIDAD* [en línea]. 2018, , **75** (583), 204-211. [consultado 7 Agosto 2024]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/341935/432997>
9. PÉREZ-NAVARRO, O. LEY-CHONG, N.; GONZÁLEZ-SUÁREZ, E.; FERRAZ-NEGRÍN, Y.; TOLEDO-MARTÍNEZ, L. C. Determinación de condiciones de reacción y cinética en la acetilación de almidón de yuca. *Centro Azúcar* [en línea]. 2018, **45** (2), 88-100. ISSN: 2223-4861 [consultado 2 Noviembre 2024]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v45n2/caz09218.pdf>
10. PÉREZ, O., RODRÍGUEZ, Y., ACOSTA, A, LÓPEZ, I. Diseño óptimo económico de una planta de harina con secado neumático de pastas de *Manihot esculenta* Crantz. *Centro Azúcar* [en línea]. 2022, **49** (1), 81-94. ISSN: 2223-4861 [consultado 12 Octubre 2024]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v49n1/2223-4861-caz-49-01-81.pdf>
11. PÉREZ, O., ACOSTA, A., GONZÁLEZ, E., LEY, N. Optimum economic design of an acetylated gelatinized starch plant from *Manihot esculenta* Crantz. *Afinidad* [en línea]. 2022, **79** (596), 121-129 [consultado 12 Octubre 2024]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/401374/496540>
12. ACOSTA-SOLARES, A., PÉREZ-NAVARRO, O., PÉREZ DÍAZ, J. L. Optimum design of an acetylated starch plant from *Manihot esculenta* Crantz, variety *INIVIT-Y-93-4*. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia* [en línea]. 2024, 112, Julio-Septiembre, 34-44. [consultado 1 Diciembre 2024]. DOI:10.17533/udea.redin.20231238
13. ACOSTA-SOLARES, A., PÉREZ-NAVARRO, O., ALBERNAS-CARBAJAL, Y., CORTÉS FALCÓN, M. Potencialidades de la Metodología de la Superficie de Respuesta en la optimización experimental en la industria química y alimentaria. *Centro Azúcar* [en línea]. 2021, **48** (4), 123-138. [consultado 3 Diciembre 2024]. Disponible en: http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/684
14. RUIZ-GONZÁLEZ, A., GUERRA-BUSTILLO, C. W., MOREJÓN-MENA, Y., & MACHADO-AGUIAR, M. Metodología de Superficie de Respuesta como alternativa en la búsqueda de condiciones óptimas. *Revista Ciencia Universitaria* [en línea], (2018). **15** (1). 1-31. [consultado 5 Enero 2024]. Disponible en: <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/cu/article/view/989>
15. PÉREZ-NAVARRO, O., DUSTET-MENDOZA J. C., LEY-CHONG, N., GONZÁLEZ-SUÁREZ E., MIÑO-VALDÉS, J. E., LILIANA-HASE, S. Obtención y

propuesta tecnológica para almidón precoloidal proveniente de *Manihot esculenta* Crantz. *Afinidad* [en línea]. 2022, **79** (595). 201-208. [consultado 7 Febrero 2024]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/397270>

16. PÉREZ-NAVARRO, O., GONZÁLEZ-SUÁREZ, E., N. LEY-CHONG, N., DUSTET-MENDOZA, J. C. Diseño y escalado para gelatinización y acetilación de almidón proveniente de *Manihot esculenta* Crantz. *Afinidad* [en línea]. 2022, **79** (595) 209-217. [consultado 6 Marzo 2024]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/397463>

17. GONZÁLES, L. & ARÉVALO, S. Fabricación de polvillo ácido a partir de almidón de yuca. *Revista Amazónica de Investigación Alimentaria* [en línea], 2001, **1** (1), 49-53. [consultado 6 Junio 2024]. Disponible en: <https://enlinea.unapiquitos.edu.pe/pregrado/facultades/alimentarias/descargas/vol1/8.pdf>

18. ALARCÓN, F. & DUFOUR, D. Almidón Agrio de Yuca en Colombia. Tomo I: Producción y Recomendaciones. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Colombia, 1998. ISBN: 958-9439-67-5. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/rest/bitstreams/39063/retrieve#:~:text=El%20almid%C3%B3n%20agrio%20de%20yuca,manuales%20r%C3%BAsticos%20de%20fabricaci%C3%B3n%20casera.>

19. MONTOYA, S. & RAMÍREZ, J. S. Industrialización de la Yuca. Obtención de almidones nativos y sus aplicaciones. Universidad del Valle. 2007. Disponible en: https://www.academia.edu/35293438/INDUSTRIALIZACI%C3%93N_DE_LA_YUCA_Obtenci%C3%B3n_de_almid%C3%B3n_na_tivo_y_sus_aplicaciones

20. TORRES, P., RODRÍGUEZ, J. & ROJAS, O. Extracción de almidón de yuca. Manejo integral y control de la contaminación hídrica. *Livestock Research for Rural Development* [en línea]. 2005, **17** (7). [consultado 16 Julio 2024]. Disponible en: <http://www.lrrd.org/lrrd17/7/torr17074.htm>

21. PÉREZ, O., GONZÁLEZ, E., LEY, N., GARCÍA, L., Y MIÑO, J.E., Potencialidad técnico-económica para la producción de casabe en Cuba., + Ingenio, *Revista de Ciencia Tecnología e Innovación* [en línea]. 2019, **1**(2) 45-56. [consultado 16 Julio 2024]. Disponible en: <https://revistas.fio.unam.edu.ar/index.php/masingenio/article/view/164>

22. PÉREZ, O., RODRÍGUEZ, L. Selección de tecnologías para una planta de surtidos combinados de *Manihot esculenta* Crantz (yuca). *Centro Azúcar* [en línea]. 2024, **51**(1), 1-11. ISSN: 2223-4861 [consultado 22 Noviembre 2024]. Disponible en: http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/790/894

23. LEFNAOUI, S. & MOULAI-MOSTEFA, N. Synthesis and evaluation of the structural and physicochemical properties of carboxymethyl pregelatinized starch as a pharmaceutical excipient. *Saudi Pharmaceutical Journal* [en línea]. 2015, **23**, 698-711. DOI:10.1016/j.jsps.2015.01.021

24. TIJSEN, C.; SCHERPENKATE, E.; STAMHUIS, E.; BEENACKERS, A. Optimization of the process conditions for the modification of starch. *Chemical Engeneering Science* [en línea]. 1999, **54**, 2765-2772. [consultado 4 Septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009250998003212>
25. RODRÍGUEZ, L., ACOSTA, A., PÉREZ, O. Optimización económica para el diseño de una planta de surtidos combinados de *Manihot esculenta Crantz* por vía semi-mecanizada. *Centro Azúcar* [en línea]. 2024, **51**(1), 1-13. ISSN: 2223-4861 [consultado 10 Noviembre 2024]. Disponible en: http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/783/887
26. PÉREZ NAVARRO, O., GONZÁLEZ SUÁREZ, E., N. LEY CHONG, N., PÉREZ DÍAZ, J. L, TRIANA DÍAZ, Y. Functional and sensory evaluation of precolloidal starch from *Manihot esculenta Crantz* as a stabilizing agent. *Afinidad* [en línea]. 2022, **79** (597), 298-305. [consultado 4 marzo 2023]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/407941>

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Omar Pérez Navarro: conceptualización, metodología, investigación, redacción.

Erenio González Suárez: análisis formal, metodología, investigación,

Néstor Ley Chong: curación de datos, metodología, investigación, redacción