

# Diseño, construcción y optimización -mediante superficie de respuesta- de un proceso tecnológico artesanal para la extracción de almidón de *Manihot esculenta* grado FAO

Arsenio J. Rodríguez<sup>1\*</sup>, Richard Ulloa<sup>2</sup>, José Villalobos<sup>1</sup> & Raúl Albán<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fundación IDEA, Caracas-Venezuela. Email: arodriguez@idea.gob.ve;  
arseniorod@gmail.com

<sup>2</sup>Alcaldía de Caracas. Caracas-Venezuela.

<sup>3</sup>Universidad Bolivariana de Venezuela, Caracas-Venezuela.

---

## RESUMEN

La finalidad de este trabajo es mostrar cómo se diseñó, construyó y optimizó un proceso tecnológico (Matilda v1.0) involucrado en la extracción artesanal del almidón de yuca. Se obtuvo un rendimiento estimado de trabajo alrededor de 200 kg de yuca por día y de producción aproximada de 60 kg de almidón/día (con un rendimiento estimado óptimo de 32%). El uso de agua es de alrededor de 0,3 L/kg de yuca. La optimización se realizó mediante la metodología superficie de respuesta y el diseño experimental fue un factorial completo 2<sup>3</sup> Central Compuesto Box-Wilson, uniformemente rotatable y bloqueado ortogonalmente (por día). Se probaron diferentes tratamientos: tiempos de tamizados, tiempos de secado y tiempos de remoción del almidón durante su secado. Se obtuvieron los siguientes resultados: Tiempo de tamizado (45 min.); remoción del almidón (3 veces durante el periodo de secado) y tiempo de secado (4 h; 20 min) con un intervalo de temperatura de 40-60°C en el horno solar para un rendimiento máximo (31,83 %) y un intervalo de confianza de (30.24, 32.97) e intervalo de predicción de (27.98, 35.23).

**Palabras clave.**- extracción almidón, yuca, tecnología sustentable

## ABSTRACT

The purpose of this work is to show how a technological process (Matilda v1.0) was designed, constructed and optimized involved in the artisanal extraction of cassava starch. An estimated yield of about 200 kg of cassava per day and about 60 kg of starch / day (with an optimum estimated yield of 32%) was obtained. The use of water is about 0.3 L / kg of cassava. The

optimization was performed using the surface response methodology and the experimental design was a complete factorial  $2^3$  Box-Wilson Compound Central, uniformly rotatable and orthogonally blocked (per day). Different treatments were tested: sieving times, drying times and starch removal times during drying. The following results were obtained: Sieving time (45 min); Starch removal (3 times during the drying period) and drying time (4 h; 20 min) with a temperature range of 40-60 ° C in the solar furnace for maximum yield (31.83%) and one Confidence interval of (30.24, 32.97) and prediction interval of (27.98, 35.23).

**Key words.-** cassava starch extraction, low incoming technology

ISSN 1390-3004

Recibido: 30-08-2017

Acceptado: 15-10-2017

## INTRODUCCIÓN

La yuca es una planta cuya raíz provee alimento y sostén a más de 600 millones de personas en el mundo. Esta planta tolera sequías estacionales, suelos pobres y tiene la habilidad incomparable para recuperarse, después que los tallos y hojas han sido afectados por plagas y enfermedades (Dominguez *et al.*, 1983). La yuca es un cultivo muy accesible en Venezuela donde su mayor uso está en su consumo fresco, la producción de harinas y almidón. Ésta contiene más almidón por peso seco que cualquier otro cultivo alimentario. Lo cual hace a la harina de yuca idónea en la sustitución de alimentos de origen foráneo, y como sustitutos de los agentes gelificantes utilizados para la preparación de medios de cultivos.

Aunque la extracción de almidón de yuca se logra con tecnologías sencillas y manuales, son muy laboriosas, con consumos excesivos de agua y un rendimiento muy bajo (FAO, 2007).

En este artículo mostraremos el diseño, construcción y optimización de un proceso tecnológico (Matilda v1.0) que permite la obtención de almidón de yuca de bajo costo grado FAO, que logra un ahorro sustancial de agua, un rendimiento superior al promedio artesanal y de fácil operación y mantenimiento.

## METODOLOGÍA

### **Diseño y construcción del proceso tecnológico artesanal para la extracción de almidón de yuca**

Se evaluaron 73 artículos científicos, tesis de grado, proyectos de investigación y otras fuentes encontradas en internet en donde se contempló el diseño de prototipos de máquinas para la extracción de almidón de raíces y tubérculos tanto artesanal como semi-industrial. Se eligieron aquellos prototipos que contemplaron 2 o más criterios de diseño (poco uso de agua, tracción manual, elaborados con materiales de bajo costo, que cumpla con el proceso de extracción del almidón planteado por la FAO, que brindara seguridad al operador al momento de su uso, de fácil operación y

mantenimiento). Se consultaron a productores y artesanos de diferentes localidades que trabajaran con la extracción artesanal del almidón (Acosta, 2005).

### **Diseño, memoria técnica y construcción del sistema tecnológico para la extracción de almidón de yuca grado FAO (Matilda v 1.0)**

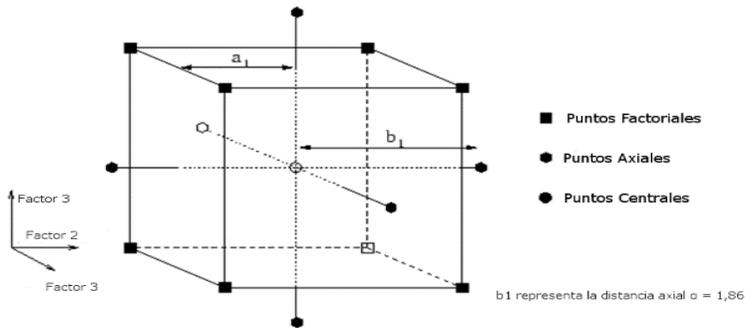
Luego de las revisiones exhaustivas, se realizaron los diseños previos de máquinas en bocetos a mano alzada que cumplieran con los criterios del proceso tecnológico de extracción de almidón de yuca (Acosta, 2005).

Para el diseño de la propuesta técnica se utilizó la metodología de gestión de proyectos (Domingo, 2005). En el proyecto técnico se describió: a) el problema técnico, b) la propuesta técnica previa, c) la memoria general, d) se trabajó en un Plano General que informó las dimensiones generales del sistema técnico elegido como solución. Esto se hizo mediante vistas (alzado, plantado, perfil) acotadas, que permitieron obtener un dibujo lo más simplificado y claro posible; y, e) también se trabajó en un Plano de conjunto que muestra las diferentes piezas que formaron el objeto y la colocación relativa de cada una de ellas. Se realizó un despiece donde se informa las características técnicas de cada pieza y es el más importante para afrontar la fabricación de las diferentes piezas.

Se realizaron pruebas de desempeño del prototipo "Matilda v 1.0" (rendimiento de extracción, rendimiento de trabajo, rendimiento del uso de agua) en las diferentes etapas de la extracción artesanal del almidón de yuca.

La optimización del proceso de producción del almidón de yuca utilizando el proceso tecnológico construido (método de superficie de respuesta SR). Una vez que se determinó las mejores condiciones de pelado y lavado de la yuca, así como el uso óptimo del agua, se procedió a la optimización del proceso de extracción, con énfasis en el tamizado (tiempo como factor 1) y secado en el horno solar (tiempo de rotación del material a secar como factor 2 y tiempo de secado como factor 3) del almidón obtenido siguiendo la metodología de superficie de respuesta (SR) (Box y Wilson, 1951).

El diseño de SR fue un factorial completo  $2^3$  (3 factores y 2 niveles) Central Compuesto Box-Wilson (DCC) bloqueado (por día), rotatable y bloqueado ortogonal ( $\alpha = 1,86$ ). El factor 1 fue el tiempo de tamizado con 2 niveles más el punto cero (20, 40 y 60 min; en unidades codificadas: -1, 0, +1); el factor 2 fue el tiempo de rotación del material durante el secado y dos niveles más el punto cero (2, 3 y 4 veces; unidades codificadas: -1, 0, +1). El factor 3 fue el tiempo de secado y los niveles más el punto cero fueron 2, 4 y 6 horas (en unidades codificadas: -1, 0, +1) (Figura. 1).



**Figura 1.** Modelo gráfico del diseño factorial DCC donde se aprecian los factores, los puntos factoriales, axiales y central,  $b_1$  representa la distancia axial  $\alpha = 1,86$

El ensayo se realizó en 3 bloques y se cometieron 42 corridas (tratamientos) en total (14 corridas por bloque o día). Este diseño constó de 6 réplicas del punto central, 8 puntos factoriales con 3 réplicas y 6 puntos axiales con dos réplicas cada uno, de esta manera se estimaba eficientemente el error experimental y el diseño era suficientemente robusto.

El siguiente fue el modelo de regresión estimado del diseño DCC (polinomial de segundo orden)

$$Y_{123} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_{12} + \beta_{22} X_{22} + \beta_{33} X_{32} + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \xi$$

(Ec. 1.)

Donde:

$Y_{123}$ : observación experimental;

$X_1$ : Tiempo tamizado del almidón;

$X_2$ : Tiempo de rotación del almidón durante el secado;

$X_3$ : tiempo de secado del almidón;

$\beta$ 's: Coeficientes de los factores;

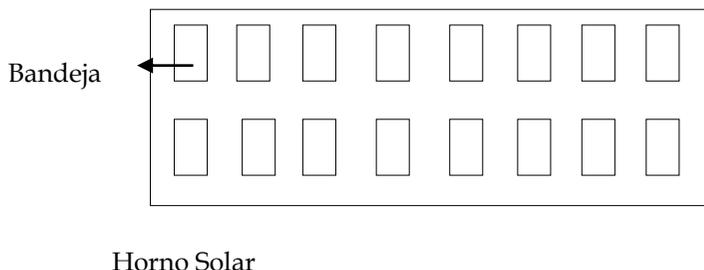
$\xi$ : Error experimental

Los coeficientes  $\beta$ 's se estimaron mediante el método de mínimos cuadrados.

La optimización de las condiciones donde se maximice el rendimiento, se realizó según el método de la función de deseabilidad (Harrington, 1965; Derringer y Suich, 1980; Derringer 1994).

Para el análisis estadístico se utilizó el software Desig Expert v7.15 (Easy-Stat, 2008). Cada bandeja en el secador solar se llenó con igual volumen hasta que todo el almidón obtenido en cada tratamiento del tamizado se utilizara (en

total 6 bandejas por tratamiento). De esta manera se multiplicó por 6 cada rendimiento obtenido por bandeja (Figura. 2).



**Figura. 2.** Esquema de la vista superior del Secador Solar donde se muestran la disposición de las bandejas o tratamientos por bloque.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Memoria Técnica, Descriptiva y Planos del prototipo de las máquinas para Extracción de Almidón de Yuca (MATILDA v 1.0.)

*Memoria descriptiva.*- El proceso consta de una serie de máquinas acopladas fueron capaces de extraer almidón de yuca bajo estándares artesanales y contemplando los siguientes criterios:

- Tracción manual.
- Elaborada con materiales de bajo costo.
- Que tenga un manejo óptimo del recurso agua.
- Que tenga un buen rendimiento de producción de almidón.
- Que el almidón obtenido cumpla con estándares de calidad necesarios para la elaboración de medios de cultivos alternativos.
- De bajo mantenimiento.

Simplificación del proceso de extracción artesanal de almidón de yuca (descrito en la Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca, FAO 2007), concentrando varias etapas en una o al menos dos máquinas, cumpliendo con el estándar descrito en el manual.

**Pruebas de desempeño del prototipo en la extracción artesanal del almidón y optimización mediante Superficie de Respuesta del tiempo de tamizado, tiempo de rotación del almidón durante secado y el tiempo de secado en el horno solar.**- Se realizó el cálculo de la carga de lavado y pelado por el tiempo de trabajo (6-8 h/día), y se obtuvo un rendimiento estimado de trabajo alrededor de 200 kg de yuca por día y de producción aproximada de 60 kg de almidón/día (con un rendimiento estimado óptimo de 32%). El uso de agua es de alrededor de 0,3 L/kg de yuca. Esto nos coloca por encima de las rallanderías artesanales que reportan un consumo de agua hasta 20 L/kg de yuca. Con respecto al rendimiento obtenido en almidón (32%), nos coloca en un punto medio entre el rendimiento semi-industrial (40-50%) y el rendimiento artesanal convencional (17-20%) (FAO, 2007).

**Optimización del proceso de producción del almidón de yuca utilizando el proceso tecnológico construido (método de superficie de respuesta).**- La humedad alcanzada por el secador solar estaba comprendida entre 20,3 y 30%, y un rendimiento de almidón entre 11,3 y 37,1 mínimo y máximo respectivamente. Se estimó en un 31,8 %, el rendimiento bajo condiciones de operación óptima. La humedad necesaria máxima de 12% no se pudo obtener, debido a las condiciones climáticas adversas.

**Evaluación de la calidad de ajuste del modelo.**- En el caso de la variable humedad, no fue significativo el modelo y los coeficientes de determinación fueron muy bajos, y se sugiere explorar esta deficiencia del modelo de ajuste en nuevos experimentos. Una posible explicación sería que se observó poca variación en la variable de respuesta (humedad) debido a las condiciones climáticas bajo las cuales se realizó el ensayo de secamiento. Por lo tanto, se plantea repetir estos experimentos para evaluar nuevamente la humedad garantizando que sea bajo condiciones atmosféricas apropiadas.

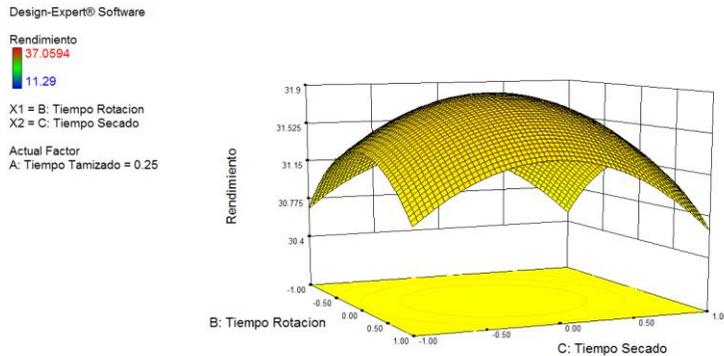
En el caso de la variable rendimiento, además de los componentes lineales, se apreció la presencia de términos cuadráticos y las interacciones tipo  $X_1X_2$  ( $p < 0,0001$ ). El término cúbico para el factor Tiempo de tamizado, aunque resultó significativo se eliminó por estar confundido. Además, el modelo cumple con los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia de los residuos (datos no suministrados). A pesar que no se obtuvo un secamiento satisfactorio, se optimizó la variable rendimiento incluyendo tiempo de secado y rotación del almidón. Esto se realizó debido a que se consideraron ciertas interacciones y efectos cuadráticos para garantizar la jerarquización del modelo. El modelo reducido y jerarquizado de Regresión Cúbica de DCC fue:

$$Y = 31,61 + 6,44X_1 + 0,08X_2 - 0,09X_3 - 4,06X_{12} - 0,60X_{22} - 0,59X_{32} + 0,03 X_1X_2 - 3,2X_1 X_{22}$$

El Análisis de Varianza (ANOVA) mostró que el modelo estimado para rendimiento es estadísticamente significativo ( $p < 0,0001$ ) y la carencia de ajuste resultó no significativa con un  $\alpha = 0,01$ , lo cual nos sugiere que el modelo y el orden del polinomio fue apropiado. El coeficiente de determinación simple y ajustado  $R^2 = 0,94$  y  $R_{adj}^2 = 0,92$ , respectivamente (la diferencia entre los dos no debería ser más de 0,2) sugirió que el modelo explicaba en más de un 90% la variabilidad presente en los datos.

**Proceso de optimización.**- Se eligió el Análisis Canónico para estimar las condiciones óptimas de trabajo para obtener un máximo rendimiento. Los puntos óptimos estimados son: (En unidades codificada 0,25; 0,05; 0,15) Tiempo de tamizado (45 min.); tiempo de remoción del almidón (3 veces durante el periodo de secado) y tiempo de secado (4 h 20 min) con un intervalo de temperatura de 40-60°C para un rendimiento máximo (31,83 %)

y un intervalo de confianza de (30.24,32.97) y un intervalo de predicción de (27.98,35.23) (Figura 3).



**Figura 3.** Superficie de respuesta (contornos y 3-D) del rendimiento en función del tiempo de secado y rotación del almidón.

### CONCLUSIONES

Se diseñaron y construyeron tres prototipos de máquinas para el procesamiento de las raíces de yuca con el objetivo de optimizar la extracción del almidón grado FAO.

A través de la evaluación del desempeño de este proceso (rendimiento de extracción, de trabajo, del uso de agua) se pudo verificar el ahorro sustancial de agua y el alto rendimiento del producto final para el cual se elaboraron las máquinas, tomando en cuenta la seguridad que brinda este sistema al operador y la facilidad de su manipulación, simplificando el proceso de extracción artesanal del almidón de yuca.

Se optimizaron tres parámetros (Tiempo de tamizado, tiempo de remoción del almidón durante el secado, tiempo de secado) del proceso de extracción artesanal (lavado/pelado, rallado/tamizado/sedimentado) de almidón de yuca, mediante la metodología de superficie de respuesta.

### REFERENCIAS

- Acosta, L.** 2005. *Guía práctica para la sistematización de proyectos y programas de cooperación técnica (FAO)*. Roma - Italia.
- Aristazábal, J. & T. Sánchez.** 2007. *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. Boletín de servicios agrícolas de la FAO. Roma - Italia.
- Box, G.E.P. & K.B. Wilson.** 1951. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 13(1): 1-45.
- Domínguez, C., L. Ceballos & C. Fuentes.** 1983. Morfología de la planta de yuca. Pp. 29-49. En: Domínguez, C. (Comp.) *Yuca: Investigación, Producción y Utilización*. CIAT. Cali - Colombia.