EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE VENTANA DE REFRACTANCIA EN EL SECADO DE ALMIDÓN DE YUCA FERMENTADO

ALBERTO CARVAJAL MARIN

JHONNATAN AGUIRRE ARGOTY

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

SANTIAGO DE CALI

2017

EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE VENTANA DE REFRACTANCIA EN EL SECADO DE ALMIDÓN DE YUCA FERMENTADO

ALBERTO CARVAJAL MARIN

JHONNATAN AGUIRRE ARGOTY

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros de Alimentos

DIRECTOR

CLAUDIA ISABEL OCHOA M., Ph.D.

CODIRECTOR

ALEJANDRO FERNÁNDEZ Q., Ph.D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

SANTIAGO DE CALI

2017

Agradecimientos y Dedicatoria

Dedico este documento a Gilda, Lisseth, Margarita y todos quienes me dieron su apoyo incondicional, además de brindarme una mano amiga cuando más lo necesitaba para llegar a esta etapa de mi vida, a mis mascotas omnipresentes durante todo mi proceso universitario: Manchas (QEPD), Mico y Nené. Sobre todo, dedico este documento a quienes no creían en mí; de no haber sido por ustedes no hubiera superado el escollo de la universidad y no hubiera llegado a tal punto

Agradecido inmensamente con las personas que aportaron con su conocimiento al proyecto, a mis directores Claudia Ochoa, Alejandro Fernández; también quien brindó ayuda de herramientas y facilitó acceso a los laboratorios, Rigo Magón. De no haber sido por ustedes, este proyecto no hubiera podido ser posible

Alberto Carvajal Marín

A Dios primero que todo, a Mis padres Hilda y Hernando, a mis hermanas y cada miembro de mi familia que hicieron parte de este logro y de todo este proceso. A mis directores de tesis quienes hicieron todo lo posible para que este proyecto diera luz. Así mismo, dedico este triunfo a todos aquellos que me apoyaron.

Jhonnatan Aguirre Argoty

Tabla de Contenido

1. Introducción 11

2. Marco Teórico 13

2.1 Almidón de yuca y almidón de yuca agrio 13

2.2 Secador de Ventana de refractancia (VR) 15

3. Antecedentes 17

4. Planteamiento del problema 20

5. Justificación 21

6. Objetivos 22

6.1 Objetivo General 22

6.2 Objetivos específicos 22

7. Materiales y Métodos 23

7.1 Equipo de secado y preparación de las muestras 23

7.2 Mediciones, recolección de muestras y análisis de laboratorio 23

8. Resultados y análisis 28

8.1 Cinética de secado 28

8.2 Prueba de gelatinización 34

8.2.1 Inicio de la gelatinización 35

8.2.2 Punto de viscosidad máxima 37

8.2.3 Inicio del periodo estático 40

8.2.4 Inicio del periodo de enfriamiento 41

8.2.5 Fin del periodo enfriamiento 42

8.2.6 Fin del periodo estático 43

8.3 Prueba de panificación 44

8.3.1 Masa del proceso de panificación 44

8.3.3 Volumen del proceso de panificación 45

9. Conclusiones 48

10. Recomendaciones 49

11. Bibliografía 50

12. Anexos 54

Anexo 1: Tabla de cinética de secado 54
Anexo 2: Resultados del Visco Amilógrafo 57
Anexo 3: Datos de la elaboración de pandeyucas 62

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de elaboración de almidón de yuca (Tomado de Wheatley et al. 2003) ..... **¡Error! Marcador no definido.**4

Figura 2. Diagrama esquemático de un secador VR (Tomado de Nindo, y Tang, 2007) 166

Figura 3. Diagrama esquemático de volumétro de hogazas. (Tomado de Vanhamel *et al.* 1991) 277

Figura 4. Curva de secado..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 5. Curva de tasa de secado para 55°C 289

Figura 6. Curva de tasa de secado para 50°C 299

Figura 7. Curva de tasa de secado para 45°C ..... **¡Error! Marcador no definido.**0

Figura 8. Ejemplo gráfica mostrada aplicación viscoamilógrafo Brabender® 35

Figura 9. Diagrama de cajas para el torque generado en el inicio de la gelatinización, gráfico de intervalos de confianza para inicio de gelatinización 366

Figura 10. Diagrama de cajas para la temperatura en el inicio de la gelatinización, gráfico de intervalos de confianza para inicio de gelatinización 377

Figura 11. Diagrama de cajas para el torque generado en el punto máximo de gelatinización, gráfico de intervalos de confianza para gelatinización máxima 38

Figura 12. Diagrama de cajas para la temperatura en la viscosidad máxima, gráfico de intervalos de confianza para la temperatura de la viscosidad máxima 39

Figura 13. Diagrama de cajas para el torque generado en el inicio del periodo estático, gráfico de intervalos de confianza para la misma característica 40

Figura 14. Vista ampliada de la gráfica mostrada por la aplicación Brabender®. Gráfica generada

por una muestra de almidón agrio patrón, gráfica generada por una muestra de almidón agrio secado en VR 41

Figura 15. Diagrama de cajas para el torque generado en el inicio del periodo enfriamient, gráfico de intervalos de confianza para la misma característica..... 422

Figura 16. Diagrama de cajas para el torque generado en el fin del periodo enfriamiento, gráfico de intervalos de confianza para la misma característica 433

Figura 17. Diagrama de cajas para el torque generado en el fin del periodo estático, gráfico de intervalos de confianza para la misma característica..... 44

Figura 18. Diagrama de cajas para la masa medida del proceso de panificación, gráfico de intervalos de confianza para la misma característica..... 455

Figura 19. Diagrama de cajas para el volumen medido del proceso de panificación, gráfico de intervalos de confianza para la misma característica..... 466

Figura 20. Diagrama de cajas para el volumen medido del proceso de panificación, gráfico de intervalos de confianza para la misma característica..... 477

Lista de Tablas

Tabla 1. Artículos relacionados con almidón 177

Tabla 2. Usos de la tecnología de Ventana de Refractancia (VR)..... 188

Tabla 3. Diseño experimental..... **¡Error! Marcador no definido.**5

Tabla 4. Ecuaciones de la linealización de la figura 6 31

Tabla 5. Tiempo necesario para llevar a cabo el secado de almidón de yuca agrio 322

Tabla 6. Comparación de tiempo teórico y experimental en la deshidratación de VR ..... **¡Error! Marcador no definido.**3

Tabla 7. ANOVA de variable independiente masa final..... **¡Error! Marcador no definido.**3

Tabla 8. ANOVA de variable independiente humedad final 333

Tabla 9. Resultados por triplicado cinética de secado a 55°C..... 54

Tabla 10. Resultados por triplicado cinética de secado a 50°C..... 55

Tabla 11. Resultados por triplicado cinética de secado a 45°C..... 56

Tabla 12. Resultados de muestras de almidón a 1 hora de sol 57

Tabla 13. Resultados de muestras de almidón a 2 horas de sol..... 59

Tabla 14. Resultados de muestras de almidón a 3 horas de sol..... 61

Tabla 15. Resultado de muestras de almidón patrón..... 63

Tabla 16. Resultado de muestras de pandeyuca de almidón secado 1 hora al sol..... 63

Tabla 17. Resultados por triplicado cinética de secado a 55°C..... 64

Tabla 18. Resultados por triplicado cinética de secado a 55°C..... 65

Tabla 9. Resultados por triplicado cinética de secado a 55°C..... 66

RESUMEN

Se investigó el efecto combinado de secado al sol y secado con ventana de refractancia de almidón de yuca agrio de la variedad *SM1495-5*. El almidón agrio se obtiene fermentando el almidón dulce, con el objetivo de cambiar su estructura fisicoquímica; como consecuencia disminuye su perfil de gelatinización y aumenta su capacidad de expansión para elaborar productos de panificación. Se secó el almidón agrio húmedo durante 1, 2 y 3 horas al sol, posteriormente se secó en un secador de ventana de refractancia a 45, 50 y 55 °C hasta alcanzar una humedad promedio en base húmeda de 12%. Se evaluó la cinética de secado en una ventana de refractancia y se evaluó el perfil de gelatinización del producto seco. Se encontraron diferencias significativas en el perfil de gelatinización en los tratamientos empleados. Adicionalmente se realizó una prueba de panificación comparando la capacidad de hinchamiento de los almidones. Se demostró que el almidón expuesto al sol durante 3 horas y secado a 55 °C fue el único que no presentó diferencias significativas respecto a la capacidad de expansión del almidón agrio deshidratado al sol completamente.

Palabras Clave*: ventana de refractancia, SM1495-5, almidón agrio, perfil gelatinización, prueba de panificación.*

ABSTRACT

The combined effect of methodology using sun drying and refractance window using mandioca sour starch of variety *SM1495-5* was developed. Sour starch is obtained by fermenting the sweet starch of the mandioca, searching for change his physical chemical structure; as consequence, his gelatinization profile decrease, but increase his capability of expansion useful for breadmaking. The wet sour starch was sun-dried 1, 2 and 3 hours, then the starch was dried until 12% of humidity (wet basis) in a refractance window using 45, 50, 55 °C. The drying kinetics was developed for the refractance window drying, and the gelatinization profile once the starch was dry was evaluated. Significant differences were found in the gelatinization profile in all evaluated stages. Moreover, a breadmaking test was carried out comparing the capability of starch swell. It was shown that the starch who was 3 hours sun-dried and dried in refractance window at 55°C was the only who didn't show significate differences regard the full sun-dried starch.

Keywords*: refractance window, SM14955, sour starch, gelatinization profile, breadmaking test.*

1. Introducción

La yuca pertenece a la familia *euphorbia (Euphoriaceae)*. Existen dos especies comestibles de las especies del género *Manihot: Manihot ultissima Phol y Manihot palmata* (yuca "amarga" y "dulce", respectivamente). Esta clasificación está basada en la presencia de cianuro en las raíces (Breuninger *et al.,* 2009). La raíz de yuca aporta gran cantidad de carbohidratos, su mayoría en forma de almidón. Está en cuarto lugar en los alimentos que más calorías aporta en la dieta humana en las regiones tropicales del mundo, ya que se consume en una gran variedad de formas (Wheatley *et al*., 2003).

Breuninger *et al.* (2009) describe el almidón de yuca agrio como un producto fermentado naturalmente durante aproximadamente 30 días, y posteriormente secado al sol. Los alimentos elaborados con este almidón modificado poseen propiedades únicas, tales como un alto volumen específico, alta expansión en el horneado y de crujencia. Las propiedades reológicas mejoradas se cree que se deben a la degradación oxidativa de ácidos orgánicos y a la irradiación ultravioleta; estas propiedades se observan únicamente en los productos horneados con almidón de yuca acidificado e irradiado (almidón de yuca agrio), característica que no se logra con el almidón de maíz. Además, Breuninger *et al.* (2009) advierte que investigaciones realizadas por Bertolini *et al*. (2000) y Demiate *et al*. (2000) han demostrado que ciertas longitudes de onda ultravioleta son esenciales para mejorar la capacidad de horneado del almidón de yuca acidificado, por ejemplo, longitudes de ondas cortas como de los rayos ultravioleta (B y C), son esenciales para aumentar la capacidad de expansión durante el horneado de las masas de almidón acidificado.

El almidón húmedo una vez fermentado, se extiende en el suelo sobre un plástico y se deja de 24 a 48 horas al sol. Debido a las altas posibilidades de contaminación que tiene este método de elaboración, se requiere otro que proporcione mayor inocuidad durante el proceso de deshidratación, y además que sea más eficiente.

La técnica de Ventana de Refractancia, es un método de secado de película fina que fue desarrollado para secar materiales líquidos y pastosos (Magoon, 1986). Esta tecnología usa agua caliente a presión atmosférica como medio de transmisión de energía térmica al material a deshidratar. En este método de secado, la energía térmica del agua caliente se transfiere al

material húmedo depositado como una delgada película sobre una banda transportadora plástica. La banda se mantiene en contacto con el agua caliente, lo que permite un proceso de secado más rápido (Nindo *et al*., 2007). El producto se seca en pocos minutos, contrario a procesos de secado al sol o con aire caliente que pueden durar varias horas. El secado por Ventana de Refractancia presenta ventajas sobre otras tecnologías puesto que expone al producto a temperaturas menores y los productos finales mantienen buenas cualidades sensoriales. La tecnología es relativamente económica y el equipo es simple de operar y mantener (Abonyi *et al*., 1999).

Particularmente, el proceso de secado depende del contenido de humedad inicial y final del producto, la sensibilidad a la temperatura, y el tamaño de partícula del material que será secado (Jayaraman and Gupta, 2014; Levy and Borde, 2014). Así, el objetivo de este trabajo fue encontrar la combinación ideal entre tiempo de secado al sol y temperatura utilizada en la ventana de refractancia, la cual proporcione un almidón agrio deshidratado con características similares al producto secado completamente al sol.

2. Marco Teórico

2.1 Almidón de yuca y almidón de yuca agrio

La yuca es nativa del continente americano. Actualmente se cultiva en todos los países tropicales y subtropicales, siendo Tailandia, Indonesia, India, Brasil, Zaire y Nigeria los mayores productores. La producción total en el mundo en 2013 alcanzó 276.67 millones de toneladas, distribuida en América (10.93%), África (57.09%), Asia (31.88%) y Oceanía (0.10%). Colombia aportó 8.21% de la producción total del continente (FAO, 2013).

La yuca es altamente perecedera; por esta razón, las raíces deben ser procesadas. Los métodos de procesamiento de la yuca varían ampliamente de acuerdo a la región (Spencer, 2005). El procesamiento de la yuca tiene muchos objetivos: obtener un producto estable que pueda almacenarse en ambientes tropicales por periodos extensos, sin reducir su calidad o frescura; reducir las cantidades de cianuro a niveles inocuos; reducir su humedad para disminuir costos de transporte; diversificar los alimentos, haciendo expansión en el mercado; y proveer alimentos y otros usos industriales con un material de bajo costo para futuro procesamiento (Wheatley *et al*., 2003).

Aunque la yuca es un producto con una alta cantidad de carbohidratos, sólo 5% del almidón total se comercializa mundialmente, lo que representa entre 0.8 y 1.0 millón de toneladas/año. Muchas plantas a pequeña escala de extracción de almidón de yuca operan en el sur y sur-este de Asia y en América Latina. El almidón de yuca tiene diferentes usos, entre ellos la preparación de alimentos (pasabocas y bizcochos) además de otros usos industriales (manufactura de papel), dependiendo de su composición y sus propiedades funcionales (Breuninger *et al*., 2009).

En Brasil y Colombia, el almidón húmedo se fermenta antes de secarse, obteniendo un almidón naturalmente modificado, el cual tiene propiedades funcionales que difieren del almidón nativo de yuca, teniendo la capacidad de expansión durante el horneado. Este almidón se utiliza en muchos productos de panadería tradicional con queso (pandebono, pandequeso, bizcochos) y, además también en pasabocas (Wheatley *et al*., 2003).

El procesamiento de la raíz de yuca para obtener almidón (o almidón agrio) inicia con un lavado y pelado (algunas veces únicamente se remueve la corteza exterior), posteriormente se raya la

raíz para liberar los gránulos de almidón (Figura 1). El almidón se extrae con una corriente de agua y se separa de la fibra y otros componentes de las raíces por tamizado. El almidón sólido es separado de una torta almidón/agua por sedimentación o centrifugación y posteriormente se seca a una humedad final entre 12-14%. El secado se realiza comúnmente al sol en operaciones a pequeña escala y con un secador neumático en plantas a gran escala. Para obtener almidón agrio, el almidón sedimentado se deja en tanques durante 20-30 días antes del proceso de secado. Mientras que una planta a pequeña escala procesa entre 2 y 10 toneladas de yuca por día, las operaciones de gran escala en Brasil y Tailandia pueden manejar alrededor de 200 toneladas por día. La extracción de almidón tiene tasas alrededor de 18-22% y 20-25% para plantas a pequeñas y grandes respectivamente, dependiendo de la eficiencia del proceso y del contenido inicial de almidón de la yuca. En plantas pequeñas, las operaciones se hacen manualmente o parcialmente automatizadas. En Colombia, 45% del almidón contenido en las raíces se pierde en el agua de desperdicio durante el proceso, o se queda en la cáscara y la fibra, la cual se seca y se usa para alimento de animales (Wheatley *et al*., 2003).

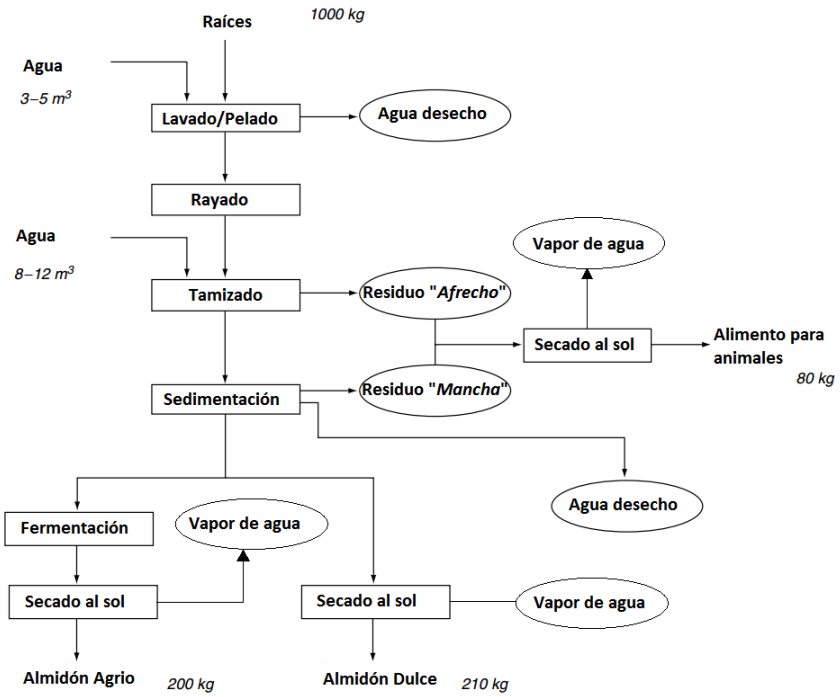

Figura 1. Diagrama de flujo de elaboración de almidón de yuca (Tomado de Wheatley *et al.* 2003)

El almidón fermentado o agrio tiene un poder de expansión excelente; por consiguiente, el volumen de una masa que contiene este almidón aumenta significativamente durante el proceso de horneado. Aunque muchos factores afectan el poder de expansión del almidón agrio, incluyendo condiciones ambientales, variedad de yuca y calidad del agua, los factores que más influyen son la fermentación y el secado al sol.

Investigaciones han demostrado que la luz solar (en especial ciertas longitudes de onda dentro del espectro UV), además de una fermentación de bacterias lácticas son esenciales para el incremento de capacidad de expansión del grano de almidón de yuca (Bertolini *et al.* 2001; Cardenas & de Buckle. 1980; Dufour *et al.* 1996). En un estudio sobre la modificación oxidativa del almidón de yuca junto con el ácido láctico y deshidratado al sol, se obtuvo un incremento del volumen especifico de las masas de almidón una vez horneadas (Mestres & Rouau. 1997; Plata-Oviedo & Camargo. 1998).

2.2 Secador de Ventana de refractancia (VR)

El secador de Ventana de Refractancia consiste en una banda sin fin de poliéster que es transparente a la radiación infrarroja (película de Mylar®), la cual transporta el producto de 0.2 – 1 mm de espesor. La banda flota en una superficie de agua caliente sobre un canal de poca profundidad. Así, el calor sensible del agua se transfiere por conducción y radiación al material a través de la banda. El material se desplaza a lo largo del secador mediante la banda transportadora con una velocidad ajustable, dependiendo de la arquitectura del equipo, o en su defecto, la banda puede permanecer estática. Así, en todas las superficies donde el material cubre la banda, se crea una ventana para el paso de la energía infrarroja, en la que la refracción en la interfaz banda- material se minimiza. A medida que el contenido de humedad disminuye en el proceso de secado, la ventana infrarroja se cierra gradualmente, predominando la conducción como mecanismo de transferencia de calor. Debido a que la banda plástica es débil conductora de calor, se transfiere poco calor al material casi seco, de esta manera el riesgo de recalentamiento se reduce considerablemente (Nindo, Tang, 2007; Kudra y Mujumdar, 2009). En la Figura 2 se presenta el esquema del secador de Ventana de Refractancia.

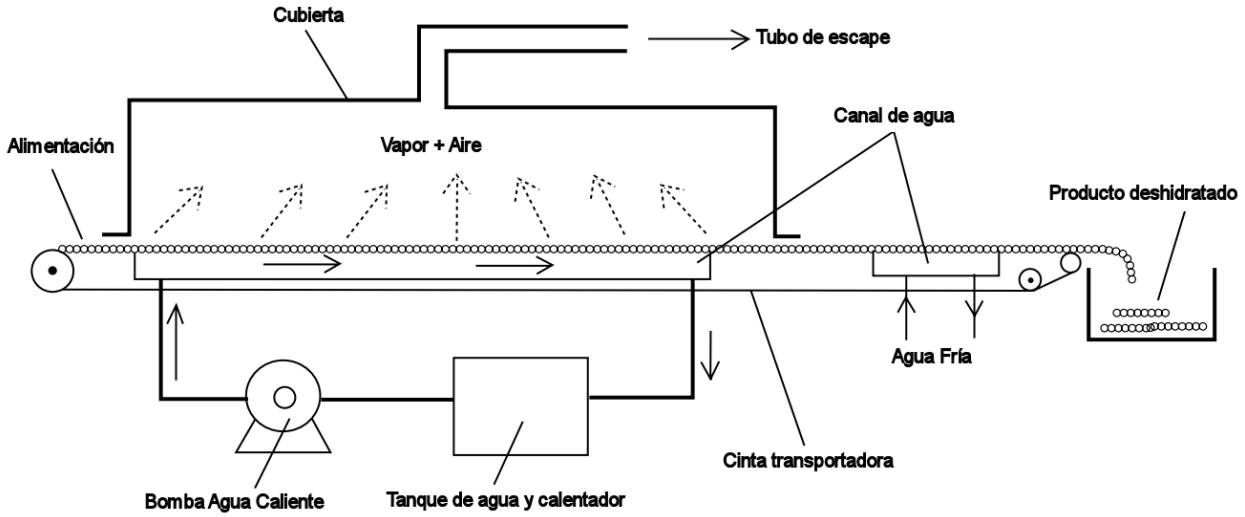

Figura 2. Diagrama esquemático de un secador VR (Adaptado de Nindo y Tang. 2007)

3. Antecedentes

En la Tabla 1 se resumen los resultados más relevantes de investigaciones relacionadas con secado de almidón de yuca y en la Tabla 2 se muestran artículos relacionados con la tecnología de secado con Ventana de Refractancia.

Tabla 1. Artículos relacionados con secado de almidón de yuca

Título	Autores/año	Descripción
Agglomeration mechanisms of cassava starch during pneumatic conveying drying	Aichayawanich *et al*. (2011)	Se investigaron los mecanismos de aglomeración del almidón de yuca empleando secado neumático convectivo. Se determinaron las temperaturas de gelanitización y cristalización para varios contenidos de humedad. Para investigar las transiciones de fase del almidón de yuca, se secó almidón utilizando un secador neumático a escala. Se varió la temperatura (120, 160 y 200°C), y se midió contenido de humedad y distribución de tamaño de partícula del almidón a través del tubo de secado. El estudio mostró que, al inicio del proceso de secado, la temperatura del almidón fue más alta que su temperatura de transición de cristalización, indicando que el almidón estaba en su fase de gelatinización. Posteriormente, el almidón cambia de fase de gel a estado cristalino. La aglomeración del material particulado ocurrió con el almidón en fase de gelatinización.
Combined effect of fermentation, sun-drying and genotype on breadmaking ability of sour cassava starch	Maldonado *et al*. (2013)	Se analizó la habilidad de expansión de almidón de yuca agrio utilizando 13 tipos de genotipos de yuca de Colombia. Se analizó el almidón con 0 a 30 días de secado al sol. La viscosidad del almidón regular fue de 952 cP y del almidón nativo fermentado y secado al sol fue de 699 cP. Los contenidos de amilosa en el rango de 15.7 a 21.7% se relacionaron con la capacidad de expansión del almidón de yuca agrio (3.0-8.6 mL/g).
Drying of starch suspension in spouted bed with inert particles: Physical and thermal analysis of	Pereira *et al*. (2010)	Se realizó secado en secador de lecho fijo a chorro por sus ventajas y versatilidad, siendo una alternativa al secado instantáneo (flash) y de aspersión. Se realizó un estudio de una suspensión de almidón de yuca (35% de sólidos iniciales) en un modelo a escala de un secador de lecho fijo a chorro cónico con partículas de polipropileno. El estudio se centró en la dinámica del fluido de las partículas de polipropileno con valores iniciales de temperatura de 60, 75 y 90°C y los efectos

product		de la temperatura del aire en las propiedades del almidón, como temperatura de gelatinización, temperatura de daño estructural, distribución de tamaño de partícula, perfil de cristalización y humedad final. Los resultados mostraron que las temperaturas del aire influyeron en la humedad final, que fue menor a 13% en todas las condiciones. Por otro lado, las propiedades físicas del almidón seco no se afectaron por condiciones del proceso.
Tunnel Dryer and Pneumatic Dryer Performance Evaluation to Improve Small-Scale Cassava Processing in Tanzania	Precoppe *et al*. (2015)	Se realizó un análisis comparativo de dos secadores (secador de túnel y secador neumático) que son de bajo costo inicial, y de fácil mantenimiento y uso para los pequeños agricultores. Se realizó el balance de masa y de energía. Se encontró que la eficiencia energética del secador de túnel fue de 29% y del secador neumático fue de 46%. Para el secador de túnel las pérdidas de calor fueron por el aire insaturado, mientras que las pérdidas del secador neumático fueron por radiación y convección.

Tabla 2. Usos de la tecnología de Ventana de Refractancia (VR)

Título	Autores/año	Descripción
Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window (VR)	Zotarelli *et al.* (2015)	El objetivo del estudio fue investigar el efecto de las variables de proceso del secador VR empleando pulpa de mango: temperatura de agua (75, 85 y 95°C), espesor del producto (2, 3 y 5mm) y fuente radiante (película Mylar® incolora o pintada). Se determinó que la película Mylar® incolora permitió el paso de la radiación infrarroja, mientras que la pintada absorbió toda la radiación infrarroja. La capacidad de evaporación del secador VR fue de 10 $kgm^{-2}h^{-1}$ con pulpa de 2 mm y agua a 95°C siendo el más eficiente. Se estableció además que la transferencia de calor por radiación contribuye menos del 5% de toda la energía que aporta al alimento durante el proceso de VR.
Quantitative understanding of Refractance Window drying (VR)	Ortiz-Jerez *et al.* 2015	El estudio buscó hacer un compendio acerca de la tecnología de secado por VR. El compendio sugiere que el uso de una lámina delgada de plástico que es transparente permite el paso de radiación infrarroja, la cual crea una "ventana" para la radiación térmica del agua al material húmedo. Esta "ventana" se cierra gradualmente mientras el material se deshidrata para

		prevenir que éste alcance la temperatura de ebullición del agua. Se sugiere que la transferencia de calor por radiación no es uno de los procesos dominantes para aumentar la velocidad de secado. Los autores utilizaron muestras de calabaza; y concluyeron que las muestras más delgadas a baja temperatura crean espacios de aire entre el producto y la lámina plástica, el cual reduce el flux de calor del agua caliente. Como consecuencia, la calidad del producto final se conserva, comparada con otras técnicas de secado.
Refractance Window drying of pomegranate juice: Quality retention and energy efficency (VR)	Baeghbali *et al.* 2015	Se estudiaron las características de calidad del jugo de toronja concentrado y secado utilizando VR. Se comparó con liofilización y secado por aspersión. Se empleó jugo de toronja concentrado a 64 ºBrix mezclado con goma arábiga (35% base seca). Se compararon las propiedades fisicoquímicas; demostrando que secado por VR produce productos de más alta calidad respecto a los demás, además el consumo energético del secador VR es alrededor de 1/3 y 1/40 menor que el secado por aspersión y liofilización, respectivamente.

4. Planteamiento del problema

En la mayoría de los países productores de almidón agrio, se utiliza la técnica de secado al sol debido al bajo costo de esta técnica, además las propiedades reológicas de expansión se deben a la degradación oxidativa de ácidos orgánicos y a la irradiación ultravioleta. Esta técnica es ineficiente y obsoleta, y conlleva a la falta de inocuidad del producto, largos tiempos de secado y baja productividad. La mayoría de agricultores utiliza esta técnica para cumplir las demandas de producto, resultando en altos costos de producción. Es posible que al combinar el secado al sol con otra técnica de secado se obtenga el almidón agrio con buenas características reológicas y se reduzcan los problemas antes mencionados.

De lo anterior, surge la siguiente pregunta: ¿Cuál es la combinación de secado al sol (tiempo) y secado con VR (tiempo y temperatura) que permite obtener un almidón agrio deshidratado cuya calidad (capacidad de hinchamiento, gelatinización) sea comparable con el almidón agrio deshidratado al sol?

5. Justificación

Este trabajo se realiza con el fin de establecer el tiempo de exposición al sol mínimo necesario y la temperatura óptima de secado de almidón agrio utilizando un secador de Ventana de Refractancia. Dicho equipo es de fácil manejo, limpieza; por otro lado, el costo de adquisición del equipo y de operación es relativamente bajo. Se buscan alternativas para que los agricultores puedan reemplazar su tecnología artesanal de deshidratación por una mucho más eficiente que aumente su productividad y sus ingresos, y además mejore la calidad y la inocuidad del proceso. Es importante mejorar las técnicas de procesamiento de almidón de yuca para evitar las grandes pérdidas de materia prima (CIRAD. 2015), y tener mayor crecimiento industrial.

Para los pequeños agricultores, adquirir una VR les resultaría asequible, ya que tiene bajos costos de mantenimiento, tiene una capacidad de proceso apropiada, además es fácil de operar, tecnificar el campo, por lo tanto mejorar la productividad. Los secadores que están disponibles para pequeños agricultores están en etapas tempranas de desarrollo, sus eficiencias energéticas son bajas y el resultado es un producto de baja calidad (Da *et al*., 2013).

6. Objetivos

6.1 Objetivo General

✧ Evaluar el efecto del secado combinado (Solar-Ventana de Refractancia [VR]) sobre la capacidad de hinchamiento y gelatinización del almidón agrio.

6.2 Objetivos específicos

✧ Evaluar el efecto de la temperatura sobre la velocidad de secado del proceso de deshidratación de almidón agrio en VR.

✧ Comparar la capacidad hinchamiento, gelatinización del almidón agrio deshidratado con secado combinado solar-VR, respecto al almidón de yuca agrio deshidratado al sol.

7. Materiales y Métodos

7.1 Equipo de secado y preparación de las muestras

Se empleó un secador de Ventana de Refractancia® (VR) ubicado en la Escuela de Ingeniería de alimentos de la Universidad del Valle (Figura 2). Se utilizaron 10 kg almidón agrio húmedo de la variedad *SM1495-5*, obtenida de la empresa Deliyuca. Este almidón se almacenó a 5°C.

Para el secado inicial al sol, se empleó 9 kg de almidón repartidos en muestras de 1 kg y se expusieron al sol durante 1, 2 o 3 horas (de acuerdo al diseño experimental), posteriormente se realizó el proceso de secado en el secador de Ventana de Refractancia. El almidón restante se utilizó para realizar las cinéticas de secado. Para las muestras patrón, se utilizó almidón agrio previamente deshidratado en la empresa Deliyuca en el departamento del Cauca; este almidón fue deshidratado al sol durante 10 horas.

7.2 Mediciones, recolección de muestras y análisis de laboratorio

7.2.1 Cinética de secado

Se determinó la humedad de la muestra húmeda según el método ISI 01-01e descrito por International Starch Institute (1964); se distribuyó una muestra de 5.000 ± 0.001 g en un vidrio de reloj, y se secó en un horno precalentado a 130°C, durante 90 minutos. Se trasladó a un desecador durante 30 a 40 minutos, y se pesó nuevamente. La Ecuación 1 se utiliza para el cálculo de humedad.

$$\%h = \frac{(w_2 - w_0)}{(w_1 - w_0)} \cdot 100\% \qquad (1)$$

Donde w_0 es el peso del vidrio de reloj; w_1 es el peso de del vidrio de reloj con la muestra de almidón inicial; w_2 es el peso del vidrio de reloj con la muestra de almidón deshidratada; y h es la humedad del producto.

Para el estudio de cinética se utilizó un equipo de VR de laboratorio (un baño termostático marca PolyScience y una lámina Mylar® de dimensiones 33x18 cm), el tanque del baño termostático fue llenado a rebosar con agua de grifo, para que esta hiciera contacto directo con la lámina

Mylar®. Durante el secado se pesó la lámina con la muestra de almidón cada 5 minutos durante 1 hora utilizando una balanza marca Ohaus Adventurer precisión ± 0.01g. Para determinar el contenido de humedad en cada tiempo se utilizó la Ecuación 2.

$$\%h = \frac{W_t - W_0(1 - X_i)}{W_t} \times 100\% \quad (2)$$

Donde W_t es el peso del almidón en un tiempo *t*; W_0 es el peso del almidón en el tiempo 0; X_i es la fracción de humedad inicial; y *h* es la humedad total del producto.

7.2.2 Deshidratación en VR

En la banda transportadora del secador de VR se dispuso una muestra de almidón (previamente secado al sol de acuerdo al diseño experimental) de 5.00 ± 0.02 mm de espesor y una dimensión con contacto constante con agua de 65x43cm. La muestra se pasó previamente por un colador común de cocina para evitar grumos y distribuir mejor la muestra sobre la banda. La temperatura del agua en el secador VR se controló ajustando la unidad de calentamiento para 45.0, 50.0 y 55.0 ± 0.1 °C, de acuerdo al diseño experimental. El secado se realizó hasta una humedad final menor o igual a 13% (Breuninger *et al.* 2009). Para corroborar la humedad durante la deshidratación se realizaron periódicamente mediciones de humedad con una balanza infrarroja marca Mettler LJ16 (método recomendado por International Starch Institute). El almidón seco resultante se almacenó en frascos de vidrio herméticos a temperatura ambiente en un lugar fresco y seco; en el Anexo 1 se muestran los resultados de la deshidratación.

7.2.3 Diseño experimental

Se realizó un diseño factorial completamente aleatorizado. Se analizó el efecto de dos factores, temperatura del agua en el secador VR y tiempo de exposición al sol del almidón agrio, con tres niveles cada uno. Se realizaron 3 réplicas. En Tabla 3 se presenta el diseño experimental.

Para el análisis de datos se realizaron pruebas de comparación múltiple-Post ANOVA, para distribución normal estándar (n > 30) y se utilizó un nivel de confiabilidad del 95%. Para la elaboración de los datos estadísticos fue utilizado el software “R”

El modelo asociado al experimento con 2 factores se muestra en la Ecuación 7.

Tabla 3. Diseño experimental

Factores	Niveles	Variables de respuesta	Tratamientos
Tiempo exposición sol (h)	1 2 3	Humedad Capacidad de hinchamiento Perfil de gelatinización	3^2 # de réplicas: 3 # de experimentos: 27
Temperatura del agua (ºC)	45 50 55		

$$Y_{ijz} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijz} \begin{cases} i = (1,2,3)a \\ j = (1,2,3)b \end{cases} \quad (3)$$

Donde Y_{ijz} es el valor aleatorio que toma la variable respuesta en la *z-ésima* réplica que ha sido expuesta al *j-ésimo* nivel del factor β y al *i-ésimo* nivel del factor α; μ es el parámetro de centralidad o efecto medio general; α es la temperatura del agua en la ventana de refractancia (i= *45*, 50, y 55) *°C;* β es el tiempo de exposición al sol del almidón (j= *1*, 2 y 3) horas y *z* es el número de réplicas; α_i es el efecto debido al *i-ésimo* nivel del factor α; β_j es el efecto debido al *j-ésimo* nivel del factor β; $(\alpha\beta)_{ij}$ es el efecto debido a la interacción entre los factores α y β: $\mathcal{E}_{ijz}$ es el efecto debido al error experimental.

Las interacciones del modelo se describen en la ecuación 8.

$$Y_{ijz} = \mu + \sum_{i=1}^{a} \alpha_i + \sum_{j=1}^{b} \beta_j + \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijz} \quad (4)$$

7.2.4 Prueba de gelatinización

Se determinó la capacidad de gelatinización del almidón de acuerdo al manual de usuario del Micro Visco-Amylograph Brabender. El equipo se programó con un incremento gradual de temperatura de 7.5°C min^{-1}. Se usó una disolución de almidón y agua destilada al 10% en un contenedor de 130mL. Cuando la temperatura de la solución alcanzó 90°C se siguió mezclando y se mantuvo la temperatura durante 5 minutos. Posteriormente se enfrió hasta 50°C (también a

una velocidad de 7.5°C min^{-1}); a esta temperatura la solución se mantuvo alrededor de 2 minutos. Durante el procedimiento se observan: A (Inicio de gelatinización), B (Viscosidad máxima), C (Inicio del periodo de tiempo estático), D (Inicio del periodo de enfriamiento), E (Fin del tiempo enfriamiento), F (Fin del periodo de tiempo estático) en función del torque (BU) y la temperatura (°C). El equipo reporta la gráfica de comportamiento del almidón (Anexo 2).

7.2.5 Prueba de panificación

Se preparó una solución de almidón al 46% en moldes metálicos, con el siguiente procedimiento: se pesó el almidón en el recipiente en una balanza analítica (marca RADWAG) con una precisión ± 0.001g, luego se añadió agua destilada en una pipeta graduada con una precisión ± 0.1mL (hasta 22 mL), posteriormente se mezcló la solución con una varilla de agitación. Este procedimiento se realizó por triplicado. Las tres mezclas se introdujeron en un horno (marca Binder) de convección natural precalentado a 260°C durante 30 minutos; posteriormente se dejaron en un desecador durante 15 minutos.

Una vez se enfriaron, se pesaron las muestras en la balanza analítica, y se midió el volumen utilizando el método de desplazamiento de volumen propuesto por Vanhamel *et al.* (1991) utilizando un medidor de volumen de hogazas, y semillas de chía, la herramienta tiene una precisión de ± 2 mL (Figura 3); los resultados de las mediciones realizadas están en el anexo 3.

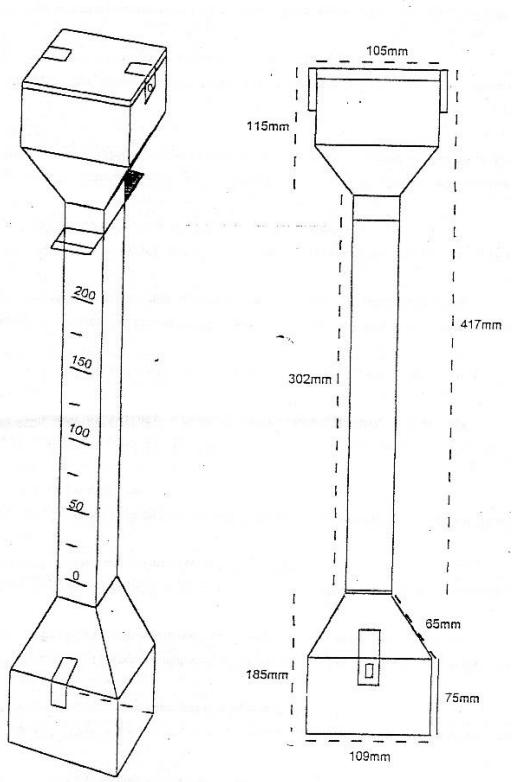

Figura 3. Diagrama esquemático del medidor de volumen (adaptado de Vanhamel *et al.* 1991)

8. Resultados y análisis

8.1 Cinética de secado

En la Figura 4 se muestra la cinética de secado del almidón de yuca en el secador de VR sin secado al sol (en el Anexo 1 se presentan los valores de cada experimento). Se aprecia que, a mayor temperatura del agua de secado, se obtiene mayor pérdida de humedad. Después de 1 h de secado no se llegó a la humedad de equilibrio.

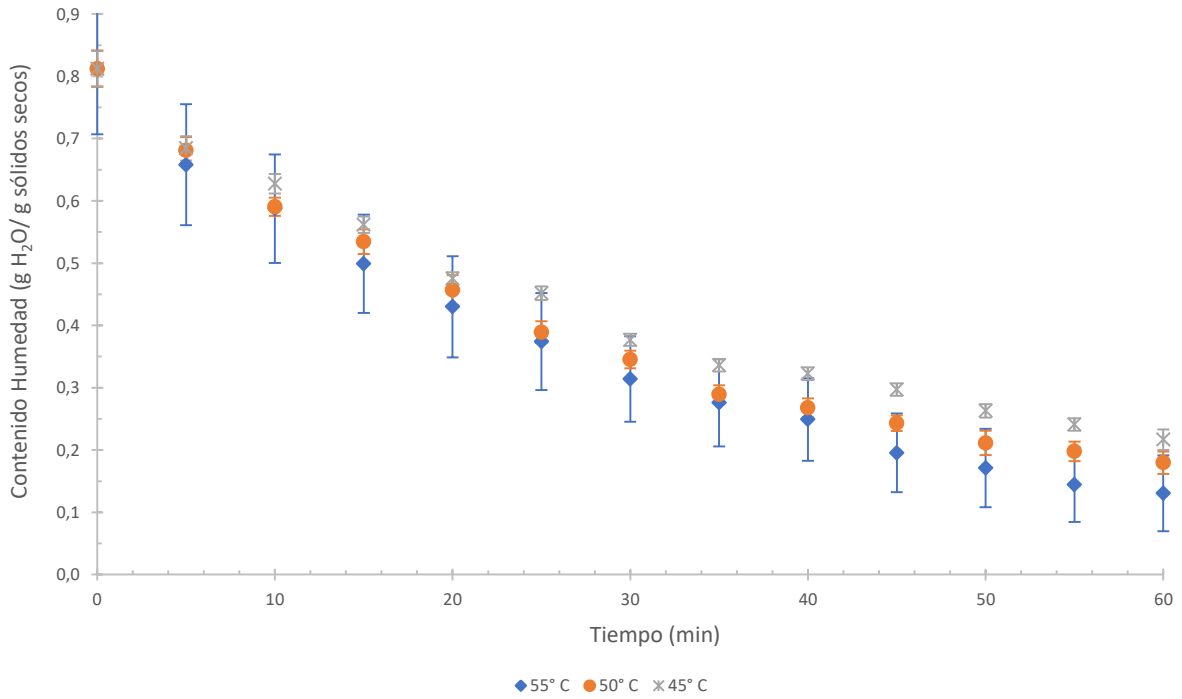

Figura 4. Curva de secado

Las Figuras 5 a 7 muestran el comportamiento de la tasa de secado para 45, 50, 55°C respectivamente (ΔX/Δt vs promedio humedad base seca).

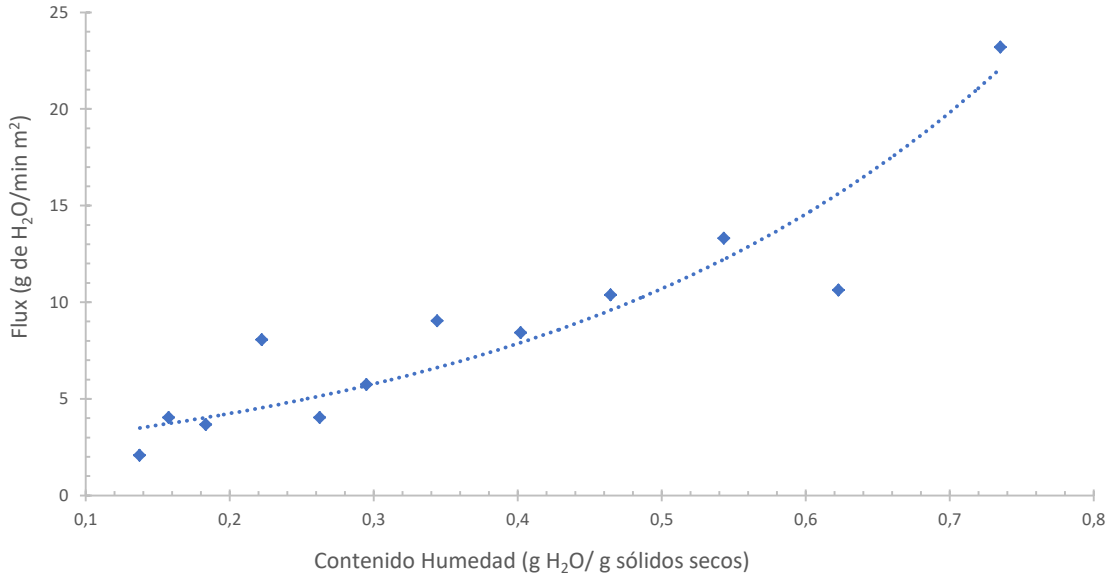

Figura 5. Curva de tasa de secado para 55°C

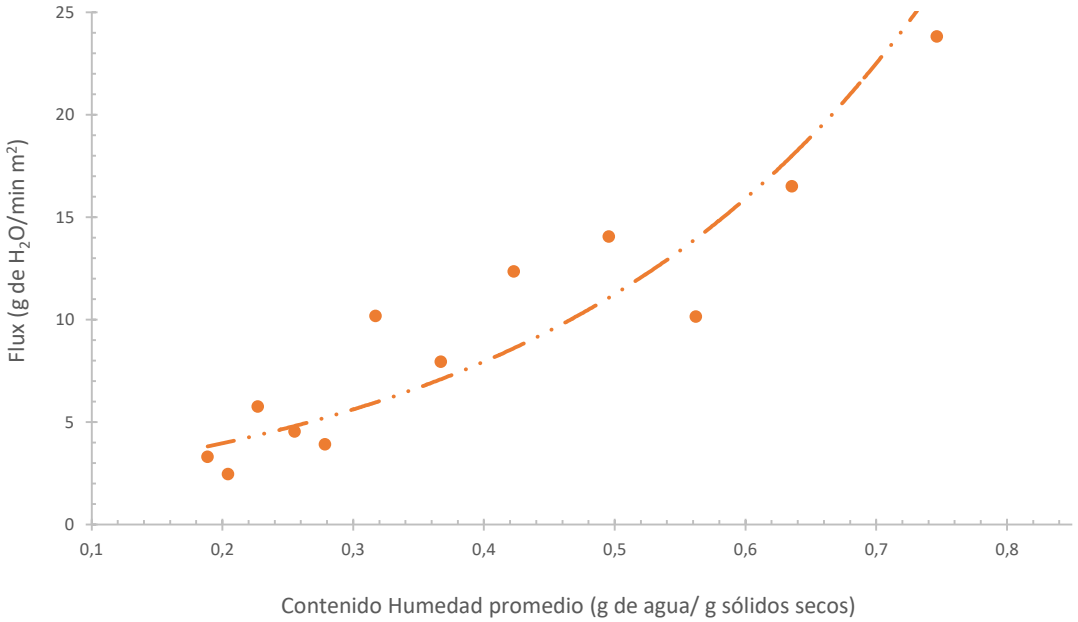

Figura 6. Curva de tasa de secado para 50°C

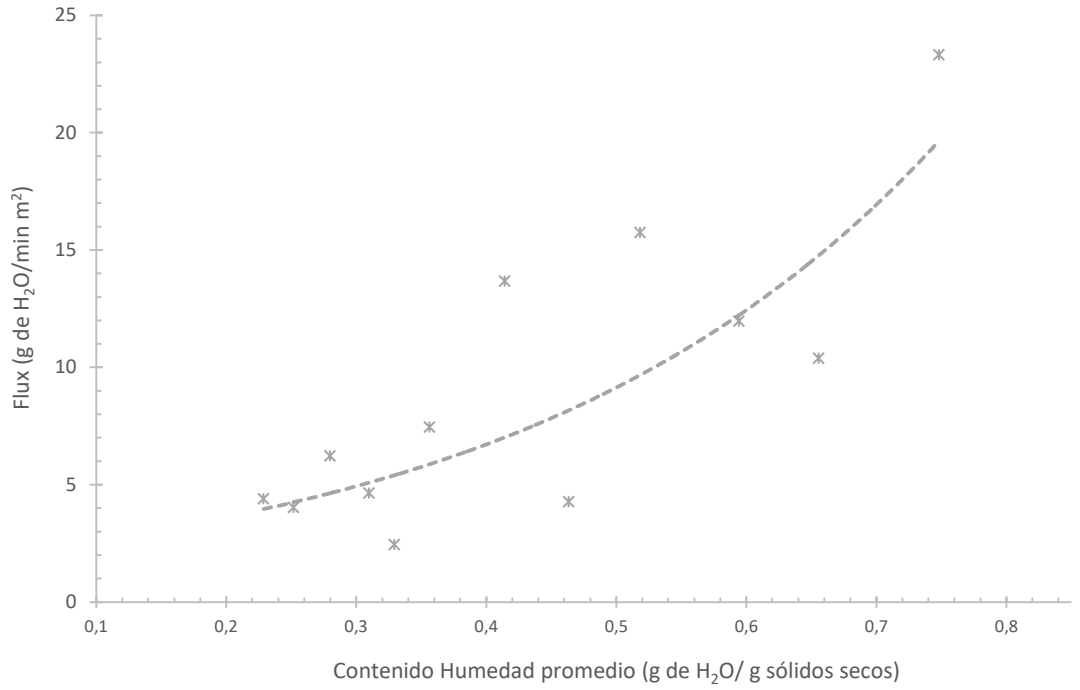

Figura 7. Curva de tasa de secado para 45°C

Se observa que para las tres temperaturas no se presenta el periodo constante al principio del proceso de deshidratación. Este periodo la energía térmica se transfiere de la superficie caliente a la superficie del producto, mientras que el vapor de agua se transfiere del producto al exterior, es común cuando hay una alta cantidad de agua libre en un producto (Singh y Heldman. 2009). El almidón de yuca agrio húmedo, desde el principio presenta una tasa de secado decreciente, donde cada vez se requiere más energía para deshidratar el producto. Vale la pena aclarar, durante los intervalos de tiempo evaluados durante la deshidratación del producto, en algún momento del proceso pudo haber sucedido el periodo constante de deshidratación entre el tiempo 0 y 5 minutos del proceso, en este intervalo de tiempo no se conoce el comportamiento experimental del almidón de yuca agrio.

Se empleó la ecuación 9 para realizar la predicción de tiempo de secado a 45, 50 y 55°C respectivamente a continuación:

$$t = \frac{m_s}{A} \int_{h_2}^{h_1} \frac{1}{R} dx \quad (9)$$

Donde *t* es el tiempo necesario para conseguir un contenido de humedad (min); m_s, es la masa de sólidos secos (g); *A* es el área superficial de la muestra (m^2); *h* es el contenido de humedad en base seca (g de H_2O/g de sólidos secos); y *R* es el flux en función de la humedad (*x*) (g de H_2O/ min m^2.).

Se empleó la ecuación 10 para realizar el cálculo del porcentaje error relativo del tiempo de deshidratación a 45, 50, 55°C a continuación:

$$\%ER = \frac{V_m - V_t}{V_t} \times 100 \quad (10)$$

Dónde *%ER* es el error relativo; V_m es el valor experimental medido (min); V_t es el tiempo que se realizó la deshidratación en VR (min)

Para utilizar esta ecuación se ha elaborado una línea de tendencia exponencial; las ecuaciones generadas por la línea de tendencia para cada temperatura se muestran en la Tabla 4 con su respectivo coeficiente de correlación (R^2.).

Tabla 4. Ecuaciones de la linealización de la Figura 6

Temperatura de deshidratación (°C)	Ecuación a partir de la gráfica	R^2
55	$R = 2.2906e^{3.0829x}$	0.8056
50	$R = 1.9840e^{3.4693x}$	0.8095
45	$R = 1.9569e^{3.0825x}$	0.5920

Para validar las ecuaciones de velocidad en función de la humedad (Tabla 4), se calculó el tiempo empleando la Ecuación 9 con los valores de h_1 y h_2, experimentales (humedad inicial y final) del proceso de secado (el tiempo debe ser cercano al tiempo experimental de 60 minutos). Los resultados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Tiempo necesario para llevar a cabo el secado de almidón de yuca agrio

Temperatura de deshidratación (°C)	**h_1 (g de H_2O /g de sólidos secos)**	**h_2 (g de H_2O /g de sólidos secos)**	**Solución ecuación**	**Tiempo (min)**	***%ER***
55	0.74	0.14	$-0.142e^{-3.0829x}$	59.0	1.7
50	0.75	0.19	$-0.145e^{-3.4693x}$	58.5	2.5
45	0.75	0.23	$-0.166e^{-3.0825x}$	59.4	1.0

Se puede observar que los porcentajes de error relativo son bajos, a pesar que haya valores de R^2 que muestren que los datos se encuentran dispersos, especialmente en la deshidratación a 45°C, donde es el R^2 más bajo de los tres tratamientos; cuando valores de dispersión son muy bajos tiende a existir más error relativo, ya que al interpolar los datos la curva no pasa por los puntos. Pero, a pesar de esta dispersión, al realizar el cálculo de predicción de tiempo de deshidratación para llevar el producto de una humedad en base seca A, a una B, es cercano al valor teórico que llevó a cabo para deshidratar (60 minutos), por lo tanto, la ecuación de la línea de tendencia exponencial de las Figuras 5 a 7 se puede utilizar para realizar cálculos aproximados con precisión.

Con la información obtenida de la tabla 5, fue posible determinar el tiempo requerido para deshidratar almidón de yuca agrio, luego de 1, 2 o 3 horas, de un área rectangular de 0.28 m^2 (área de deshidratación VR) con una altura promedio de 5mm; la humedad inicial del almidón de yuca era conocida, fue medida previamente con el método ISI 01-01e, las humedades correspondientes para cada tratamiento se muestran en la tabla 6, se buscó deshidratar el almidón agrio mínimo a una humedad de 0.14 g H_2O/ g; los resultados de predicción de tiempo y el tiempo real utilizado se muestran en la Tabla 6

Tabla 6. Comparación de tiempo teórico y experimental en la deshidratación de VR

Tiempo de secado al sol (h)	Temperatura VR (°C)	Humedad inicial (g H_2O/ g sólidos)	Materia Seca (g)	Tiempo teórico (h)	Tiempo Experimental (h)	Error (%)
1	45	0.68	531	2.8	2.9	5.0
1	50	0.66	540	2.4	2.6	7.3
1	55	0.70	513	2.3	2.5	8.1
2	45	0.53	585	2.6	2.9	10.4
2	50	0.55	581	2.3	2.4	3.7
2	55	0.51	594	2.2	2.3	5.9
3	45	0.45	621	2.5	2.7	11.0
3	50	0.47	612	2.2	2.5	12.2
3	55	0.43	630	2.0	2.2	6.8

En las Tablas 7 y 8 se muestran los ANOVAs de la cinética de secado para la variable independiente de masa final y humedad final, respectivamente.

Tabla 7. ANOVA de análisis de Varianza (Masa Final)

Fuente	GL	Suma Cuadrados Ajustado	Cuadrados Medios Ajustado	Valor F	Valor P
Temperatura	2	8.743	4.3713	26.50	0.000
Horas Sol	2	18.646	9.3231	56.53	0.000
Temperatura x horas sol	4	8.574	2.1434	13.00	0.000
Error	72	11.875	0.1649		
Total	80	47.837			

Tabla 8. ANOVA análisis de varianza

Fuente	GL	Suma Cuadrados Ajustado	Cuadrados Medios Ajustado	Valor F	Valor P
Tiempo	12	1.01564	0.084637	1707.92	0.000
Temperatura	2	0.03159	0.015797	318.77	0.000
Tiempo x Temperatura	24	0.01046	0.000436	8.80	0.000
Error	78	0.00387	0.000050		
Total	116	1.06156			

De las Tablas 7 y 8 se puede concluir que existe diferencia significativa entre las temperaturas ya que el valor de P es menor que 0,05. Por lo tanto, al utilizar una temperatura de 55 °C al deshidratar el almidón de yuca representa una diferencia significativa respecto a 45 y 50 °C.

8.2 Prueba de gelatinización

Se evaluaron las muestras secadas al sol (1, 2, o 3 h) combinadas con secado en VR (45°C, 50°C o 55°C). El proceso en VR se realizó hasta obtener 0.14 de humedad base seca (tiempo aproximado de 2.6 horas).

En el Anexo 2 se muestran todos los datos relevantes obtenidos la prueba en el viscoamilógrafo. A continuación, se analizan los resultados según su varianza; para facilitar el análisis se ha asignado la siguiente nomenclatura:

A: muestra patrón de almidón agrio secada al sol (10 h)

B: almidón secado 1 hora al sol, y secado a 45° C en VR

C: almidón secado 2 horas al sol, y secado a 45° C en VR

D: almidón secado 3 horas al sol, y secado a 45° C en VR

E: almidón secado 1 hora al sol, y secado a 50° C en VR

F: almidón secado 2 horas al sol, y secado a 50° C en VR

G: almidón secado 3 horas al sol, y secado a 50° C en VR

H: almidón secado 1 hora al sol, y secado a 55° C en VR

I: almidón secado 2 horas al sol, y secado a 55° C en VR

J: almidón secado 3 horas al sol, y secado a 55° C en VR

En la Figura 8 se muestra un ejemplo de la información obtenida en el viscoamilógrafo Brabender® de la primera réplica del tratamiento B superpuesta con la gráfica de la primera réplica de la muestra patrón. Deben tenerse en cuenta los seis puntos importantes en el proceso que se muestran en las líneas verticales de la Figura 8: Inicio de gelatinización, Viscosidad máxima, Inicio del periodo estático, Inicio del periodo de enfriamiento, Fin del periodo de enfriamiento y Fin del periodo estático. En cada uno de estos puntos se realizó un análisis estadístico (mostrado en diagramas de cajas y gráficos de intervalos de confianza), con el fin de analizar las diferencias entre los tratamientos estudiados (B-J) y la muestra patrón (A).

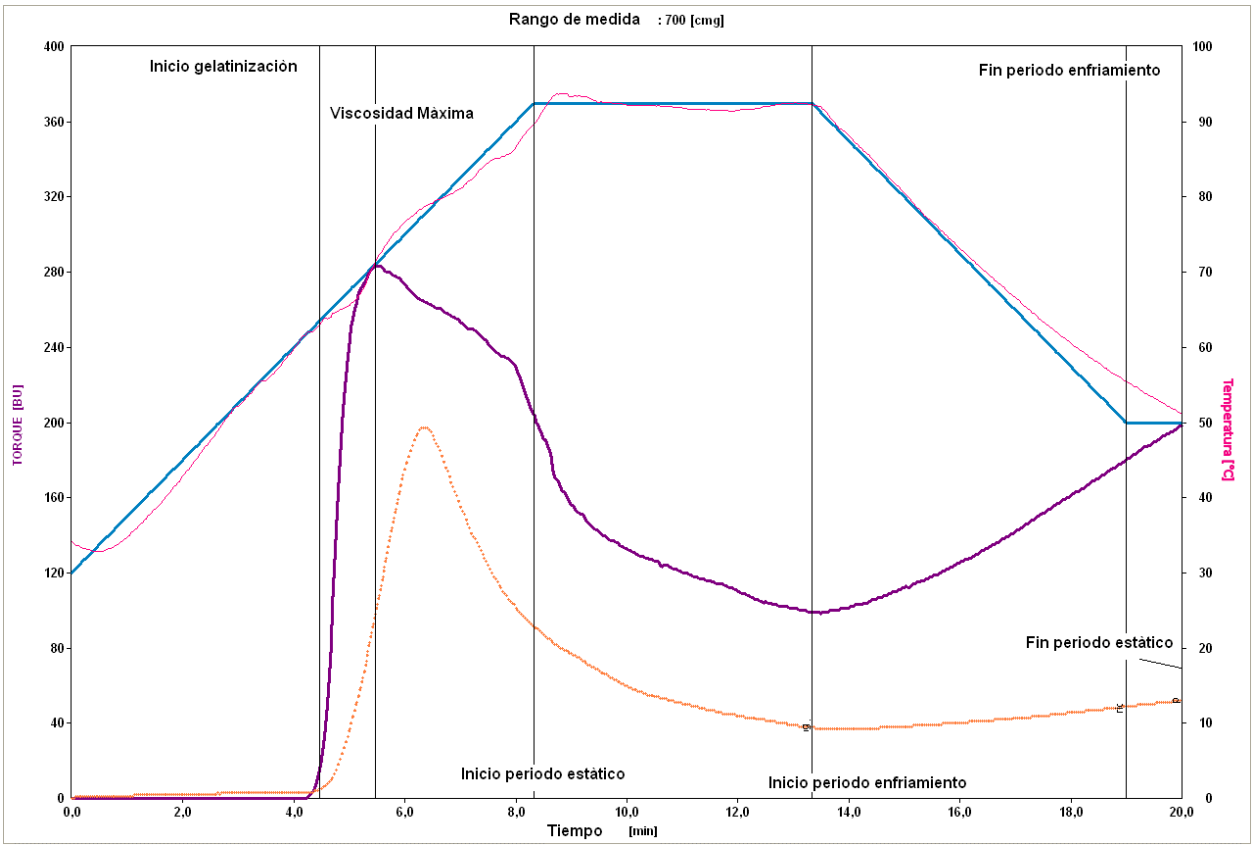

Figura 4. Ejemplo de curva de empastamiento, tratamiento B réplica 1 (Púrpura) vs muestra patrón réplica 1 (Naranja)

8.2.1 Inicio de la gelatinización

En la Figura 9 (izquierda) se observan los resultados correspondientes al inicio de gelatinización de las soluciones de almidón agrio estudiadas, mostrando el torque (BU) (Unidades Brabender) de cada tratamiento (B-J) respecto al patrón (A). En la Figura 9 (derecha) se presenta el gráfico de intervalos de confianza, con el objetivo de analizar la significancia.

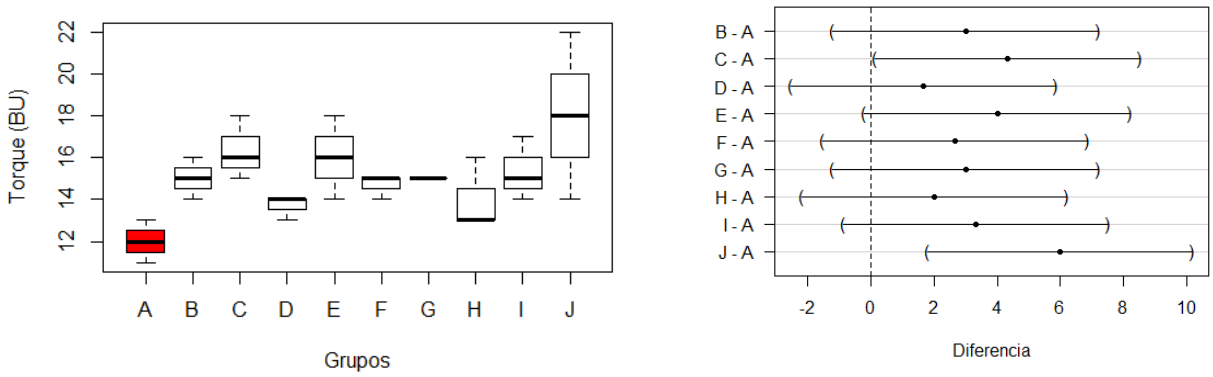

Figura 5. Efecto del tratamiento de secado sobre el torque generado en el inicio de la gelatinización. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

En la Figura 9 (izquierda), se observa que A (patrón) posee valores más bajos de torque ejercido que los demás tratamientos; y sólo los tratamientos D y H se acercan ligeramente al tope de máximo valor del tratamiento A. Pero, al observar el gráfico de intervalos de confianza en la Figura 9 (derecha), sólo el tratamiento J (3h de sol-55°C en VR) tiene diferencia significativa con el patrón A (el grupo C es significativo). Así, estadísticamente todos los caracteres del A a I son iguales. Evidencia de este comportamiento está en el estudio de Onitilo *et al.* (2007) mencionan que el almidón agrio modifica su estructura durante el calentamiento, y por lo tanto su viscosidad, mientras más tiempo es dejado al sol menor viscosidad adquiere como se observa en el tratamiento patrón (A).

En la Figura 10 se muestra el comportamiento de la temperatura asociada al torque cuando inicia la gelatinización (Temperatura 2) en un diagrama de cajas y de intervalo de confianza.

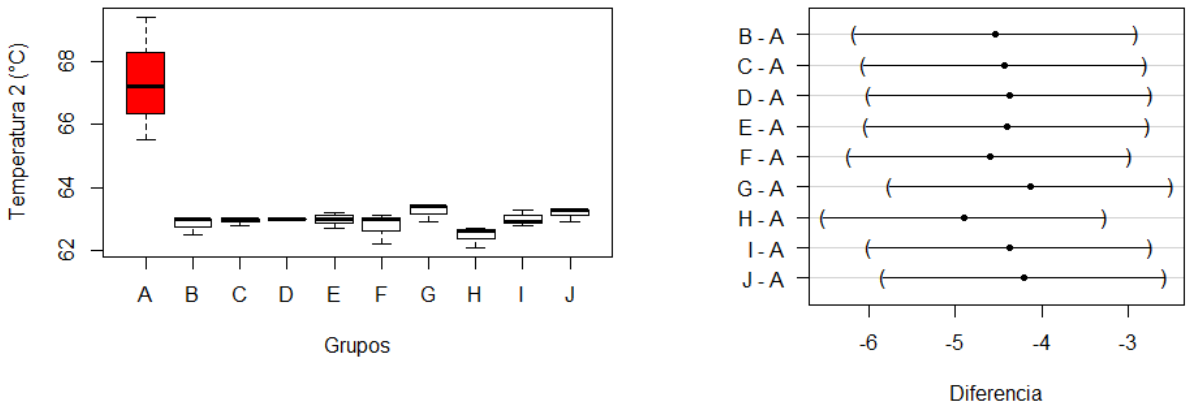

Figura 6. Efecto del tratamiento de secado sobre la temperatura en el inicio de la gelatinización. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

En la Figura 10 (izquierda) se observa que la temperatura de inicio de gelatinización para la muestra patrón A es mucho mayor que para los demás tratamientos. En la Figura 10 (derecha), se observa que existe una diferencia significativa de todos los tratamientos respecto a la muestra patrón, evidenciando que el almidón agrio secado con la combinación sol-VR requiere menos temperatura para el inicio de la gelatinización (hinchamiento de los gránulos de almidón)

Para los almidones de tubérculos y raíces, según Launay B. *et al.* 1986 muestran un incremento acelerado en la viscosidad durante el calentamiento y tienen un mayor pico de viscosidad que en los almidones de cereales comunes; el almidón de papa tiene el mayor pico de viscosidad mientras que el almidón de trigo tiene el menor pico de viscosidad entre los almidones comunes (maíz, trigo, yuca, papa)

8.2.2 Punto de viscosidad máxima

En la Figura 11 se presenta el análisis de los tratamientos A-J cuando las muestras alcanzaron el punto de viscosidad máxima respecto a su torque:

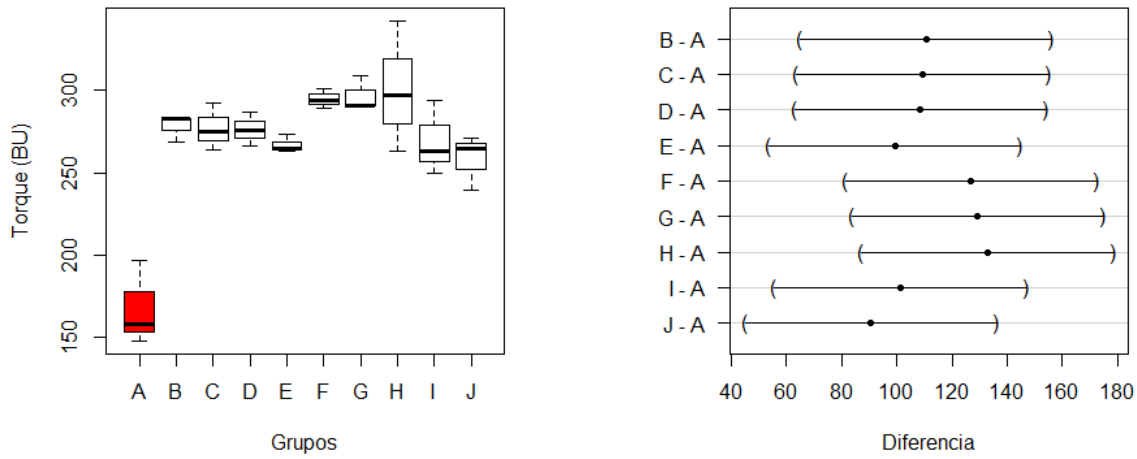

Figura 7. Efecto del tratamiento de secado sobre el torque generado en el punto máximo de gelatinización. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

Esta etapa es el pico de viscosidad que puede llegar a tener los almidones; los almidones de papa, yuca y almidones cerosos tienen un punto mayor respecto al almidón regular de maíz. Por otro lado, los almidones de tubérculos y cerosos les ocurre su rompimiento de los gránulos a menor tiempo respecto a los almidones de cereales AUTOR P304. En la Figura 11, se nota una diferencia significativa de todos los grupos respecto al patrón; pero entre los tratamientos B-J no existen diferencias significativas según se puede notar en el diagrama de cajas (izquierda).

En la Figura 12 se presenta el comportamiento de la temperatura máxima alcanzada cuando el almidón agrio llegó a su viscosidad máxima.

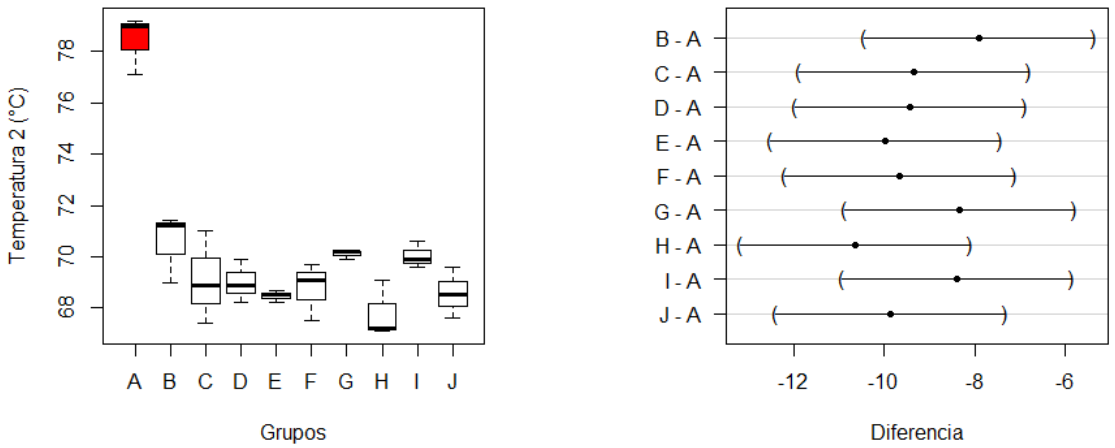

Figura 8. Efecto del tratamiento de secado sobre la temperatura en la viscosidad máxima. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

Una vez más se observa una diferencia significativa entre todos los tratamientos respecto al patrón; esta vez ha sido mayor la diferencia de temperatura que requiere el almidón para llegar a la viscosidad máxima durante el proceso de gelatinización. El almidón sometido al proceso combinado sol-VR requiere menor temperatura para alcanzar su viscosidad máxima que el almidón sometido únicamente a secado al sol (patrón). Un estudio elaborado por Callejo *et al*. 2016, al utilizar harina de trigo fuerte y débil (mayor y menor contenido de gluten respectivamente) individualmente y con mezcla de harina roja y blanca de teff (planta de semilla comestible) evidenció que para los productos que tuvieran una mayor viscosidad, el producto elaborado luego de la panificación sería de un volumen mucho mayor respecto a los productos con menor viscosidad. Similar sucede con el almidón de yuca agrio; el estudio realizado por Maldonado *et al*. 2013, muestra que para los bollos elaborados con almidón de yuca agrio secados únicamente por horno de convección natural, tenían menor volumen respecto a los bollos elaborados con el almidón secado totalmente al sol. Se puede inferir de la figura 12, si hubo el mismo comportamiento de viscosidad del producto, cuando el almidón se deshidrata al sol por más tiempo, este aumenta su viscosidad, y por lo tanto mejora la expansión de los productos.

8.2.3 Inicio del periodo estático

El inicio del periodo estático ocurre cuando la solución ha sido sometida a un estrés por las altas temperaturas, entonces el almidón se hincha en su máxima expresión; al subir la temperatura a 90 °C el almidón rompe su estructura por ser internamente una solución hipertónica, entonces la viscosidad disminuye considerablemente (Wheatley *et al*. 2003).

En este punto se estudia el estrés del almidón y su retrogradación. En la Figura 13 se muestra el comportamiento del almidón en cuanto a su torque en el inicio del periodo estático cuando se mantiene una temperatura alta durante un tiempo.

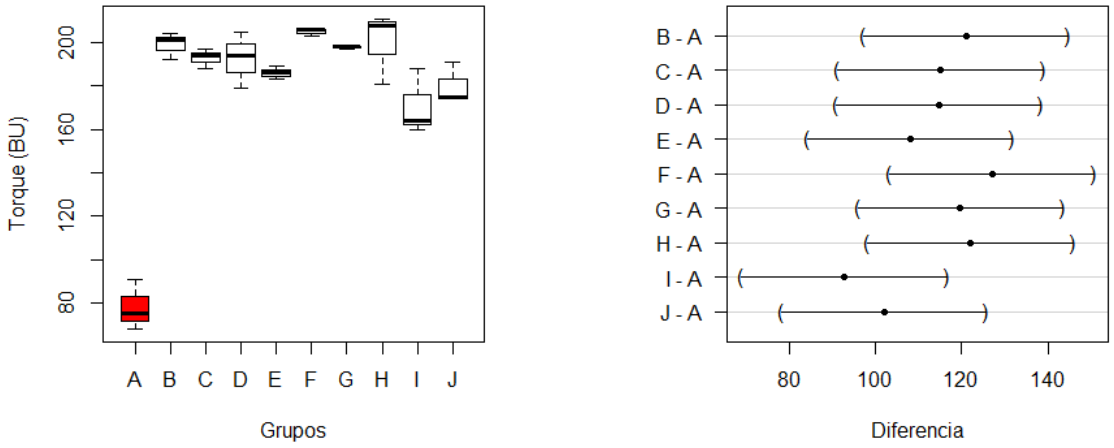

Figura 9. Efecto del tratamiento de secado sobre el torque generado en el inicio del periodo estático. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

Los valores del torque máximo se muestran en la Figura 13. Como el tratamiento patrón (A) necesita una temperatura más elevada para llegar al máximo torque, se pensaba que al someterlo al estrés se viera menos afectado por la temperatura; los resultados demuestran lo contrario. Al analizar la curva de empastamiento se nota que hay un descenso importante de la viscosidad almidón patrón respecto a los demás tratamientos (Figura 14). Comportamiento similar lo muestra Rutenberg *et al.* 1984, para los almidones de tubérculos y raíces; diferente a los demás almidones comunes.

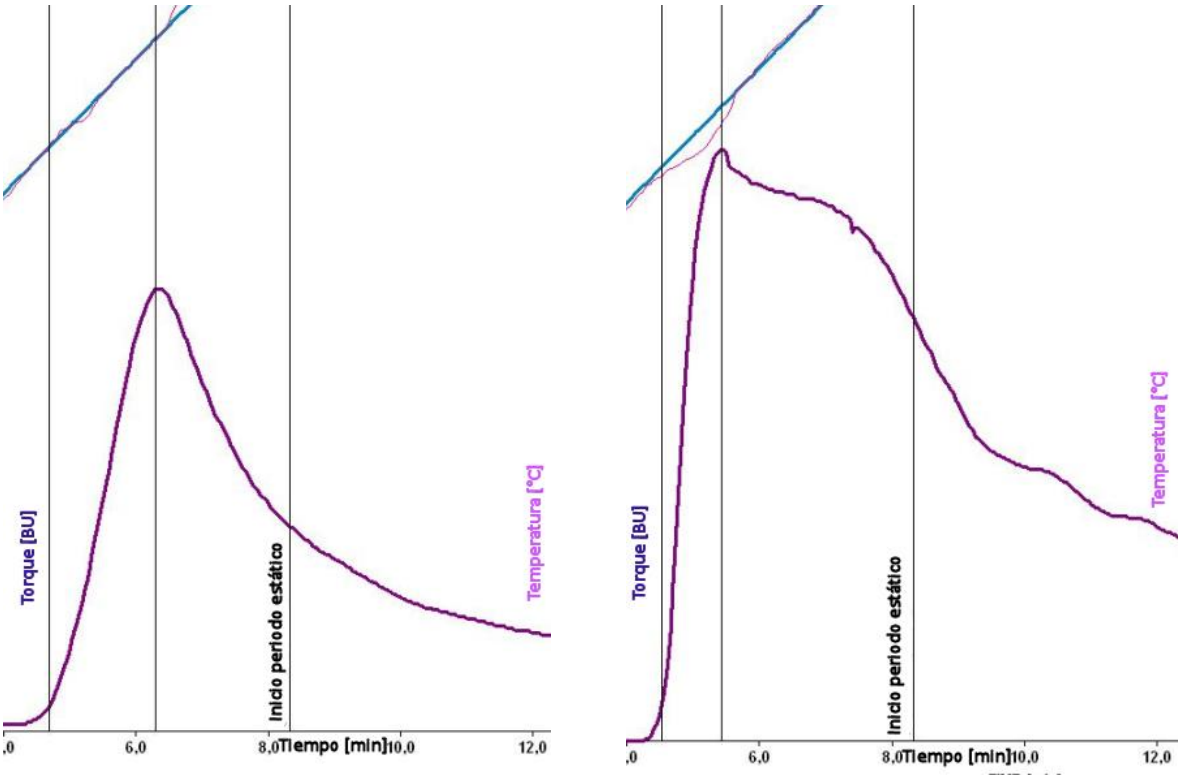

Figura 10. Vista ampliada de la curva de empastamiento. Muestra de almidón agrio patrón (izquierda) tratamiento A réplica 1, y Muestra de almidón agrio secado en VR (derecha) tratamiento B réplica 3.

Se observó que el almidón agrio de la muestra patrón tiene un descenso exponencial de la viscosidad; pero la muestra de almidón agrio deshidratada en VR posee mayor resistencia al estrés sometido, provocando que tenga un torque mayor cuando inicia el periodo estático de temperatura.

8.2.4 Inicio del periodo de enfriamiento

En el inicio del periodo de enfriamiento, el almidón agrio empieza a tener retrogradación, los gránulos intentan volver a su forma original, se reconstituyen, pero no podrán regresar a su forma original (Jackson. 2003). En la Figura 15 se muestra el análisis estadístico en esta etapa.

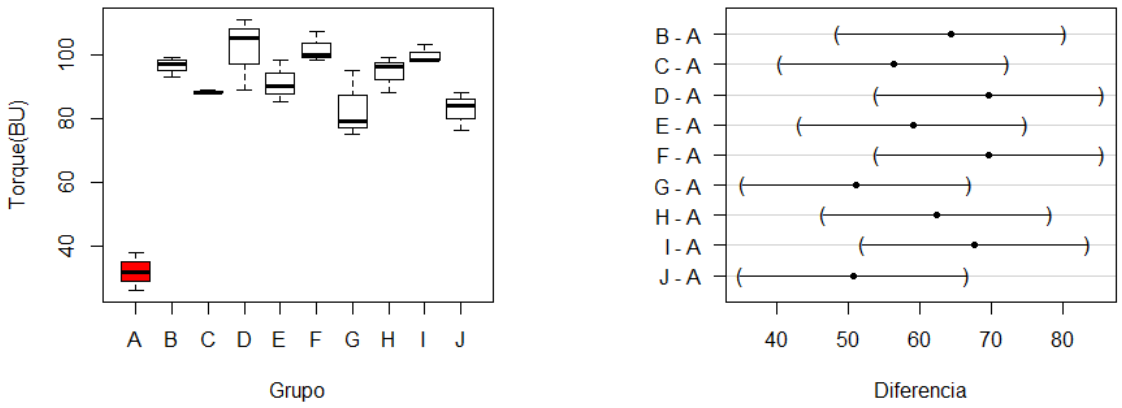

Figura 11. Efecto del tratamiento de secado sobre el torque generado en el inicio del periodo de enfriamiento. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

El punto mínimo de viscosidad se observó que corresponde al parámetro A, el cual es menor respecto a los demás parámetros, además de una diferencia significativa; por lo tanto, el almidón agrio cuando es secado completamente al sol el punto mínimo de viscosidad es menor que cualquier otro tratamiento cuando hay un método de deshidratación combinado. La manera de retrogradarse evidencia que es mucho más resiliente al estrés (alta temperatura) cuando se utiliza la tecnología de VR

8.2.5 Fin del periodo enfriamiento

En esta etapa, el almidón vuelve a ganar viscosidad, los gránulos enfriados se reconstituyen nuevamente, pero no igual que en el punto de gelatinización máximo, como se puede apreciar en la figura 16 (y su análisis estadístico) respecto a las etapas anteriores de gelatinización.

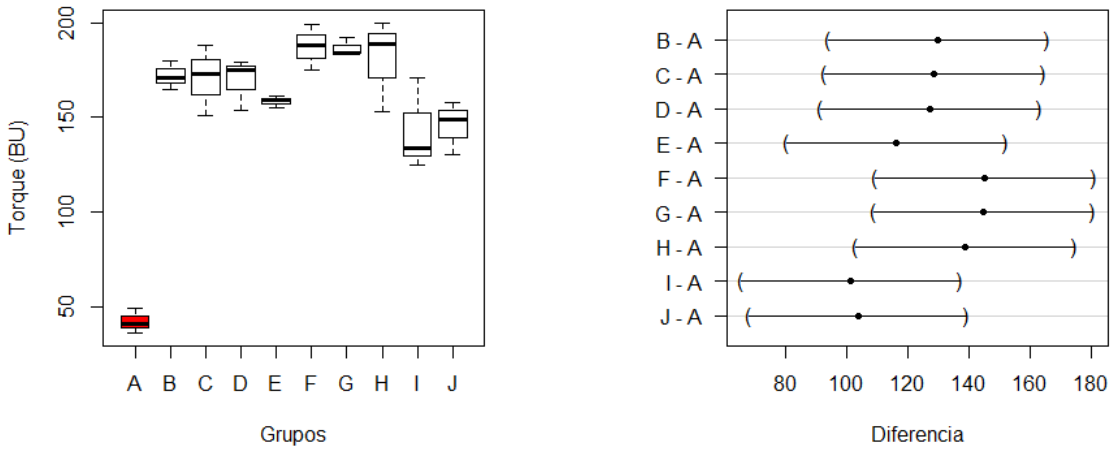

Figura 12. Efecto del tratamiento de secado sobre el torque generado en el fin del periodo de enfriamiento. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

Cuando ha transcurrido más tiempo en el proceso de evaluación de gelatinización, se notan más diferencias entre el almidón agrio patrón y el almidón agrio secado por VR. El almidón patrón no se reconstituye tanto como el almidón secado en VR. Al comparar la Figura 15 con la Figura 16, el almidón patrón no ha aumentado su viscosidad, durante este periodo de tiempo, a diferencia del almidón secado en VR, cuya viscosidad incrementa continuamente; se puede concluir, que el almidón utilizado con el procedimiento de secado de VR tiene mejores propiedades de retrogradación respecto al almidón secado al sol durante 10 horas al. Jackson, D.S. 2003 muestra el comportamiento de los almidones comunes; para el caso del almidón de yuca dulce, la retrogradación es menor respecto a los resultados obtenidos para almidón de yuca agrio.

8.2.6 Fin del periodo estático

En la Figura 17 se observa la etapa de final del periodo estático, luego de 20 minutos de haber iniciado el proceso de evaluación de propiedades de gelatinización del almidón, entra la etapa del fin del periodo estático, el cual, tiene una duración de dos minutos a 50°C.

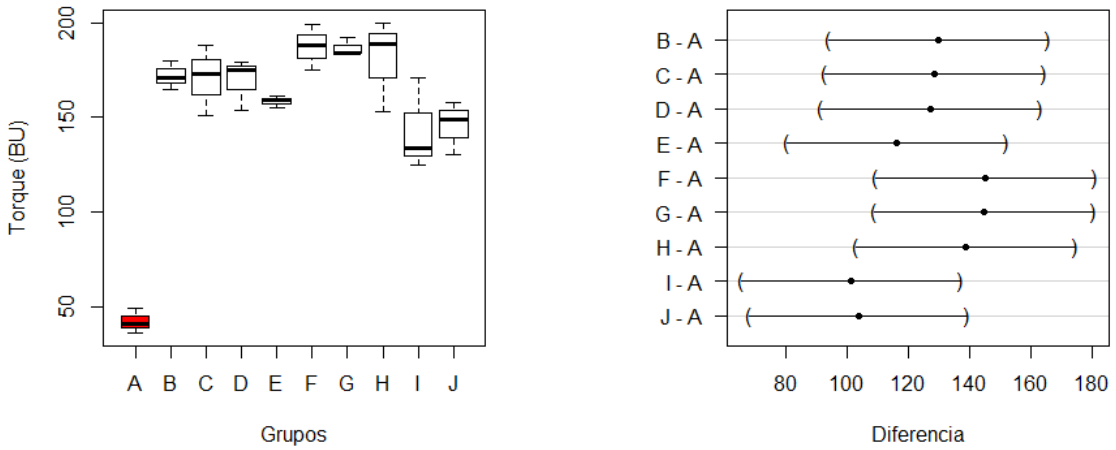

Figura 13. Efecto del tratamiento de secado sobre el torque generado en el fin del periodo estático. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

En este corto periodo de tiempo, el almidón secado en VR incrementa su torque algunos BU más; en cambio, el almidón patrón parece que ha llegado al máximo punto su reconstitución ya que no hay diferencia entre el nivel anterior y el actual. El almidón secado con VR parece no haber llegado al punto de reconstitución máximo hasta este punto.

8.3 Prueba de panificación

En el Anexo 3 se muestran los datos obtenidos de la elaboración de la prueba de expansión, a continuación, se analizan los resultados según su varianza. Se mantiene la nomenclatura empleada en el numeral 9.2

8.3.1 Masa del proceso de panificación

En la Figura 18 se muestran los resultados de análisis de varianza para la medición de la masa en un diagrama de cajas y su respectiva gráfica de intervalos de confianza, con el objetivo de

determinar si existen diferencias significativas en este parámetro.

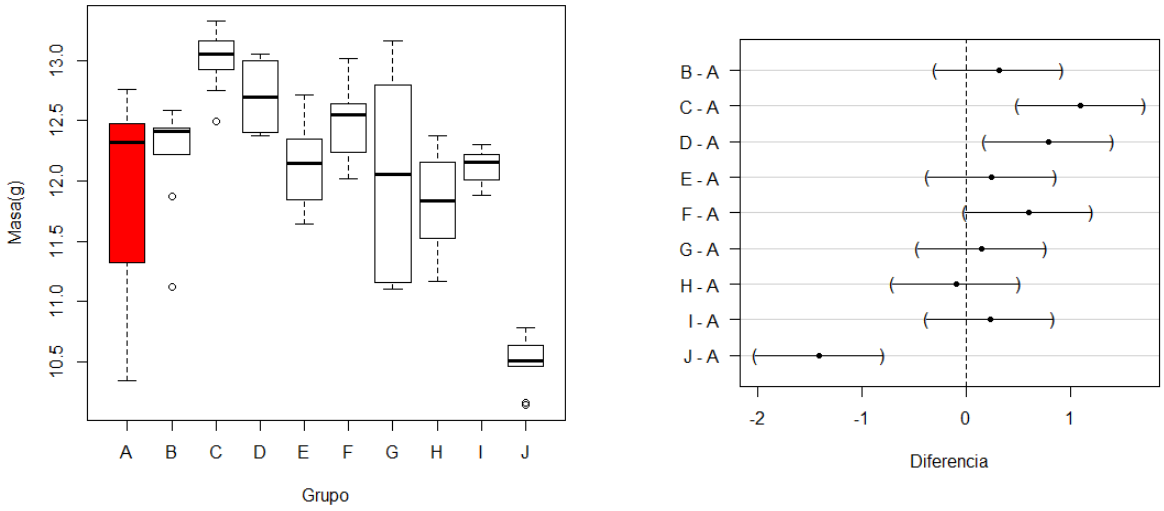

Figura 14. Efecto del tratamiento de secado sobre la masa después de la panificación. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

De acuerdo al gráfico de intervalos de confianza, los tratamientos C, D y J muestran diferencias significativas respecto al patrón. Es un comportamiento anormal presentado por los tratamientos C y D, en vista que entre ellos dos presentan diferencias significativas, los demás valores no presentan diferencias significativas siendo que está entre parámetros que la presentaron; vale la pena resaltar que la mayor diferencia fue con el tratamiento J respecto a los demás, cuya diferencia es significativa, pero en inversamente proporcional a los demás tratamientos, ya que su masa es menor.

8.3.3 Volumen del proceso de panificación

En la Figura 19 se muestran los resultados de análisis de varianza para la medición del volumen.

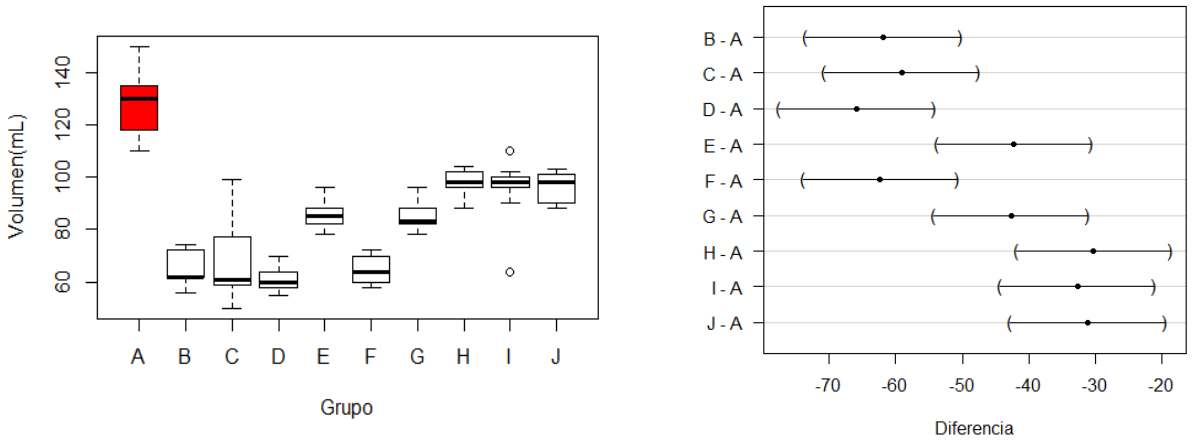

Figura 15. Efecto del tratamiento de secado sobre el volumen después de la panificación. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

A diferencia de la masa, el volumen de la muestra patrón presentó diferencia significativa cuando se analiza en los productos de la panificación, ninguno de los demás tratamientos con sol-VR es similar a la muestra patrón A. Pero se debe observar que entre los caracteres B a J, a medida que aumenta la temperatura de secado en VR, el volumen de las muestras aumenta, se demuestra observando en la Figura 19 (izquierda).

8.3.4 Densidad del proceso de panificación

En la Figura 20 se muestran los resultados de análisis de varianza para el cálculo de la densidad.

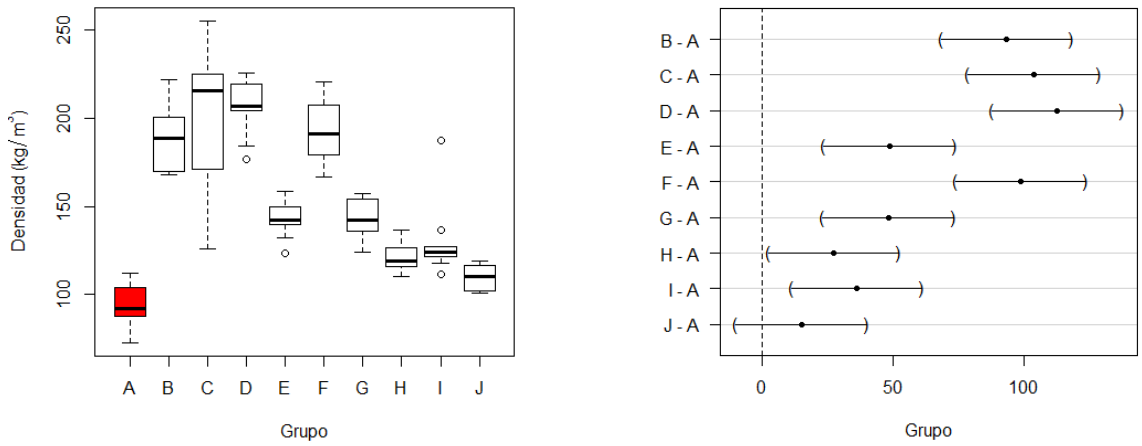

Figura 16. Efecto del tratamiento de secado sobre la densidad después de la panificación. Diagrama de cajas (izquierda), gráfico de intervalos de confianza (derecha). A: muestra patrón, B:1h45°C, C: 2h45°C, D: 3h45°C, E: 1h50°C, F: 2h50°C, G: 3h50°C, H: 1h55°C, I: 2h55°C, J: 3h55°C

Como se muestra en la figura 20, la mayoría de los tratamientos tienen diferencias significativas con el patrón; siendo los tratamientos H e I los que menos diferencias tuvieron, estos pertenecen al grupo de secado al sol 1 y 2 h a 55ºC, respectivamente. El tratamiento J no tuvo diferencias significativas con el patrón; el tratamiento J (3 horas al sol y secado a 55 °C en VR) ha demostrado ser similar a las propiedades del almidón agrio secado al sol completamente.

9. Conclusiones

Al utilizar la ventana de refractancia con 55°C para deshidratar el almidón agrio presenta una influencia en el comportamiento del almidón, donde la temperatura utilizada un punto crítico para la operación, en base a los experimentos realizados donde a mayor temperatura presentaba mejores características de expansión representados en su baja densidad del producto; este tratamiento tiene una influencia positiva sobre el producto

Se encontró que el mejor tratamiento para el almidón húmedo agrio es una exposición al sol durante 3 horas, y posterior deshidratación en ventana de refractancia a 55 °C; con este tratamiento, no hubo diferencias significativas en la densidad del producto evaluada en la prueba de panificación. Aunque se observó diferencia en el peso y en el volumen con este tratamiento.

El tratamiento de deshidratación (3 h sol – 55 °C VR) mostró que el almidón utilizado en el experimento tiene mejor perfil de gelatinización respecto al almidón secado al sol completamente.; el grano de almidón puede regresar más fácilmente a su forma original. Esta característica permitiría utilizar el almidón para elaborar espesantes o gelatinizantes en alimentos.

Se elaboraron las cinéticas de secado del almidón agrio de yuca variedad *SM1495-5*. El tratamiento a 55 °C presentó la mayor tasa de secado. La predicción del tiempo de secado fue una herramienta bastante útil para conocer el tiempo que tarda un lote en deshidratarse a una humedad requerida.

10. Recomendaciones

Se recomienda un estudio microscópico para observar la estructura física del almidón entre el almidón secado 10 horas al sol, respecto al almidón con tratamiento de secado de ventana de refractancia; esta información podría ser de utilidad para estudiar la razón del comportamiento del almidón en el test de viscoamilógrafo.

Un estudio posterior utilizando unas horas más de sol podría ayudar a la investigación, con el objetivo de encontrar el tiempo exacto que necesita el almidón agrio para modificar su estructura para que en la prueba de panificación no presente ninguna diferencia significativa respecto a una muestra deshidratada completamente al sol.

11. Bibliografía

- Abonyi, B., Tang, J., and Edwards, C.G. 1999 Evaluation of energy efficiency and quality retention for the Refractance Window™ drying system. Research Report, Washington State University, Pullman WA. Department of Biological Systems Engineering, Department of Food Science and Human Nutrition.

- Aichayawanich, S., Nopharatana, M., Songkasiri, W. 2011. Agglomeration mechanisms of cassava starch during pneumatic conveying drying. Carbohydrate Polymers, 84, (1), 292-298.

- Baker, C.G.J. 2005. Energy efficient dryer operation – An update on developments. Drying Technology, 23, 2071-2087

- Baeghbali, V., Niakousari, M., Farahnaky, A. 2015. Refractance Window drying of pomegranate juice: Quality retention and energy efficiency. LWT-Food Science and Technology 66, 34-40

- Bertolini, C., Mestres, C., Colonna, P. 2000. Free radical formation in UV- and gamma-irradiated cassava starch. Carbohydrate Polymers 44, 269-271

- Bertolini, C., Mestres, C., Lourdin, D., Della Valle, G., & Colonna, P. 2001. Relationship between thermomechanical properties and baking expansion of sour cassava starch (polvilho azedo). Journal of the Science of Food and Agriculture, 81, 429–435.

- Breuninger, W.F., Piyachomkwan, K, Sriroth, K. 2009. Tapioca/Cassava Starch: Production and Use. Starch: Chemistry and Technology. Third Edition. Food Science and Technology, International Series. 541-542

- Callejo M.J., Benavente E., Ezpeleta J.I., Laguna M.J., Carrillo J.M., Rodríguez-Quijano M. 2016. Influence of teff variety and wheat flour strength on breadmaking properties of healthier teff-based breads. Journal of Cereal Science. 38-45

- Cardenas, O. S., & de Buckle, T. S. 1980. Sour cassava starch production: A preliminary study. Journal of Food Science, 45, 1509–1528.

- CIRAD. 2015. Energy, water, carbon footprint: ways of improving cassava starch production (http://www.cirad.fr/en/research-operations/research-results/2015/energy-water-carbon-footprint-ways-of-improving-cassava-starch-production)
- Da, G., Dufour, D., Giraldo, A., Moreno, M., Tran, T., Velez, G., Sanchez, T., Le-Thanh, M., Marouze, C. and Marechal, P.-A. 2013. Cottage level cassava starch processing systems in Colombia and Vietnam. Food and Bioprocess Technology. 6, 2213–2222
- Demiate, I.M., Dupuy, N., Huvenne, J.P., Cereda, M.P. Cereda, Wosiacki, G. 2000. Relationship between baking behavior of modifed cassava starches and starch chemical structure determined by FTIR spectroscopy. Carbohydrate Polymers. 42, 149-158.
- Dufour, D., Larsonneur, S., Alarcon, F., Braset, C., & Chuzel, G. 1996. Improving the bread-making potential of cassava sour starch. In D. Dufour, G. O'Brien, & R. Best (Eds.), Cassava flour and starch: Progress in research and development, 133–142.
- FAO. 2013. FAOSTAT statistical database (http://faostat.fao.org)
- Grandidier, B. 2013.Modelisation et optimisation de secheur flash d'amidon de manioc. UniversiteBordeaux. 3
- Jackson, D.S. 2003. Structure, Properties and Determination in Starch in Encyclopedia of food Sciences and Nutrition. p5564
- Jayaraman, K.S., Gupta, D.K.D. 2014. Drying of fruits and vegetables. In Handbook of Industrial Drying, 4th Ed. (A.S. Mujumdar, ed.), CRC Press, Boca Raton, FL. 611-635
- Kemp, I.C., Gardiner, S.P. 2001. An outline method for troubleshooting and problem solving in dryers. Drying Technology. 19, 1875–1890.
- Kudra, T. 2009. Energy aspect in food dehydration. In Advances in Food Dehydration (C. Ratti, ed.), CRC Press, Boca Raton, FL. 423-445
- Kudra, T., Mujumdar, A. Advanced Drying Technologies. 2009. CRC Press, Boca Raton. 412.

- Levy, A., Borde, I. 2014. Pneumatic and flash drying. Handbook of Industrial Drying, 4th Ed. (A.S. Mujumdar, ed.), CRC Press, Boca Raton, FL. 381-392
- Magoon, R., 1986, US Patent 4.631.837.
- Maldonado, P., Grosmaire, L., Dufour, D., Giraldo Toro, A., Sánchez, T., Calle, F., Moreno Santander, M.A., Ceballos, H., Delarbre, J.L., Tran, T. 2013. Combined effect of fermentation, sun-drying and genotype on breadmaking ability of sour cassava starch. Carbohydrate Polymers, 98, 1137-1146
- Mittal, G.S. 2010. Mass and energy balances in food processing. In Mathematical Modeling of Food Processing (M. M. Farid, ed.), CRC Press, Boca Raton, FL. 109-122
- Nindo, C. I., Tang, J. 2007. Refractance Window dehydration technology: A novel contact drying method. Drying Technology. 25, (1), 37-48.
- Nindo, C.I., Tang, J., Powers, J. R., Bolland, K. 2004. Energy consumption during Refractance Window® evaporation of selected berry juices. International Journal of Energy Research. 28, (12), 1089–1100.
- Orsat, V., Vijaya Raghavan, G.S. and Sosle, V. 2008. Adapting drying technologies for agri-food market development in India. Drying Technology. 26, 1355–1361.
- Ortiz, M.J., Gulati, T., Datta, A.K., Ochoa, C.I. Quantitative understanding of Refractance Window drying. 2015. Food and Bioproducts Processing 95, 237-253
- Onitilo, M. O., Sanni, L. O., Oyewole, O. B., & Maziya-Dixon, B. 2007. Physicochemical and functional properties of sour starches from different cassava varieties. International Journal of Food Properties, 10(3), 607–620.
- Pereira, N.R., Godoi, F.C., Rocha, S.C.S. 2010. Drying of Starch suspension in spouted bed with inert particles: physical and thermal analysis of product. Drying Technology, 28, (11), 1288-1296.

- Plata-Oviedo, M., & Camargo, C. 1998. Effect of acid treatments and drying processes on physico-chemical and functional properties of cassava starch. Journal of the Science of Food and Agriculture, 77, 103–108.
- Precoppe, M., Chapuis, A., Müller, J. and Abass, A. 2015. Tunnel Dryer and Pneumatic Dryer Performance Evaluation to Improve Small-Scale Cassava Processing in Tanzania. Journal of Food Process Engineering. doi: 10.1111/jfpe.12274
- Ratnayake, W.S., Jackson, D.S. 2003. Sources and Processing in Starch in Encyclopedia of food Sciences and Nutrition. p5569-5570
- Rutenberg M.W., Solarek D. In: Whistler R.L., BeMiller J.N., Paschall E.F., eds . Starch: Chemistry and Technology. 2nd ed. New York, NY: Academic Press ; 1984 : 311 .
- Spencer, D. 2005. Cassava in Africa: past, present and future. In A Review of Cassava in Africa with Country Case Studies on Nigeria, Ghana, the United Republic of Tanzania, Uganda.
- Strumiłło, C., Jones, P.L. and Ylła, R. 2014. Energy aspects in drying. In Handbook of Industrial Drying, 4th Ed. (A.S. Mujumdar, ed.) pp. 1077–1100, CRC Press, Boca Raton, FL
- Vanhamel, S., Van Den Ende, L., Darius, P.L., Delcour, J.A. 1991. A volumeter for breads prepared from 10 grams of flour. American Association of Cereal Chemists 68(2):170-172
- Wheatley, C.C., Chuzel, G. and Zakhia, N. 2003. Cassava: The Nature of the Tuber. In Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition, 2nd Ed. (B. Caballero, ed.) Academic Press, Oxford, U.K. 964-970
- Zotarelli, M.F., Mattar, B.A., Borges, J. 2015. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. Food Research International 69. 410-417

12. Anexos

Anexo 1: Tabla de cinética de secado

Tabla 9. Resultados por triplicado cinética de secado a 55 °C

Réplica	Tiempo (min) ± 0.02	Masa (g) ± 0.01	Humedad (g sólidos/g H_2O)
1	0.00	7.08	0.45
1	5.00	6.47	0.40
1	10.00	6.21	0.37
1	15.00	5.87	0.33
1	20.00	5.58	0.30
1	25.00	5.36	0.27
1	30.00	5.14	0.24
1	35.00	4.98	0.22
1	40.00	4.88	0.20
1	45.00	4.67	0.16
1	50.00	4.57	0.15
1	55.00	4.47	0.13
1	60.00	4.41	0.11
2	0.00	7.20	0.45
2	5.00	6.59	0.40
2	10.00	6.33	0.37
2	15.00	5.99	0.34
2	20.00	5.70	0.30
2	25.00	5.48	0.28
2	30.00	5.26	0.24
2	35.00	5.10	0.22
2	40.00	5.00	0.21
2	45.00	4.79	0.17
2	50.00	4.69	0.15
2	55.00	4.59	0.13
2	60.00	4.53	0.12
3	0.00	8.05	0.45
3	5.00	7.37	0.40
3	10.00	7.02	0.37
3	15.00	6.61	0.33
3	20.00	6.34	0.30
3	25.00	6.09	0.27
3	30.00	5.79	0.23
3	35.00	5.64	0.21

3	40.00	5.51	0.19
3	45.00	5.27	0.16
3	50.00	5.17	0.14
3	55.00	5.04	0.12
3	60.00	4.99	0.11

Tabla 10. Resultados por triplicado cinética de secado a 50 °C

Réplica	Tiempo (min) ± 0.02	Masa (g) ± 0.01	Humedad (g sólidos/g H_2O)
1	0.00	8.82	0.45
1	5.00	8.20	0.41
1	10.00	7.78	0.37
1	15.00	7.48	0.35
1	20.00	7.08	0.31
1	25.00	6.77	0.28
1	30.00	6.57	0.26
1	35.00	6.29	0.23
1	40.00	6.18	0.21
1	45.00	6.07	0.20
1	50.00	5.88	0.17
1	55.00	5.83	0.17
1	60.00	5.73	0.15
2	0.00	9.17	0.45
2	5.00	8.46	0.40
2	10.00	7.95	0.36
2	15.00	7.72	0.34
2	20.00	7.37	0.31
2	25.00	6.98	0.28
2	30.00	6.73	0.25
2	35.00	6.46	0.22
2	40.00	6.36	0.20
2	45.00	6.21	0.18
2	50.00	6.12	0.17
2	55.00	6.02	0.16
2	60.00	5.95	0.15
3	0.00	8.95	0.45
3	5.00	8.33	0.41
3	10.00	7.91	0.38
3	15.00	7.61	0.35

3	20.00	7.21	0.32
3	25.00	6.90	0.28
3	30.00	6.70	0.26
3	35.00	6.42	0.23
3	40.00	6.31	0.22
3	45.00	6.20	0.20
3	50.00	6.01	0.18
3	55.00	5.96	0.17
3	60.00	5.86	0.16

Tabla 11. Resultados por triplicado cinética de secado a 45 °C

Réplica	Tiempo (min) ± 0.02	Masa (g) ± 0.01	Humedad (g sólidos/g H_2O)
1	0.00	9.17	0.45
1	5.00	8.50	0.41
1	10.00	8.20	0.39
1	15.00	7.86	0.36
1	20.00	7.41	0.33
1	25.00	7.30	0.32
1	30.00	6.91	0.28
1	35.00	6.70	0.25
1	40.00	6.65	0.25
1	45.00	6.52	0.23
1	50.00	6.36	0.21
1	55.00	6.24	0.20
1	60.00	6.16	0.19
2	0.00	8.83	0.45
2	5.00	8.26	0.41
2	10.00	8.01	0.39
2	15.00	7.71	0.37
2	20.00	7.32	0.33
2	25.00	7.19	0.32
2	30.00	6.85	0.29
2	35.00	6.66	0.27
2	40.00	6.56	0.26
2	45.00	6.44	0.24
2	50.00	6.25	0.22
2	55.00	6.16	0.21
2	60.00	5.96	0.18

3	0.00	9.05	0.45
3	5.00	8.38	0.40
3	10.00	8.08	0.38
3	15.00	7.74	0.35
3	20.00	7.29	0.31
3	25.00	7.18	0.30
3	30.00	6.79	0.26
3	35.00	6.58	0.24
3	40.00	6.53	0.24
3	45.00	6.40	0.22
3	50.00	6.24	0.20
3	55.00	6.12	0.18
3	60.00	6.04	0.17

Anexo 2: Resultados del Visco Amilógrafo

Leyenda: A. inicio de gelatinización; B. viscosidad máxima; C. inicio del periodo estático; D. inicio del periodo de enfriamiento; E. fin del tiempo de enfriamiento; F. fin del periodo estático de enfriamiento

Tabla 12. Resultado de muestras de almidón a 1 hora de sol

Parámetro	Muestra	Temperatura de deshidratación (°C)	Torque (BU)	Temperatura dentro Viscoamilógrafo (°C)
A	1	45	15	63.0
B	1	45	283	71.4
C	1	45	204	89.8
D	1	45	99	92.3
E	1	45	180	55.4
F	1	45	198	51.1
A	2	45	16	63.0
B	2	45	283	69.0
C	2	45	201	89.9
D	2	45	97	92.4
E	2	45	171	56.2
F	2	45	186	52.4
A	3	45	14	62.5
B	3	45	269	71.2
C	3	45	192	90.4
D	3	45	93	91.7

E	3	45	165	56.0
F	3	45	180	52.2
A	1	50	16	63.0
B	1	50	264	68.9
C	1	50	188	90.4
D	1	50	85	92.6
E	1	50	151	57.0
F	1	50	167	52.9
A	2	50	18	62.8
B	2	50	292	71.0
C	2	50	197	90.0
D	2	50	988	92.5
E	2	50	188	54.3
F	2	50	211	49.7
A	3	50	15	63.0
B	3	50	275	67.4
C	3	50	194	89.6
D	3	50	90	92.5
E	3	50	173	54.7
F	3	50	188	50.4
A	1	55	14	63.0
B	1	55	287	68.2
C	1	55	205	88.5
D	1	55	99	92.6
E	1	55	179	56.1
F	1	55	195	52.2
A	2	55	14	63.0
B	2	55	276	68.9
C	2	55	194	90.4
D	2	55	96	91.6
E	2	55	175	54.9
F	2	55	194	50.7
A	3	55	13	63.0
B	3	55	266	69.9
C	3	55	179	88.1
D	3	55	88	92.4
E	3	55	154	57.8
F	3	55	169	53.6

Tabla 13. Resultado de muestras de almidón a 2 horas de sol

Parámetro	Muestra	Temperatura de deshidratación (°C)	Torque (BU)	Temperatura dentro Viscoamilógrafo (°C)
A	1	45	18	63.0
B	1	45	265	68.2
C	1	45	186	89.7
D	1	45	88	91.6
E	1	45	159	56.1
F	1	45	175	52.1
A	2	45	14	62.7
B	2	45	273	68.5
C	2	45	189	88.8
D	2	45	89	92.3
E	2	45	161	56.1
F	2	45	176	52.2
A	3	45	16	63.2
B	3	45	263	68.7
C	3	45	183	89.9
D	3	45	88	91.5
E	3	45	155	5.4
F	3	45	170	52.5
A	1	50	15	63.0
B	1	50	289	67.5
C	1	50	206	89.4
D	1	50	98	92.5
E	1	50	175	56.8
F	1	50	190	53.0
A	2	50	15	63.1
B	2	50	294	69.7
C	2	50	206	90.1
D	2	50	100	92.3
E	2	50	188	55.4
F	2	50	208	51.1
A	3	50	14	62.2
B	3	50	301	69.1
C	3	50	203	90.9

D	3	50	107	92.3
E	3	50	199	56.4
F	3	50	217	52.5
A	1	55	15	62.9
B	1	55	309	69.9
C	1	55	197	90.1
D	1	55	103	91.9
E	1	55	192	55.6
F	1	55	211	51.6
A	2	55	15	63.4
B	2	55	291	70.2
C	2	55	198	90.5
D	2	55	98	92.1
E	2	55	184	55.3
F	2	55	202	51.3
A	3	55	15	63.4
B	3	55	291	70.2
C	3	55	198	90.5
D	3	55	98	92.1
E	3	55	184	55.3
F	3	55	202	51.3

Tabla 14. Resultado de muestras de almidón a 3 horas de sol

Parámetro	Muestra	Temperatura de deshidratación (°C)	Torque (BU)	Temperatura dentro Viscoamilógrafo (°C)
A	1	45	13	62.7
B	1	45	297	67.1
C	1	45	208	88.9
D	1	45	105	91.8
E	1	45	189	55.4
F	1	45	208	51.1
A	2	45	16	62.6
B	2	45	342	67.2
C	2	45	211	90.1
D	2	45	111	92.3
E	2	45	200	55.9
F	2	45	218	51.9

A	3	45	13	62.1
B	3	45	263	69.1
C	3	45	181	89.0
D	3	45	89	92.3
E	3	45	153	57.1
F	3	45	168	53.2
A	1	50	14	62.9
B	1	50	294	69.9
C	1	50	188	90.3
D	1	50	95	92.2
E	1	50	171	55.8
F	1	50	185	50.1
A	2	50	15	62.8
B	2	50	263	69.6
C	2	50	164	90.1
D	2	50	79	92.3
E	2	50	134	56.4
F	2	50	151	49.9
A	3	50	17	63.3
B	3	50	250	70.6
C	3	50	160	89.4
D	3	50	75	92.6
E	3	50	125	58.0
F	3	50	149	50.3
A	1	55	18	63.3
B	1	55	239	69.6
C	1	55	191	88.5
D	1	55	76	92.7
E	1	55	130	57.8
F	1	55	155	50.4
A	2	55	14	62.9
B	2	55	265	68.5
C	2	55	174	89.2
D	2	55	84	92.4
E	2	55	149	56.5
F	2	55	173	49.7
A	3	55	22	63.3
B	3	55	271	67.6
C	3	55	175	90.2
D	3	55	88	92.3

E	3	55	158	56.7
F	3	55	178	49.8

Tabla 15. Resultado de muestras de almidón patrón

Parámetro	Muestra	Torque (BU)	Temperatura dentro Viscoamilógrafo (°C)
A	1	11	65.5
B	1	197	77.1
C	1	91	93.0
D	1	38	92.0
E	1	49	56.2
F	1	51	60.3
A	2	13	69.4
B	2	148	79.2
C	2	68	91.4
D	2	26	91.8
E	2	36	54.8
F	2	36	51.4
A	3	12	67.2
B	3	158	79.0
C	3	75	92.7
D	3	32	92.0
E	3	41	56.9
F	3	46	48.9

Anexo 3: Datos de la elaboración de pandeyucas

Tabla 16. Resultado de muestras de pandeyuca de almidón secado 1 hora al sol

Muestra	Temperatura de deshidratación (°C)	Masa (g)	Volumen (mL)	Densidad (kg/m^3)
1	45	12.556	74	169.676
1	45	12.586	62	203.000
1	45	12.222	72	169.750
2	45	12.433	62	200.532
2	45	12.441	74	168.122
2	45	12.255	70	175.071

3	45	11.122	59	188.508
3	45	12.408	56	221.571
3	45	11.868	62	191.419
1	50	13.125	61	215.164
1	50	13.326	59	225.864
1	50	12.496	99	126.222
2	50	12.978	84	154.500
2	50	13.158	77	170.883
2	50	13.158	68	193.500
3	50	13.051	58	225.017
3	50	12.927	60	215.450
3	50	12.747	50	254.948
1	55	12.698	58	218.931
1	55	13.052	64	203.938
1	55	12.528	68	184.235
2	55	12.377	70	176.814
2	55	12.407	55	225.585
2	55	12.388	60	206.467
3	55	12.998	60	216.633
3	55	13.005	58	224.224
3	55	12.728	62	205.290

Tabla 17. Resultado por triplicado de muestras de pandeyuca de almidón secado 2 horas al sol

Muestra	Temperatura de deshidratación (°C)	Masa (g)	Volumen (mL)	Densidad (kg/m^3)
1	45	12.551	90	139.459
1	45	12.713	85	149.560
1	45	12.255	83	147.651
2	45	12.104	86	140.748
2	45	11.847	96	123.406
2	45	12.145	80	151.815
3	45	11.674	82	142.367
3	45	12.352	78	158.354
3	45	11.642	88	132.295
1	50	12.017	72	166.903
1	50	12.239	64	191.234
1	50	12.242	60	204.033
2	50	12.643	70	180.614

2	50	12.644	61	207.279
2	50	12.774	58	220.241
3	50	12.546	70	179.229
3	50	12.339	72	171.375
3	50	13.017	60	216.952
1	55	11.102	78	142.336
1	55	11.125	82	135.665
1	55	11.163	90	124.038
2	55	12.059	96	125.615
2	55	11.957	80	149.463
2	55	12.158	88	138.157
3	55	13.159	85	154.815
3	55	12.792	83	154.120
3	55	12.889	82	157.183

Tabla 18. Resultado por triplicado de muestras de pandeyuca de almidón secado 3 horas al sol

Muestra	Temperatura de deshidratación (°C)	Masa (g)	Volumen (mL)	Densidad (kg/m^3)
1	45	12.374	96	128.897
1	45	12.155	102	119.165
1	45	11.837	104	113.819
2	45	12.302	90	136.690
2	45	11.164	88	126.858
2	45	11.614	100	116.141
3	45	11.529	98	117.643
3	45	11.245	102	110.245
3	45	12.001	96	125.010
1	50	12.156	100	121.558
1	50	12.216	96	127.253
1	50	12.156	98	124.041
2	50	12.302	110	111.835
2	50	12.274	90	136.376
2	50	12.012	102	117.768
3	50	12.169	98	124.171
3	50	11.883	96	123.783
3	50	11.967	64	186.991
1	55	10.633	96	110.759
1	55	10.512	103	102.062

1	55	10.784	98	110.036
2	55	10.541	90	117.119
2	55	10.464	88	118.908
2	55	10.710	102	105.002
3	55	10.146	100	101.461
3	55	10.473	90	116.364
3	55	10.164	101	100.629

Tabla 19. Resultado por triplicado de muestras de pandeyuca de almidón patrón

Muestra	Masa (g)	Volumen (mL)	Densidad (kg/m^3)
1	12.480	120	104.000
1	12.756	140	91.116
1	12.642	130	97.246
2	12.320	115	107.132
2	11.986	130	92.202
2	12.329	110	112.077
3	11.323	135	83.876
3	10.915	150	72.769
3	10.347	118	87.682