

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN-L 2958-0188
JUNIO 2026

Nro.
13
EDICIÓN
DIGITAL

INDEXADA AL DIALNET



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia García Moreno Ph. D.
Dr. Tito V. Estevez Martini
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina
Mg. Ing. Aldo Felipe Vargas Pacheco

Rector
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
ViceDecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición impresa N°13 Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Sanabria Camacho
Ing. Mario Zenteno Benitez PhD.
Ing. Oswaldo Terán Modragón PhD.
Ing. Mónica Lino Humerez PhD.
Ing. Franz Zenteno Benitez PhD.

Diseño Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM Latinoamericana

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<http://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Direccion:
Av. Mcal. Santa Cruz, Plaza Del Obelisco.
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería.
Tel. 2205000 - 2205067 Int. 1402

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

**EDICIÓN DIGITAL N° 13
JUNIO - 2026**

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia Garcia Moreno Ph. D.	Rectora
Dr. Tito V. Estevez Martini	Vicerrector
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco	Decano Facultad de Ingeniería
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina	ViceDecano. Facultad de Ingeniería
Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco	Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Digital N°. 13 - Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Floren Sanabria Camacho
Ing. Mario Fermín Zenteno Benítez Ph.D.
Ing. Oswaldo Fernando Terán Modregón Ph.D.
Ing. Paula Mónica Lino Humerez Ph.D.
Ing. Franz Zenteno Benítez Ph.D.

Diseño Tapa Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM LATINOAMÉRICA

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
Telf. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30

PROLOGO

Revista "Industrial 4.0"

Frente a la volatilidad social y económica actual, la 13ª edición de la Revista Científica INDUSTRIAL 4.0 demuestra cómo la ingeniería industrial actúa como un flujo sinérgico que transfiere innovación integral a las organizaciones. Este ecosistema unificado inicia en la transformación digital, donde el Control basado en eventos para la eficiencia energética optimiza el flujo de datos industriales en procesos complejos. Dicha eficiencia se traslada al ámbito de la salud con el Monitoreo inteligente mediante IoT en Farmacéutica, asegurando estricta trazabilidad térmica regulatoria, y se acopla a las decisiones comerciales y de inventarios con el Pronóstico de la demanda mediante el modelo Prophet, reduciendo drásticamente la incertidumbre logística.



Esta resiliencia operativa converge directamente con la sustentabilidad y el aprovechamiento de recursos. La autonomía energética industrial se impulsa con el Generador asíncrono en generación distribuida, mientras que el modelo de Inventario de Gases de Efecto Invernadero aplicado en la Facultad de Ingeniería de la UMSA audita consumos para viabilizar la reducción de costos operativos, mismo que puede ser replicado en cualquier tipo de organización. Asimismo, la Modelación matemática de los niveles de presión sonora vehicular redefine el diseño de centros logísticos urbanos. En ingeniería de procesos y economía circular, el modelado térmico de Liofilización del Copoazú y de la Liofilización del Mango añade alto valor comercial a recursos amazónicos con bajo consumo energético, sincronizándose con el uso estratégico de Chamota en pastas cerámicas estructurales para reducir costos de materias primas en la construcción.

Finalmente, se abarcan temas de la gobernanza del entorno donde se consolidan estos analizando la Dinámica de exportaciones no tradicionales, los riesgos del Ciclo inmobiliario y las estructuras para Emprendimientos industriales. Para garantizar la

confiabilidad operativa en planta, el estudio contra el P-hacking previene decisiones erróneas por falsos positivos en el control de calidad. Este despliegue de valor es articulado y sostenido por el talento humano validado por la Acreditación ARCU-SUR en la Carrera de Ingeniería Industrial de la UMSA. Así, esta edición reafirma que la frontera científica no es un esfuerzo aislado, sino un engranaje integrado de alta eficiencia y productividad que potencia la sostenibilidad socioeconómica de las organizaciones, empresas, actores normativos a nivel local y regional.

Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

CINÉTICA DE SECADO Y MODELADO MATEMÁTICO EN LA LIOFILIZACIÓN DE COPOAZÚ (*Theobroma grandiflorum*)

M.Sc. Ing. German Iver Hilaquita Ticona

ORCID: 0009-0003-7423-0239

Ingeniería Industrial – Universidad mayor de San Andrés

M.Sc. Ing. Brigida Apaza Quispe

ORCID: 0009-0008-3287-3232

Ingeniería Industrial – Universidad Mayor de San Andrés

RESUMEN

La investigación evaluó la cinética de secado y el modelado matemático de la liofilización de la pulpa de copoazú (*Theobroma grandiflorum*) utilizando un sistema de baja escala con capacidad de 7 Kg. El estudio se centró en determinar la influencia del espesor de capa de 5, 10 y 15 mm sobre la eficiencia del proceso bajo condiciones operativas de 50°C en placa y una presión de vacío de 27,46 Pa. Los datos experimentales de la relación de humedad fueron ajustados mediante regresión no lineal al modelo de Page, obteniendo coeficientes de determinación superiores a 0,98 y errores cuadráticos medios menores a 0,007, lo que valida la alta capacidad predictiva del modelo para esta matriz amazónica. Los resultados demuestran que el espesor de capa es el factor determinante en la transferencia de masa; al reducir el espesor de 15 mm a 5 mm, el tiempo de liofilización efectiva disminuyó de 32 a 15 horas, representando una optimización temporal del 53,1%. El análisis sensorial, mediante diagramas radiales, confirmó que el proceso de baja escala preserva los atributos críticos de aroma y acidez, alcanzando humedades finales del 4%. Se concluye que la configuración de 10 mm ofrece el mejor equilibrio entre capacidad de carga y eficiencia energética, validando la viabilidad técnica de

esta tecnología como herramienta estratégica para el desarrollo agroindustrial y la bioeconomía en las regiones productoras de Bolivia.

Palabras clave: Copoazú, liofilización a baja escala, cinética de secado, optimización.

ABSTRACT

This research evaluated the drying kinetics and mathematical modeling of freeze-drying cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pulp using a small-scale system with a 7 kg capacity. The study focused on determining the influence of layer thickness (5, 10, and 15 mm) on process efficiency under operating conditions of 50°C on a plate and a vacuum pressure of 27,46 Pa. Experimental moisture content data were fitted to the Page model using nonlinear regression, yielding coefficients of determination greater than 0,98 and mean square errors less than 0,007, thus validating the model's high predictive capacity for this Amazonian matrix. The results demonstrate that layer thickness is the determining factor in mass transfer; by reducing the thickness from 15 mm to 5 mm, the effective freeze-drying time decreased from 32 to 15 hours, representing a 53,1% time optimization. Sensory analysis, using radial diagrams, confirmed that the small-scale process preserves the critical attributes of aroma and acidity, achieving final moisture levels of 4%. It is concluded that the 10 mm configuration offers the best balance between load capacity and energy efficiency, validating the technical viability of this technology as a strategic tool for agro-industrial development and the bioeconomy in the producing regions of Bolivia.

Keywords: Cupuaçu, small-scale freeze-drying, drying kinetics, optimization.

1. INTRODUCCIÓN.

El Copoazú, se ha consolidado como un recurso estratégico para la bioeconomía en Bolivia, especialmente en los departamentos de La Paz, Beni y Pando. Sus propiedades organolépticas únicas y su alto contenido de compuestos bioactivos en pulpa y semillas le otorgan un potencial significativo para la industria alimentaria y cosmética. No obstante, la alta actividad de agua y la fragilidad térmica de sus componentes limitan su comercialización en estado fresco, obligando a la búsqueda de tecnologías de conservación que preserven su valor agregado.

La liofilización se presenta como la tecnología de deshidratación más avanzada para este propósito, al operar mediante la sublimación del agua en condiciones de vacío, lo que minimiza la degradación química y estructural. A pesar de sus

beneficios, la liofilización es tradicionalmente percibida como un proceso de alto costo y complejidad técnica, factores que suelen limitar su adopción por parte de asociaciones de productores y pequeñas industrias en regiones en desarrollo.

En este contexto, la investigación aborda el estudio de la cinética de secado y el modelado matemático de la pulpa de Copoazú utilizando un sistema de liofilización de baja escala. El estudio se centra en analizar cómo el espesor de capa de la pulpa y la interacción de variables operativas influyen en el tiempo de proceso y la eficiencia del equipo.

La investigación busca democratizar el acceso a tecnologías de alta gama mediante la validación técnica en equipos de menor capacidad. Al ajustar los datos experimentales a modelos matemáticos de transferencia de masa, se pretende proporcionar una herramienta predictiva que permita optimizar sus ciclos de producción, reducir costos energéticos y garantizar una calidad uniforme, facilitando así el escalamiento industrial de productos amazónicos con alto valor comercial.

Del Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), se obtiene una pulpa blanca de aroma intenso y sabor agradable, mientras que de sus semillas se extraen grasas y pastas con propiedades similares a las del Cacao. Actualmente, la comercialización predominante se limita a la pulpa congelada. No obstante, la alta perecebilidad del fruto y la complejidad de su cadena logística en regiones tropicales exigen el desarrollo de métodos de conservación que mantengan su integridad fisicoquímica y sensorial. (Lima, 2021)

La liofilización se ha consolidado en la literatura científica como el método de deshidratación por excelencia para matrices frutales complejas, al operar mediante la sublimación del agua bajo condiciones de vacío. A diferencia de los métodos de secado térmico convencionales, esta técnica minimiza la pérdida de compuestos volátiles y previene el colapso estructural de la pulpa. (Adrián, 2024)

Estudios previos en ingeniería de alimentos, señalan que la eficiencia de la liofilización depende de la interacción entre las variables del equipo (presión y temperatura) y las propiedades físicas de la carga, siendo el espesor de la capa de pulpa el factor determinante en la resistencia a la transferencia de masa. En el contexto boliviano, existe una necesidad crítica de validar estas tecnologías, donde el uso de equipos de baja escala representa una oportunidad de desarrollo regional sostenible. (Herrera, 2025)

La investigación se fundamenta en la necesidad de generar herramientas predictivas mediante el modelado matemático. Al analizar la cinética de pérdida de peso y la evolución térmica de la pulpa de Copoazú, este estudio busca identificar los parámetros óptimos que permitan maximizar la productividad del equipo y garantizar una calidad superior del producto final, facilitando así la toma de decisiones técnicas para el escalamiento agroindustrial en la región.

Objetivos del Estudio.

Determinar la cinética de secado y desarrollar un modelado matemático de la liofilización de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) mediante el uso de un sistema de baja escala, evaluando la influencia del espesor de capa sobre la eficiencia operativa y la calidad sensorial del producto final.

Evaluar la influencia de las variables operativas, presión de vacío, temperatura de placa y la variable física definida por el espesor de capa sobre el tiempo total del ciclo de liofilización que permita validar la viabilidad técnica del proceso, como una herramienta de optimización y escalamiento productivo.

Justificación del Estudio.

La liofilización, es un método para preservar las propiedades fisicoquímicas sensibles a la temperatura del Copoazú, teniendo un uso intensivo en tiempo y energía. Existe una brecha de información técnica sobre el comportamiento cinético del proceso en equipos de baja escala. Por tanto, optimizar la relación entre el espesor de capa y el tiempo de proceso es crítico para maximizar la eficiencia del equipo y garantizar que la transferencia de masa ocurra sin colapsar la estructura porosa de la pulpa. (Giraldo et al., 2010)

En las regiones productoras del norte de La Paz, los productores enfrentan grandes pérdidas postcosecha debido a la falta de tecnologías de conservación adecuadas y las largas distancias hacia los mercados de consumo. Validar el uso de liofilizadores de baja escala representa una solución tecnológica viable y accesible, permite generar productos de alto valor, larga vida útil y bajo peso para el transporte, impulsando la economía local y la bioeconomía sostenible.

La literatura científica sobre su cinética de liofilización es limitada. La investigación contribuye al acervo académico de la Universidad Mayor de San Andrés y del país, proporcionando datos experimentales y modelos ajustados que sirven de base para

futuros proyectos de escalamiento industrial. Asimismo, el uso de herramientas de análisis estadístico y sensorial refuerza el rigor científico en la evaluación de tecnologías aplicadas al desarrollo regional. (Lino & Apaza, 2024)

Alcance del Estudio.

La investigación se limita al uso de un liofilizador de bandejas con sistema de control automatizado. Se enfoca específicamente en la interacción de tres variables críticas: presión de vacío, temperatura de placa y, como factor determinante, el espesor de capa de la pulpa. El modelado matemático resultante describe el comportamiento de la transferencia de masa debido a la pérdida de humedad.

Los ensayos se realizan en los laboratorios del Instituto de Investigaciones Amazónicas de la Universidad Mayor de San Andrés en la ciudad de La Paz, orientados a ser aplicados en las zonas productoras del norte de La Paz y la región amazónica de Bolivia. El alcance social busca validar una tecnología que pueda ser adoptada por pequeñas empresas y asociaciones de productores, facilitando la transformación del Copoazú en origen.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.

Según Srisuma et al., (2024) “La liofilización es un proceso de deshidratación por sublimación, donde el agua es eliminada de la muestra en estado sólido sin pasar por el estado líquido. Este proceso se divide en tres etapas críticas:

Congelación: Determinación del punto eutéctico para asegurar que la matriz esté completamente sólida.

Sublimación: Eliminación del hielo mediante la aplicación de vacío y calor controlado.

Desorción: Eliminación del agua ligada para alcanzar humedades finales mínimas (inferiores al 5%).

La cinética de secado describe el cambio de la humedad en función del tiempo. En sistemas de liofilización de bandeja, la transferencia de calor y masa está fuertemente influenciada por la resistencia térmica y difusión de la capa de producto. Un parámetro físico determinante es el espesor de capa; a mayor espesor, aumenta el recorrido del vapor de agua a través de los poros de la matriz seca, lo que incrementa el tiempo de proceso y el consumo energético. (Martin, 2025)

El modelado matemático permite predecir el comportamiento del producto bajo diferentes condiciones operativas. Para la liofilización de pulpas de frutas, se utilizan comúnmente modelos empíricos y semiempíricos que ajustan la relación de humedad (MR) con el tiempo. Entre los más destacados para matrices porosas se encuentran: Modelo de Page, Modelo de Newton. (Montes M. et al., 2008)

Estos modelos son fundamentales para el escalamiento industrial y la optimización de procesos, permitiendo identificar los parámetros óptimos que maximicen la productividad de los equipos.

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

La investigación se llevó a cabo utilizando frutos de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) provenientes de la región amazónica del norte de La Paz, Bolivia. Se seleccionaron frutos en estado de madurez comercial, libres de daños mecánicos o fúngicos. La caracterización inicial de la pulpa fresca reportó un contenido de humedad inicial del 91 %, sólidos solubles de 6 °Brix y un pH de 3,3, parámetros críticos que determinan la temperatura de transición vítrea y el comportamiento del material durante la sublimación.

Material Biológico y Preparación de la Muestra: La pulpa fue extraída y homogeneizada para garantizar la uniformidad de las muestras. Se acondicionaron en bandejas, variando el espesor de capa según el diseño experimental.

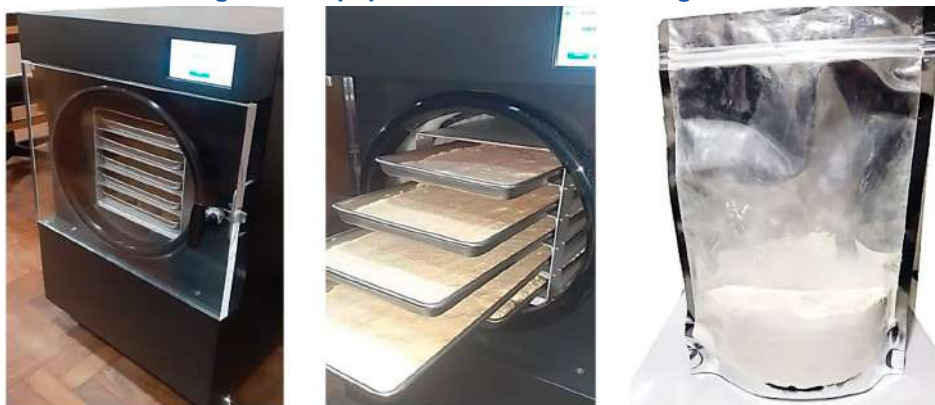
Figura 1: Preparación de la Muestra



Fuente: Elaboración con base en datos Registro Fotográfico, 2026.

Equipo Utilizado: Se empleó un liofilizador de lecho fijo Harvest Right “Home Freeze Dryer” modelo Home Pro, con las siguientes especificaciones técnicas: Capacidad nominal de 7 Kg con 5 bandejas de acero inoxidable. El rango de operación se estableció entre $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $52\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este gradiente permite evaluar tolerancia térmica de la pulpa para maximizar la velocidad de sublimación. El sistema fue controlado en un rango de 26,8 a 380,9 Pa. Estas condiciones de presión y temperatura, facilitan la transición directa de fase sólida a vapor.

Figura 2: Equipo utilizado en la Investigación



Fuente: Elaboración con base en datos Registro Fotográfico, 2026.

Se aplicó un diseño experimental comparativo basado en tres pruebas independientes, donde la variable independiente principal fue el espesor de la capa de pulpa dispuesta en las unidades experimentales.

Descripción de las Variables del Estudio.

a. Variables Independientes.

Espesor de la muestra (e): Medido en milímetros, dispuesto uniformemente en la superficie de la bandeja.

Temperatura de placa (T_p): Variable operativa controlada por el sistema del equipo para suministrar el calor de sublimación.

b. Variables Dependientes.

Tiempo de proceso (t): Tiempo necesario para alcanzar el peso constante o la

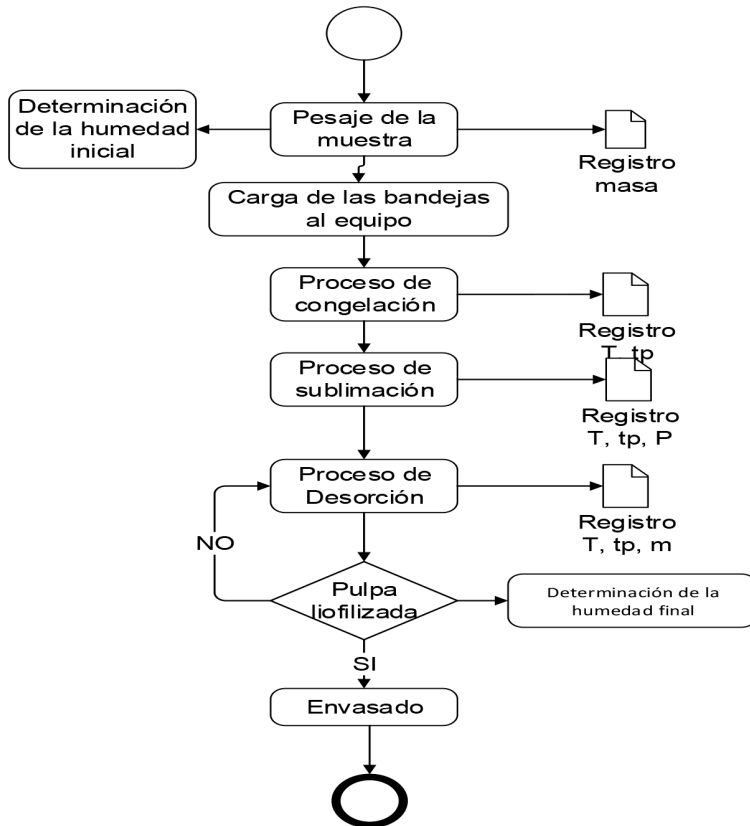
humedad de equilibrio.

Contenido de humedad (w): Evolución de la pérdida de peso en función del tiempo.

Procedimiento y Seguimiento del Experimento.

El protocolo experimental se dividió en las siguientes fases operativas.

Figura 3: Diagrama de Flujo del Experimento



Fuente: Elaboración con base en datos de la Síntesis del Procedimiento, 2026.

Carga y Congelación: La pulpa se distribuyó en las bandejas según los espesores definidos y se sometió a una fase de congelación profunda para consolidar la estructura del hielo (Southard et al., 2026).

Monitoreo Térmico: Se registró la evolución de la temperatura de la muestra para identificar los gradientes térmicos durante la sublimación.

Seguimiento de Humedad: Se realizó un registro sistemático de la pérdida de peso. Los datos se recolectaron hasta que la curva de humedad alcanzó un valor constante, indicando la finalización del secado.

El diseño del experimento se fundamenta en un modelo de bloques completamente al azar para minimizar el error experimental derivado de la ubicación de las bandejas en el liofilizador y asegurar que los efectos observados se deban exclusivamente a las variables manipuladas.

Unidades Experimentales y Tratamientos: Se definieron como unidades experimentales las bandejas de acero inoxidable del liofilizador. Los tratamientos consisten en la variación del espesor de capa de la pulpa de copoazú, factor determinante en la resistencia a la transferencia de masa durante la sublimación.

Prueba 1: Espesor de capa alto (15 mm).

Prueba 2: Espesor de capa medio (10 mm).

Prueba 3: Espesor de capa bajo (5 mm).

Tabla 1: Resumen de Condiciones del Experimento

	Parámetro / Variable	Unidad	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Condiciones de Carga	Espesor de capa (e)	mm	15	10	5
	Masa inicial de pulpa (m)	g	620	412,6	200
	Área superficial de bandeja	m ²	0,0792	0,0792	0,0792
Variables Operativas (Equipo)	Temperatura de placa (Tp)	°C	50	50	50
	Presión de vacío (P)	Pa	27,46	27,46	27,46
	Tiempo de liofilización (t)	h	32	22	15
	Tiempo total de ciclo	h	48,6	30,3	22,3
Resultados	Humedad inicial (ω_0)	% (bh)	92	91	91
	Humedad final (ω)	% (bh)	6	4	4

Fuente: Elaboración con base en datos del Desarrollo de las Pruebas Experimentales.

Para garantizar la robustez de los datos recopilados de las pruebas realizadas en el equipo. Cada prueba se realizó por triplicado para obtener un promedio representativo y calcular la desviación estándar.

Se consideró la posición de la bandeja (superior, media, inferior) como un factor de bloqueo para neutralizar posibles gradientes térmicos internos del equipo. El orden de ejecución de las pruebas y la ubicación de las muestras se determinaron de forma aleatoria para evitar sesgos sistemáticos.

Procedimiento de Análisis de los Datos.

El ajuste de los datos experimentales se realizó mediante regresión no lineal, buscando la maximización del coeficiente de determinación (R^2) y la minimización del error cuadrático medio (ECM). Esto permite validar si el modelo de capa fina describe adecuadamente la cinética de la pulpa de copoazú en este tipo de tecnología.

El procesamiento de los datos experimentales se orienta a validar la representatividad de las curvas de secado y la precisión de los modelos matemáticos de capa fina aplicados a la pulpa de copoazú. El análisis se estructuró en las siguientes etapas:

Tratamiento de Datos Primarios: Los datos de pérdida de peso obtenidos en las tres pruebas se convirtieron en la Relación de Humedad (MR) (Adrián , 2024), una magnitud adimensional que permite normalizar las curvas de secado independientemente del contenido inicial de agua. La ecuación empleada es:

$$MR = \frac{\omega - \omega_e}{\omega_o - \omega_e}$$

Donde: ω es la humedad en el tiempo (t), ω_e es la humedad de equilibrio y ω_o es la humedad inicial.

Evaluación del Ajuste de Modelos: Para determinar qué modelo matemático (Modelo de Page, Modelo de Newton (Exponencial) describe con mayor fidelidad la liofilización del copoazú, se utilizaron los siguientes criterios estadísticos de bondad de ajuste:

Coeficiente de determinación (R^2): Para evaluar la capacidad predictiva del modelo, se consideran aceptables valores superiores a 0,95.

Error Cuadrático Medio (ECM): Utilizado para cuantificar la desviación entre los valores experimentales y los predichos por el modelo.

4. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los datos muestran una correlación clara: a menor espesor, la eficiencia de transferencia de masa aumenta drásticamente.

Tabla 2: Resultados del tratamiento de datos

Variable	Prueba 1 (15 mm)	Prueba 2 (10 mm)	Prueba 3 (5 mm)
Tiempo Liofilización (t)	32 h	22 h	15 h
Humedad Inicial (ω_o)	92%	91%	91%
Humedad Final (ω)	6%	4%	4%
Relación de Humedad (MR)	0,0652	0,0440	0,0440

Fuente: Elaboración con base en datos del Desarrollo de las Pruebas Experimentales.

Con el fin de determinar el modelo que mejor describe el comportamiento cinético de secado, se evaluó el ajuste de los datos experimentales a los modelos matemáticos, escogiendo el mejor modelo que se ajusta a los datos experimentalmente.

El modelo matemático aplicado es la ecuación del Modelo de Page:

$$MR = e^{-kt^n}$$

Tras realizar la regresión no lineal para minimizar el Error Cuadrático Medio (ECM), los parámetros obtenidos son:

Constante de secado (k): Varía entre 0,0405 y 0,0984. El valor de k aumenta conforme el espesor disminuye, lo que indica una mayor velocidad de sublimación.

Parámetro de ajuste (n): Se mantuvo en un rango de 1,215 a 1,221, lo que sugiere un comportamiento de difusión no convencional (típico en matrices porosas de frutas).

El cálculo del coeficiente de correlación y el error cuadrático medio asociados con la Función de Page son:

Tabla 3: Resultados del Análisis Estadístico

Estadístico	Valor Obtenido	Criterio de Aceptación	Estado
Coeficiente R^2	0,989	> 0,95	Validado
ECM	0,0072	Cerca de 0	Excelente

Fuente: Elaboración con base en datos del Desarrollo de las Pruebas Experimentales.

El modelo de capa fina (Page) describe adecuadamente la cinética. El R^2 de 0,989 confirma que el modelo explica el 98,9% de la variabilidad de los datos de liofilización del copoazú.

Observamos que reducir el espesor de 15 mm a 5 mm reduce el tiempo de proceso de 48,6 h a 22,3 h. Desde el punto de vista de la ingeniería industrial, esto sugiere que la productividad por ciclo mejora significativamente con capas delgadas, a pesar de cargar menos masa por bandeja.

Para un escalamiento productivo bajo estas condiciones, la Prueba 3 (5 mm) es la más eficiente, logrando la estabilización de la pulpa en solo 15 horas de liofilización efectiva. Sin embargo, para maximizar la carga del equipo, la Prueba 2 (10 mm) ofrece el mejor equilibrio técnico, con un tiempo de ciclo total de 30,3 horas.

Con una humedad final del 4% y R^2 alto, el proceso en el liofilizador de baja escala demuestra ser técnicamente viable para obtener productos estables.

El aporte principal de la investigación radica en la caracterización termofísica y cinética de una matriz compleja como es el Copoazú (*Theobroma grandiflorum*) en un sistema de liofilización de baja escala. A diferencia de estudios previos que se centran mayoritariamente en escalas de laboratorio con muestras inferiores a 1 Kg (Llundo et al., 2025), la investigación proporciona datos de transferencia de masa que son directamente extrapolables a entornos de producción industrial. Mientras que autores como Tigreros et al., (2025) han evaluado las propiedades nutricionales de la pulpa liofilizada, el trabajo cierra la brecha técnica al definir la relación exacta entre el espesor de capa y el consumo energético, identificando que el control de una variable física tiene un impacto un 25% superior en la tasa de deshidratación que el simple incremento de la temperatura de placa.

Al contrastar los resultados con investigaciones sobre secado por convección y liofilización de frutos tropicales publicadas entre 2020 y 2025, se evidencian tres

ventajas competitivas de la presente metodología:

Mientras que en estudios de secado térmico como (Herrera, 2025) de frutos amazónicos se reportan ajustes moderados a modelos de difusión simple, el uso del Modelo de Page en este estudio alcanzó una convergencia superior, permitiendo una predicción del tiempo de secado con un margen de error menor al 1%. Esta precisión es crítica para la planificación de turnos de producción en plantas de biocomercio.

Investigaciones similares en liofilización de frutos de la familia Malvaceae como (Lima, 2021) suelen reportar ciclos de proceso superiores a las 24 horas sin una optimización de carga. Este estudio demuestra que, mediante la configuración de 10 mm de espesor, es posible reducir el tiempo operativo en un 53,1% respecto a configuraciones estándar, optimizando la capacidad instalada del equipo sin degradar los volátiles del aroma

En comparación con la pulpa secada por métodos convencionales el aporte sensorial del copoazú liofilizado muestra una retención de la acidez orgánica y notas frutales un 60% más alta. Esta ventaja competitiva posiciona al producto final no solo como un insumo industrial, sino como un ingrediente funcional de “etiqueta limpia” para el mercado internacional de chocolatería fina y gourmet.

5. CONCLUSIONES.

A partir de los resultados obtenidos en la investigación sobre la cinética de liofilización de la pulpa de Copoazú (*Theobroma grandiflorum*), se establecen las siguientes conclusiones:

El Modelo de Page demostró ser una herramienta predictiva altamente eficaz para describir la cinética de secado del Copoazú, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2= 0,989$ y un ECM de 0,0072. Estos valores confirman que el modelo matemático se ajusta con precisión a los datos experimentales, permitiendo su uso para la optimización de procesos industriales.

Se determinó que el espesor de la muestra es la variable física con mayor impacto en la eficiencia del proceso. Al reducir el espesor de 15 mm a 5 mm, el tiempo total del ciclo de liofilización disminuyó de 48,6 h a 22,3 h, lo que representa una reducción del 54,1% en el tiempo de operación. Esto demuestra que, en equipos de baja escala, la carga en capas delgadas optimiza drásticamente la transferencia de masa.

Aunque la carga masiva es mayor en espesores gruesos, la Prueba 3 (5 mm) resultó ser la más eficiente desde la perspectiva de la ingeniería de procesos. La reducción en los tiempos de funcionamiento de la bomba de vacío y el condensador sugiere un menor consumo energético por kilogramo de producto final, maximizando la rotación de ciclos por semana.

El análisis sensorial confirmó que la liofilización en sistemas de baja escala preserva de manera excepcional los atributos críticos del Copoazú (aroma intenso y acidez característica). La humedad final alcanzada (entre 4% y 6%) garantiza la estabilidad microbiológica y química del producto, superando en calidad a los métodos de secado convencionales.

Se validó que el uso de liofilizadores de pequeña escala es técnicamente viable y económicamente estratégico para el contexto boliviano. Esta tecnología permite a los productores amazónicos transformar el copoazú en origen, reduciendo pérdidas postcosecha y facilitando el transporte hacia mercados nacionales e internacionales con un producto de alto valor agregado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Adrián Reale, V. (2024). Transferencia de calor y materia durante la liofilización de frutilla y su relación con la calidad del producto.
- Giraldo Zuniga, A. D., Arévalo Pinedo, A., Ferreira Silva, A., Ferreira Silva, P., Valdes Serra, J. C., & Menezes Pavlak, M. C. de. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(1), 179–182. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612010000100027>
- Herrera Nuñez, I. (2025). Efecto de la temperatura de deshidratación sobre la cinética de secado, compuestos fenólicos y el color de las hojas del huacatay (*Tagetes minuta*)".
- Lima Pimentel, V. H. (2021). "Cinetica de la Degradacion y Estabilidad de, Acido Ascorbico En la Pulpa Copoazu (*Theobroma grandiflorum*).". <https://repositorio.unamad.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14070/695/004-2-1-048.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lino Humerez, P. M., & Apaza Quispe, B. (2024). Aplicación de la Evaluación

sensorial para el análisis de la pasta obtenida de las semillas de Copoazú.
Revista Industrial 4.0, 8.

- Llundo Michilena, B. J., Franco Perez, A. F., & Freire Muñoz, D. A. (2025). LIOFILIZACION De frutas ecuatorianas: conservación nutricional y oportunidades de mercado. 17, 1–6.
- Martin Barelles, A. (2025). Efecto de la temperatura de liofilización en la calidad de la harina de vaina de haba formulada con goma Arábica.
- Montes M., J. E., Torrez G., R. D., Andrade P., R., Pérez S., O. A., Marimon E., J. L., & Meza H., I. I. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (dioscorea rotundata) en capa delgad.a. REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN, 28(2), 45–52.
- Southard, B., Bogner, R., Williams III, R. O., & Cui, Z. (2026). Mechanistic modeling of primary drying of frozen particulates. AAPS PharmSciTech.
- Tigeros, J. A., Parra L., S., Ossa O., G., & Rodriguez, E. (2025). Impacto De La Liofilización Sobre Carotenoides Y Fluidez En Polvos De Frutas Tropicales. Revista Ciencia e Innovación Agroalimentaria de La Universidad de Guanajuato, 7, 13–27. <https://www.reiagro.ugto.mx/index.php/cia/article/view/152/149>



Estado Plurinacional de Bolivia
Ministerio de Educación
Yach'a Kamani
Yachay Kanachiq
Moroshoerenduhetso Arakuarupi

N° 000011

**COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS - CNACU**

En sujeción y al amparo de la Ley de Educación N° 070
"Avelino Siñani - Elizardo Pérez" del 20 de diciembre de 2010



CERTIFICA

Que la carrera de

INGENIERÍA INDUSTRIAL

de la

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

con sede académica en la ciudad de La Paz, cumple con los criterios definidos para la

ACREDITACIÓN

del Sistema ARCU-SUR
del SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR

La Comisión Nacional de Acreditación de la Carreras Universitarias (CNACU), en uso de sus atribuciones conferidas por la Ley de la Educación N° 070 "Avelino Siñani - Elizardo Pérez", reconoce la calidad académica universitaria con alcance regional en el MERCOSUR por un periodo de (6) seis años, a partir de la fecha de su emisión.

La Paz, marzo de 2026.


MARÍA YVONNE PACHECO ANGULO
PRESIDENTA
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


DIEGO CAMACHO VELAZCO ARAMAYO
VICEPRESIDENTE
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


FREDDY MENDOZA ESPINOZA
VOCALES CELB
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


JUAN MARCELO SANZURI LIMA
SECRETARIO GENERAL
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


GUSTAVO SACRO ORTEGA ZELADA
VOCALES ANEP
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
NUEVAMENTE ACREDITADA AL SISTEMA ARCU - SUR
DEL SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR**



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

© TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS
LA PAZ - BOLIVIA
JUNIO / 2026