

Desarrollo y validación de un sistema piloto de secado para pellets formulados con subproductos del proceso de extracción de aceite de palma en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A

Silvia Juliana Rangel Mantilla  
Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Química  
Modalidad práctica empresarial

Directora  
Viviana Sánchez Torres  
PhD. en Ingeniería Química

Tutor  
Óscar Mauricio Diaz Rodríguez  
MSc. En Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga

2025

### **Agradecimientos**

*A la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A. por darme la oportunidad de aprender de su trabajo, en especial al ingeniero Óscar Díaz y la ingeniera Camila Quintero por su valioso acompañamiento, paciencia y guía constante durante el desarrollo y culminación de este trabajo.*

*A la profesora Viviana Sánchez por su acompañamiento y enseñanzas que me aportaron tanto en este proyecto.*

*A la Universidad Industrial de Santander, en especial a los profesores de ingeniería química quienes aportaron tanto en mi desarrollo académico y personal, a mis amigos de clase por todos los momentos compartidos en especial a mis mejores amigos Lou, y Freddy quienes siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo incondicional.*

### **Dedicatoria**

*A Dios por que siempre dio cien pasos antes de que yo diera uno.*

*A mi familia y mis amigos por llenar mi vida de fuerza y amor.*

*A mi tía Nelly, por su amor inagotable.*

*A mis padres, Mónica y Henry quienes me enseñaron a soñar en grande y sobre todo me brindan las herramientas necesarias para hacerlos realidad.*

*A mi hermana Natalia, por ser mi apoyo incondicional, por creer siempre en mí, con ella no solo comparto la sangre si no también el alma.*

*A mi hermano Thomas, para que siempre crea en sus sueños y trabaje por ellos con amor y dedicación.*

## Tabla de contenido

<b>Introducción</b> .....	10
<b>1. Objetivos</b> .....	13
<b>1.1. Objetivo General</b> .....	13
<b>1.2. Objetivos Específicos</b> .....	13
<b>2. Marco conceptual</b> .....	14
<b>2.1. Equipos y conceptos</b> .....	14
<i>2.1.1. Extracción de aceite de palma</i> .....	14
<i>2.1.2. Torta de tricanter</i> .....	15
<i>2.1.3. Torta de palmiste</i> .....	16
<i>2.1.4. Mezcla alimenticia (Pellets)</i> .....	16
<i>2.1.5. Peletizadora</i> .....	16
<b>2.2. Proceso de secado</b> .....	17
<i>2.2.1. Secado por convección</i> .....	18
<i>2.2.2. Equipos para secado</i> .....	18
<b>3. Metodología</b> .....	20
<b>3.1. Caracterización de los pellets a escala laboratorio</b> .....	20
<i>3.1.1. Producción de pellets para pruebas de laboratorio</i> .....	20
<i>3.1.2 Determinación de curvas de secado escala laboratorio</i> .....	21
<i>3.1.3 Determinación densidad aparente</i> .....	22
<b>3.2. Construcción e instalación del prototipo</b> .....	23
<b>3.3. Validación del sistema de secado</b> .....	23
<i>3.3.1. Pruebas experimentales del sistema de secado</i> .....	23
<b>4. Resultados y discusión</b> .....	27
<b>4.1. Caracterización del proceso de secado</b> .....	27
<i>4.1.1. Determinación de curvas de secado escala laboratorio</i> .....	28
<i>4.1.2. Determinación de la densidad aparente</i> .....	29
<b>4.2. Construcción e instalación del prototipo</b> .....	30
<b>4.3. Validación del sistema de secado</b> .....	31
<b>5. Conclusiones</b> .....	39
<b>6. Referencias</b> .....	40
<b>7. Apéndices</b> .....	42

**Lista de figuras**

<b>Figura 1</b> Diagrama de flujo sistema de clarificación dinámica.....	11
<b>Figura 2</b> Partes de la peletizadora.....	17
<b>Figura 3</b> Ventilador industrial utilizado para flujo de aire en el proceso.....	19
<b>Figura 4</b> Equipos para medición de parámetros de proceso .....	19
<b>Figura 5</b> Metodología de desarrollo del trabajo de grado.....	20
<b>Figura 6</b> Diagrama BFD elaboración de pellets formulados .....	21
<b>Figura 7</b> Etapas del análisis estadístico de los datos.....	26
<b>Figura 8</b> Proceso de peletizado a) equipo de peletizado b) apariencia pellets.....	27
<b>Figura 9</b> Partes equipo de secado de pellets.....	31
<b>Figura 10</b> Análisis de capacidad de las pruebas de humedad .....	34
<b>Figura 11</b> Comportamiento constante K promedio en bandejas.....	36

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1</b> Curvas de secado de pellets a diferentes temperaturas .....	28
<b>Tabla 2</b> Cálculo de la densidad aparente de los pellets.....	29
<b>Tabla 3</b> Condiciones de operación del sistema para lograr una $T=70^{\circ}\text{C}$ .....	32
<b>Tabla 4</b> Comportamiento humedad de pellets con carga de 5kg por bandeja.....	32
<b>Tabla 5</b> Comportamiento humedad de pellets con carga de 10kg por bandeja.....	33
<b>Tabla 6</b> Comportamiento humedad de pellets con carga de 15kg por bandeja.....	33
<b>Tabla 7</b> Comportamiento humedad de pellets con carga de 20kg por bandeja.....	33
<b>Tabla 8</b> Resultados análisis ANOVA de las K.....	36
<b>Tabla 9</b> Composición de alimento y requerimiento de equipos.....	37
<b>Tabla 10</b> Costos de proceso de secado.....	38
<b>Tabla 11</b> Costo final de producción de pellets tras proceso de secado .....	38

**Lista de apéndices**

<b>Apéndice A</b> Medidas cámara de secado.....	42
<b>Apéndice B</b> Medidas módulo de bandejas. ....	43

## Resumen

**Título:** Desarrollo y validación de un sistema piloto de secado para pellets formulados con subproductos del proceso de extracción de aceite de palma en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A.\*

**Autor:** Silvia Juliana Rangel Mantilla. \*\*

**Palabras Clave:** Torta de tricanter, pellets, prototipo de secado, secado convectivo.

**Descripción:** Palmeras de Puerto Wilches S.A. es una empresa colombiana dedicada al cultivo, cosecha y extracción de aceite de palma, en cuyo proceso se generan subproductos con un alto potencial de valorización. Entre ellos se encuentra la torta de tricanter, caracterizada por su contenido nutricional, pero con una humedad cercana al 75%, lo que acelera su descomposición y limita su aprovechamiento. Como alternativa, la empresa formuló un alimento en presentación de pellets conformados por torta de palmiste y torta de tricanter. Estos pellets, sin embargo, requieren ser estabilizados mediante un proceso de secado que permita reducir la humedad hasta niveles aceptables para su almacenamiento y uso como insumo en alimentación animal. Para este fin se desarrolló un sistema de secado tipo bandejas, compuesto por un ventilador industrial, un intercambiador de calor y una corriente de vapor como fuente de energía térmica. Durante la validación experimental se establecieron variables críticas de operación como la temperatura del aire de secado (70 °C), el caudal de aire y la capacidad de carga de las bandejas (15 kg). A partir de los ensayos realizados se obtuvieron curvas de secado representativas que evidenciaron la reducción de la humedad inicial, cercana al 60%, hasta valores alrededor del 12%, en cumplimiento con los límites establecidos (ICA).

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Viviana Sánchez Torres, PhD en Ingeniería Química. Tutor: Óscar Mauricio Díaz Rodríguez, MSc en Ingeniería Química

### **Abstract**

**Title:** Development and Validation of a Pilot Drying System for Pellets Formulated with By-products from the Palm Oil Extraction Process at Palmeras de Puerto Wilches S.A\*

**Author:** Silvia Juliana Rangel Mantilla.

**Keywords:** Tricanter cake, Pellets, Drying prototype, Convective drying.

**Description:** Palmeras de Puerto Wilches S.A. is a Colombian company dedicated to the cultivation, harvesting, and extraction of palm oil, a process in which several by-products with high valorization potential are generated. Among these is the tricanter cake, characterized by its nutritional content but with a moisture level close to 75%, which accelerates its decomposition and limits its potential use. As an alternative, the company formulated an animal feed in the form of pellets composed of palm kernel cake and tricanter cake. However, these pellets require stabilization through a drying process that reduces the moisture content to acceptable levels for storage and use as an ingredient in animal feed. To achieve this, a tray-type drying system was developed, consisting of an industrial fan, a heat exchanger, and a steam stream as the thermal energy source. During the experimental validation, critical operating variables were established, such as the drying air temperature (70 °C), air flow rate, and tray loading capacity (15 kg). The tests conducted produced representative drying curves that demonstrated the reduction of the initial moisture content approximately 60% to values around 12%, complying with the limits established by the ICA.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Viviana Sánchez Torres, PhD in Chemical Engineering. Tutor: Óscar Mauricio Díaz Rodríguez, MSc in Chemical Engineering.

## **Introducción**

Palmeras de Puerto Wilches S.A. (PPW), es una empresa colombiana ubicada en el departamento de Santander, fundada en 1985 en Bucaramanga. Durante su trayectoria se ha dedicado a la extracción, cultivo, siembra y cosecha de la palma aceitera. La planta extractora tiene una capacidad de 55 ton/h de Racimo de Fruto Fresco (RFF) y de ese proceso productivo se comercializan productos terminados como el aceite crudo de palma (CPO) y aceite de palmiste (PKO). También algunos subproductos generados como la cascarilla, torta de palmiste, fibra del mesocarpio y la torta de tricanter.

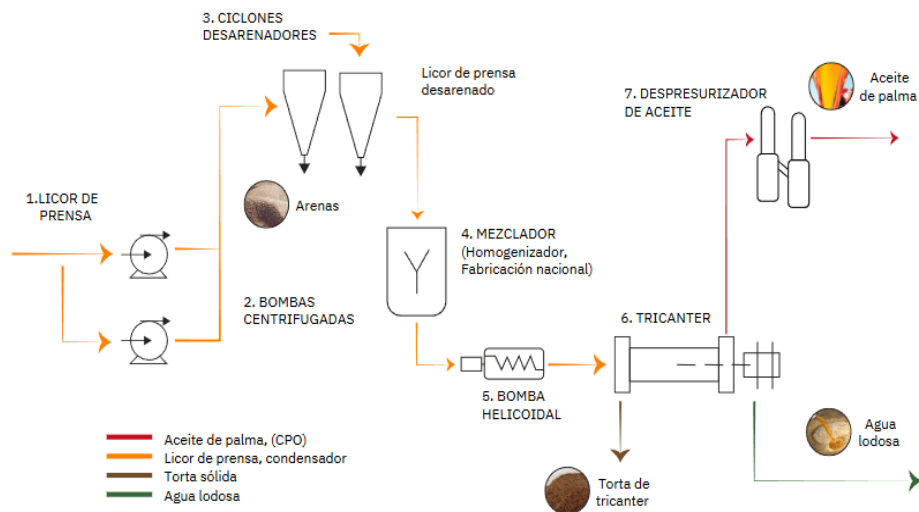
La planta extractora opera con un proceso mecánico en seis etapas: recepción del fruto fresco, esterilización con vapor, desfrutación, digestión del mesocarpio, prensado y clarificación. En la digestión se libera parte del aceite crudo de palma (CPO) y se separa la almendra para obtener aceite de palmiste (PKO) y torta. El prensado genera el licor de prensa, mezcla de aceite y efluentes, que requiere clarificación para recuperar el CPO.

La clarificación del licor de prensa se puede hacer mediante un proceso de clarificación estática consiste en un preclarificado, clarificado, desarenado, filtrado, centrifugado y por último un secado del aceite (CPO). Otro proceso de clarificación es el dinámico, que permite la separación simultánea de tres fases, dos líquidos inmiscibles con diferente densidad y una fase sólida, aprovechando la diferencia de densidades existente entre el aceite y el agua y que los sólidos (Rackerseder, 2013). PPW actualmente cuenta con un proceso de clarificación dinámica el cual es descrito gráficamente en la figura 1, a partir de este proceso de clarificación se ha logrado disminuir pérdidas de aceite en efluentes, disminuir el consumo de agua y reducir los niveles de

DQO (Demanda Química de Oxígeno) de entrada al sistema de tratamientos de efluentes por la separación de la fase sólida.

**Figura 1**

*Diagrama de flujo sistema de clarificación dinámica*



PPW en su proceso genera aproximadamente 3 ton/h de torta de tricanter, este subproducto es utilizado en la actualidad principalmente en el cultivo de la palma, y como suplemento animal debido a sus características nutricionales, su porcentaje de fibra y proteína la convierten en una materia prima que debe ser aprovechada. Sin embargo, su contenido de humedad superior al 70% representa una limitación significativa ya que acelera su descomposición microbológica. A raíz de esta limitación, la empresa identificó una alternativa para darle un valor agregado a la torta de tricanter a partir de la formulación de una mezcla alimenticia de subproductos en presentación de pellets, con la que se logra obtener una humedad final del 12%. Estos pellets están compuestos de una humedad aproximada del 60% y para llegar a una humedad aproximada del 12% se hizo necesario realizar un proceso de secado que permitiera retirar la humedad presente en la mezcla alimenticia.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en el desarrollo y validación de un sistema piloto de secado que permita reducir el contenido de humedad de los pellets para estabilizar el material de la torta de tricanter. Esto facilita su almacenamiento y transporte, además genera una valorización integral de los subproductos del proceso de extracción de aceite de palma.

La construcción del prototipo de secado se realizó a partir de la integración de los recursos disponibles en la planta, lo que permitió diseñar una unidad práctica y funcional. El sistema incorporó un radiador de vapor como fuente de calor, un ventilador centrífugo para garantizar el flujo de aire y una cámara de secado piloto fabricada con láminas metálicas, en la cual se dispusieron dos estructuras con un total de 11 bandejas. Este diseño permitió reproducir las condiciones de un proceso de secado convectivo a nivel piloto, facilitando la validación experimental del sistema y la obtención de información representativa para el análisis técnico del proceso.

## **1. Objetivos**

### **1.1.Objetivo General**

Desarrollar y validar un sistema de secado piloto para pellets formulados con subproductos del proceso de aceite de palma en Palmeras de Puerto Wilches S.A., mediante la construcción de un prototipo en la empresa.

### **1.2.Objetivos Específicos**

Caracterizar el proceso de secado de pellets, determinando las curvas de secado y los parámetros críticos de operación (temperatura, tiempo de residencia y flujo de aire) para lograr una reducción de humedad de acuerdo con la normativa para la alimentación animal.

Desarrollar y construir un prototipo de sistema de secado piloto, empleando vapor de agua como fuente de energía.

Evaluar el desempeño del prototipo mediante pruebas experimentales, analizando la reducción de humedad, curvas de secado y la calidad final del pellet.

## 2. Marco conceptual

### 2.1. Equipos y conceptos

#### 2.1.1. Extracción de aceite de palma

El proceso de extracción de aceite de palma tiene como materia prima base el fruto de palma o corozo, esta pertenece principalmente a la familia *Elaeis guineensis*. Cuando se cultiva con propósitos comerciales, tiene en promedio una vida que oscila entre los 24 y los 28 años, de acuerdo con el tipo de material plantado. Durante este lapso, cada palma emite racimos de frutos oleaginosos, que pueden alcanzar producciones de 4.2 toneladas durante toda su vida productiva. El fruto es sometido a 6 etapas de proceso en las cuales es transformado el corozo en aceite crudo de palma (COP), aceite de palmiste (PKO), torta de palmiste, torta de tricanter y otros subproductos.

El proceso de producción de aceite de palma inicia con la recepción del fruto allí se evalúa la calidad de este, seguido de la esterilización de los racimos de fruto fresco en autoclaves, donde mediante vapor saturado se logra ablandar los frutos e inactivar enzimas que generan acidez y se facilita la posterior separación. A continuación, en el desfrutamiento, los frutos son desprendidos del raquis dentro de un tambor rotatorio, obteniendo como subproducto racimos vacíos que pueden ser aprovechados como abono orgánico.

Posteriormente, los frutos pasan a la etapa de digestión, en la cual, mediante maceración con vapor en digestores, se rompen las celdas de la pulpa liberando el aceite. Este material digerido se conduce al prensado, donde se obtiene el licor de prensa, compuesto por aceite, agua y sólidos, junto con la torta prensada que se destina al área de palmistería.

El licor de prensa es enviado al proceso de clarificación, donde se separa el aceite crudo de palma de los lodos y el agua. En esta etapa se destaca la clarificación dinámica, realizada con

equipos centrífugos como el tricanter, que permiten la separación de tres fases: aceite, agua y sólidos. De este proceso se obtiene la torta de tricanter, un subproducto rico en fibra y proteínas, con alto potencial de aprovechamiento en alimentación animal. Otro subproducto que se convierte de vital importancia para este proyecto es la torta de palmiste, debido a que es usada como materia prima en la formulación del alimento pelletizado del proceso de secado que se busca plantear (Rincón, J 2017).

### **2.1.2. Torta de tricanter**

La torta de tricanter es un subproducto generado en el proceso de clarificación dinámica del aceite de palma mediante equipos de centrifugación, conocida por su alto potencial de aprovechamiento en la nutrición animal y bajo costo en comparación con otros suplementos. Este material presenta una composición promedio de 14,7% de proteína, 76,2% de humedad, 34,5% de fibra, 1,9% de extracto etéreo y 13,5% de cenizas valores que lo hacen comparable con forrajes como la brachiaria aunque con mayor digestibilidad y aporte proteico (Rapalino, A 2025).

Por sus características, la torta de tricanter permite sostener el ganado en épocas críticas como la sequía, ya que proporciona tanto proteína como energía a un menor costo, siendo considerada una alternativa equivalente a un alimento balanceado más rentable. Su nombre proviene del Tricanter, equipo centrífugo que separa simultáneamente tres fases (aceite, agua y sólidos), empleado en la industria de aceites vegetales. Actualmente, este subproducto se produce principalmente en los Llanos Orientales de Colombia y se comercializa en diversas regiones del país, constituyéndose en una opción estratégica para la alimentación animal y la valorización de subproductos agroindustriales (Notiagro, 2019).

### ***2.1.3. Torta de palmiste***

La torta de palmiste es un subproducto sólido obtenido del prensado mecánico de la almendra del fruto de la palma aceitera, caracterizada por su color marrón claro y su alto contenido de fibras, carbohidratos y grasas. El proceso productivo inicia con el acondicionamiento térmico de la almendra, reduciendo su humedad hasta valores entre 4,5 y 5% y limitando las impurezas a un máximo del 10%. Posteriormente, mediante el método de expeler (prensado mecánico), se extrae el aceite y se obtiene la torta, la cual es homogenizada y empacada para su distribución.

Este subproducto se considera una fuente promisorio de energía y proteína en la fabricación de concentrados para animales, dado que aporta fibra soluble e insoluble, grasas y proteínas, nutrientes esenciales en la alimentación de diferentes tipos de ganado. Por estas propiedades, la torta de palmiste se ha consolidado como un ingrediente estratégico en la formulación de raciones para engorde y producción de leche, contribuyendo tanto al rendimiento productivo como a la sostenibilidad de la industria pecuaria (PPW, 2015).

### ***2.1.4. Mezcla alimenticia (Pellets)***

La mezcla alimenticia de interés para este proyecto corresponde a una combinación de subproductos disponibles en la empresa como lo son la torta de tricanter como materia prima principal y la torta de palmiste. Su presentación física se trata de unos pellets obtenidos posteriormente a una mezcla de materias primas y formación en peletizadora. Este tiene una composición en humedad alrededor del 60%, lo cual hace necesario un proceso de secado para el cumplimiento de las normativas (Rapalino, A 2025).

### ***2.1.5. Peletizadora***

La peletizadora implementada está compuesta por la tolva de alimentación, rodillos rotatorios y discos de peletizado de 4mm. Es utilizada para la producción de pellets alimenticios

para animales como pollos, conejos, gansos, vacas, ovejas, cerdos y otros animales de granja y corral. En la figura se puede observar de forma detalladas las partes del equipo (Agroya).

**Figura 2**

*Partes de la peletizadora*



**2.2. Proceso de secado**

El secado es una operación unitaria esencial en ingeniería química, definida como la remoción de humedad de un sólido mediante la transferencia simultánea de calor y masa (McCabe, Smith y Harriott, 2007). El proceso presenta dos etapas: un periodo de velocidad constante, gobernado por la transferencia de calor y la evaporación superficial, y un periodo de velocidad decreciente, controlado por la difusión interna del agua. La transición ocurre en la humedad crítica, parámetro fundamental para el diseño de secadores.

Las principales variables de operación son:

- **Temperatura del aire**, que incrementa la capacidad de evaporación, pero está limitada por la estabilidad térmica del material.
- **Velocidad del aire**, que reduce la resistencia externa a la transferencia de masa.

- **Caudal másico de aire**, que determina la capacidad global para transportar vapor, debiendo balancearse para evitar saturación o excesivo consumo energético.

### ***2.2.1. Secado por convección***

El secado convectivo se define como un proceso en el que el calor se transfiere desde un medio de secado, generalmente aire, a los alimentos, a la vez que transporta la humedad desde el interior del producto sólido a su superficie, donde es eliminada por la corriente de aire en movimiento. Este proceso se ve influenciado por factores como la velocidad del aire, la temperatura y las diferencias en la concentración de agua.

### ***2.2.2. Equipos para secado***

En estudios previos de diseño y puesta en marcha de secadores aplicados a alimentos, se identificaron como variables críticas de operación la temperatura del aire de secado, la velocidad y humedad relativa del aire, el tiempo de residencia, así como el espesor de la capa de producto. De manera complementaria, se destacaron las ventajas y limitaciones de distintas tecnologías de secado, desde los métodos solares directos e indirectos hasta los sistemas convectivos mecánicos y mixtos (Cárdenas, A 2005). Este marco conceptual respalda la metodología del presente trabajo, en el cual se analizaron variables análogas en el secado de pellets de subproductos de palma, con el objetivo de establecer las condiciones óptimas de operación y validar el desempeño del equipo piloto.

En el proceso de secado convectivo interviene un ventilador industrial que suministra un flujo de aire a lo largo del proceso que permita llevar a cabo la disminución de humedad en el material a secar. En la figura 3 se muestra el ventilador utilizado para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto.

**Figura 3**

*Ventilador industrial utilizado para flujo de aire en el proceso*



Para llevar a cabo las pruebas preliminares se midieron variables con el pirómetro infrarrojo para temperatura superficial y anemómetro tipo Pitot para velocidad del aire (figura 4). A partir de la medición de estos parámetros se puede establecer condiciones iniciales.

**Figura 4**

*Equipos para medición de parámetros de proceso*

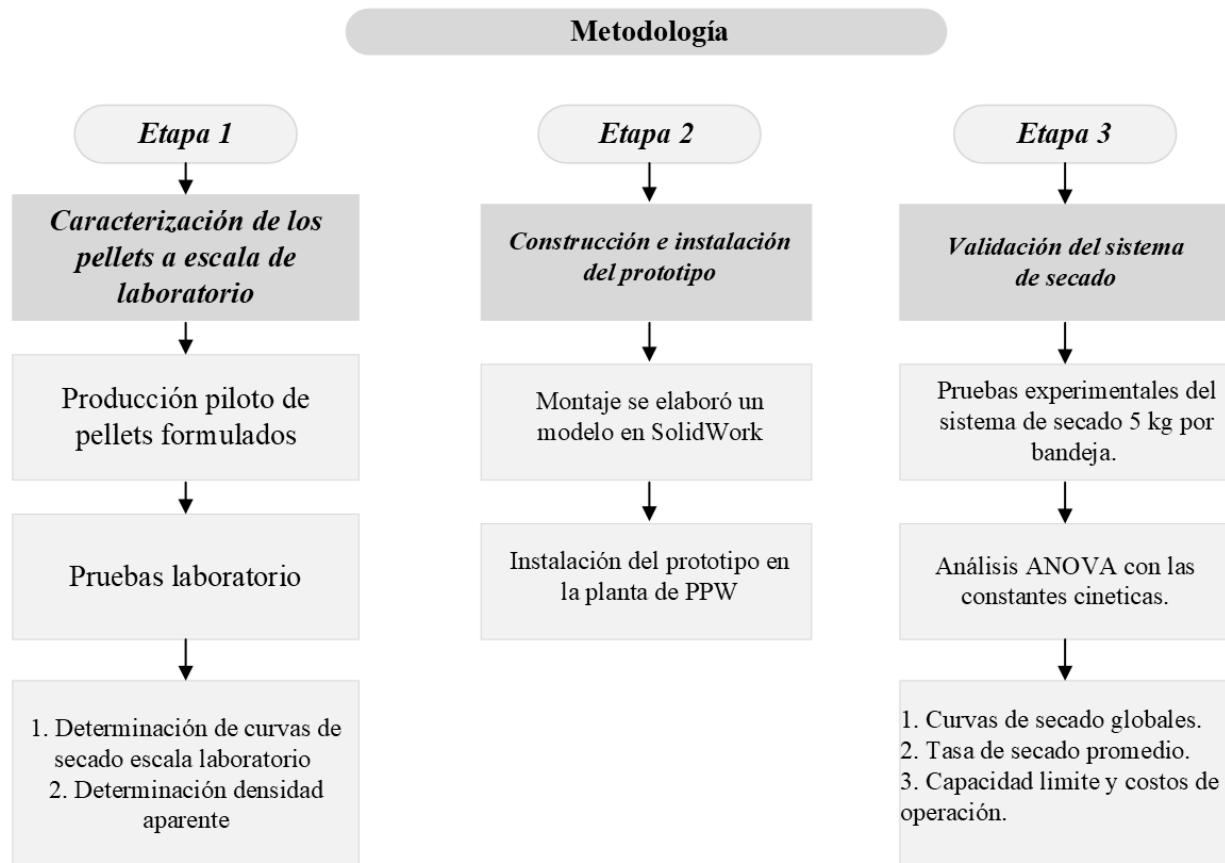


### 3. Metodología

En la figura 5 se muestra la metodología correspondiente al presente trabajo de grado desarrollado en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A.

**Figura 5**

*Metodología de desarrollo del trabajo de grado*



#### 3.1. Caracterización de los pellets a escala laboratorio

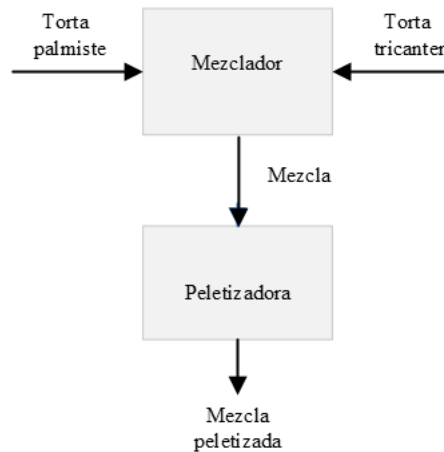
##### 3.1.1. Producción de pellets para pruebas de laboratorio

Como parte inicial de la caracterización del proceso de secado era necesario conocer el producto a secar. Por esto, se realizó una producción de 2 kg de pellets utilizando la mezcla previamente definida por la empresa PPW que incluye torta de tricanter como producto principal, el paso a paso de la producción se puede observar en la figura 6.

Como equipo se utilizó una peletizadora disponible en la empresa, esta tiene una capacidad de producción de 10 kg/min de pellets. El propósito de esta etapa fue obtener el material requerido para la caracterización en las pruebas a escala laboratorio.

### Figura 6

Diagrama BFD elaboración de pellets formulados



Seguido del proceso de producción, se determinaron las condiciones de secado del producto, mediante la obtención de curvas de secado a escala laboratorio y medición de densidad para caracterizar el producto a secar.

#### 3.1.2 Determinación de curvas de secado escala laboratorio

Las curvas de secado se obtuvieron sometiendo muestras de pellets a distintas condiciones de temperatura controlada utilizando un horno FD 115 (Binder). En primer lugar, se determinó la humedad total a una temperatura de 105 °C, registrando la pérdida de masa en intervalos de 30 minutos hasta lograr una pérdida igual a cero, con el fin de establecer la base de comparación para los ensayos de secado. Posteriormente, se realizaron pruebas de secado a tres temperaturas diferentes (70 °C, 80 °C y 90 °C), registrando la pérdida de masa de las muestras cada 15 minutos hasta que esta diferencia de masa fuera insignificante. Esto se realizó para obtener los cambios de

humedad respecto al tiempo para cada temperatura, la humedad en base húmeda se calculó mediante la ecuación:

$$\%H = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (\text{Ec.1})$$

donde:

- %H: porcentaje de humedad en base humedad.
- $m_i$ : masa inicial de la muestra(g).
- $m_f$ : masa seca de la muestra en el tiempo final (g)

### **3.1.3 Determinación densidad aparente**

La densidad aparente de los pellets se determinó mediante mediciones de masa y volumen de la muestra húmeda, con el fin de caracterizarla. Para ello, se empleó una probeta de volumen conocido, en la cual se agregó una cantidad pesada inicialmente de pellets, los pellets se nivelaron en la probeta sin ejercer ninguna presión, marcando así el volumen. La densidad aparente se calculó mediante la ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Ec.2})$$

donde:

- $\rho$ : densidad aparente ( $g/ml$ )
- $m$ : masa de la muestra ( $g$ )
- $v$ : volumen ( $ml$ )

### **3.2. Construcción e instalación del prototipo**

La construcción del prototipo de secado se llevó a cabo a partir de los recursos y equipos disponibles en la empresa PPW, priorizando la facilidad de implementación. Se buscó adaptar los elementos existentes, con el fin de contar con un sistema funcional para el desarrollo a escala piloto. En la empresa PPW, se disponía de un ventilador industrial de radio 0.61 m, un intercambiador de calor tipo radiador con un área de transferencia de  $38.5 \text{ m}^2$ , además se contaba con dos carros adaptados para once bandejas tipo malla, cada bandeja tenía un área de  $0.85 \text{ m}^2$ .

Previo al montaje se elaboró un modelo en SolidWorks con el fin de definir las medidas del prototipo en el apéndice A y B se observan los planos del prototipo de cámara de secado. La instalación se realizó dentro de la infraestructura existente, de manera que el prototipo pudiera integrarse al proceso sin requerir modificaciones significativas en la planta de la empresa. Para tal fin, se eligió ubicación el área de la antigua autoclave de la planta, aprovechando el espacio disponible y la cercanía a la línea de vapor de la caldera que alimenta en ese lugar la operación de esterilización.

### **3.3. Validación del sistema de secado**

#### ***3.3.1. Pruebas experimentales del sistema de secado***

En la validación del prototipo de secado se llevaron a cabo pruebas experimentales donde inicialmente se fijaron dos variables de operación. La temperatura se estableció en  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , valor que fue previamente evaluado en la etapa de laboratorio, donde se observó que esta condición reduce la humedad sin comprometer la integridad de los pellets. El caudal de aire se fijó en un valor intermedio mediante pruebas previas, con el objetivo de mantener la temperatura en el equipo constante. Este caudal se midió con la ecuación:

$$Q = v * A \quad (\text{Ec.3})$$

donde:

- $Q =$  caudal de aire ( $m^3/s$ )
- $v =$  velocidad aire ( $m/s$ )
- $A =$  área de transferencia del aire ( $m^2$ )

La velocidad del aire se midió con anemómetro tipo Pitot, en la parte inicial de la cámara de secado, antes de pasar por el radiador, y el área de transferencia se tomó con el área del radiador.

En las pruebas de validación del equipo se varió la capacidad de carga de la cámara, evaluando inicialmente una carga de 5 kg por bandeja, esto con el fin de conocer el comportamiento del equipo, con esta se identificaron diferentes velocidades de secado entre las bandejas, debido a la distribución del aire dentro de la cámara. Con base en esto se definió un aumento progresivo (10 kg, 15 kg, 20 kg en aquellas bandejas que presentaban mejores condiciones de secado dejando las otras en 5 kg constantes.

Para cada carga de las bandejas se registraron curvas de secado, estas se llevaron a cabo mediante la toma de muestras periódicas de cada bandeja. Se midió la pérdida de masa total en cada muestra utilizando un horno industrial modelo UN 160 (Mettler), a una temperatura de 105 °C. Esta humedad final se calculó con la ecuación 1. Cada condición experimental se repitió tres veces de manera independiente con el fin de garantizar la validez estadística de los resultados.

Posteriormente se calcularon las constantes necesarias para la realización del análisis estadístico. Para calcular la constante cinética  $K$  (McCabe, Smith & Harriott, 2007, cap. 24) en la segunda etapa del análisis de datos, se calculó el contenido de humedad en un sólido:

$$X_{bs} = \frac{X_{bh}}{1-X_{bh}} \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

- $X_{bs}$  = contenido de humedad en un sólido. ( $g$ )
- $X_{bh}$  = humedad en base húmeda. ( $g$ )

La constante cinética de secado  $K$  se calculó aplicando el modelo de Newton:

$$X_t = X_o e^{-Kt} \quad (\text{Ec.5})$$

el cual asume un proceso de primer orden donde:

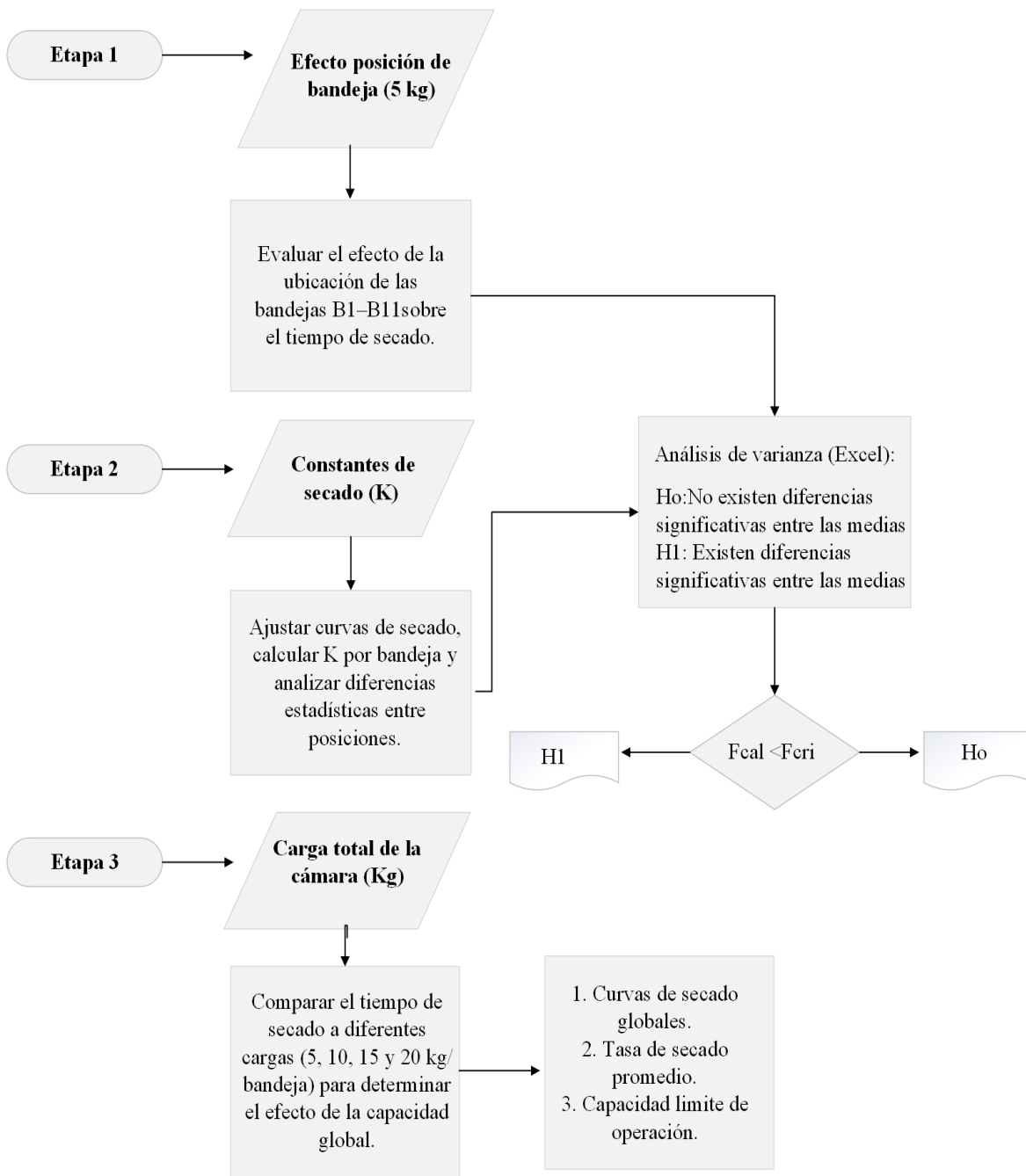
- $X_t$  = contenido de humedad (base seca) en el tiempo.
- $X_o$  = contenido de humedad (base seca) inicial.
- $K$  = constante cinética de secado ( $1/min$ )
- $t$  = tiempo de secado. ( $min$ )

Linealizando el modelo de Newton:

$$\ln\left(\frac{X_t}{X_o}\right) = -kt \quad (\text{Ec.6})$$

Como parte final de esta etapa está comparar los tiempos de secado a diferentes cargas para obtener el efecto de la capacidad global. Para entender de forma gráfica el análisis estadístico de datos se presenta la figura 7.

**Figura 7**  
Etapas del análisis estadístico de los datos



## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Caracterización del proceso de secado

La fase de caracterización del material a secar (pellets) fue dividida en 3 secciones importantes que corresponden inicialmente a una producción de pellets para de esa forma conocer el material, posteriormente la estimación de las curvas de secados de estos y la densidad aparente del material analizado a escala laboratorio. Estos datos fueron de vital importancia para el desarrollo del equipo de secado ya que permitieron conocer el comportamiento físico de los pellets cuando se sometía a un proceso de secado.

#### 4.1.1. Producción de pellets para pruebas de laboratorio

La producción a pequeña escala de pellets (2 kg) fue realizada en el equipo de peletizado y se desarrolló la formulación establecida por la empresa, en la figura se puede observar el equipo y la apariencia de los pellets finales utilizados para las pruebas de curva de secado y densidad en el laboratorio.

#### Figura 8

*Proceso de peletizado a) equipo de peletizado b) apariencia pellets*

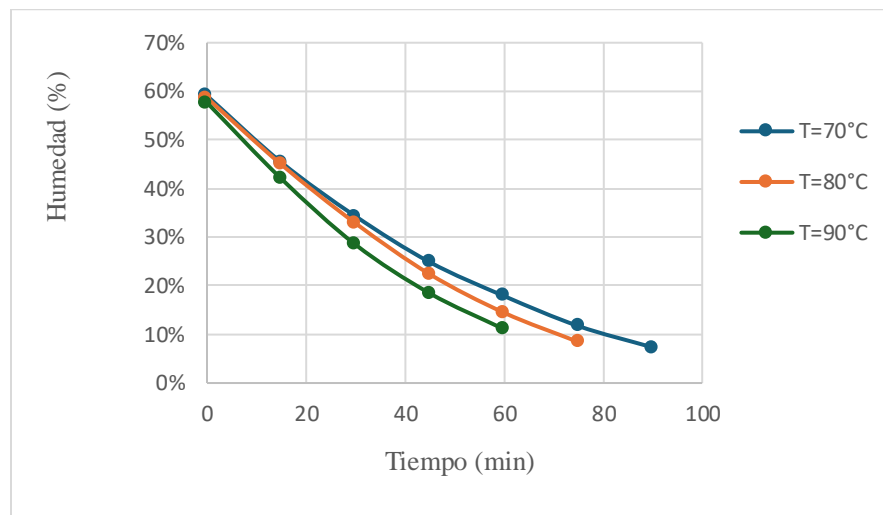


#### 4.1.2. Determinación de curvas de secado escala laboratorio

A partir de las pruebas de secado realizadas en el laboratorio se lograron obtener las siguientes curvas del comportamiento de la humedad de los pellets a los diferentes valores de temperatura considerados (70 °C, 80 °C y 90 °C).

**Tabla 1**

*Curvas de secado de pellets a diferentes temperaturas*



Al comparar las condiciones evaluadas en el laboratorio, se encontró que los pellets sometidos a 90 °C alcanzaron valores de humedad cercanos al 10% en tiempos de 60 min, disminuyendo los tiempos respecto a los ensayos de 70 °C (90 min) y 80 °C (75 min). Sin embargo, durante la manipulación posterior se evidenció deterioro en la integridad física de los pellets, con formación de fracturas, lo cual representa una desventaja en términos de resistencia mecánica y costos de producción. Por lo tanto, a pesar de que a condiciones de temperatura de 70 °C el proceso de secado fue más lento permitió mantener la estructura del pellet.

De esta manera, las pruebas de laboratorio no solo permitieron comparar los tiempos de pérdida de humedad, sino también establecer criterios de selección operativa. La condición de 70

°C se definió como la más adecuada para continuar con las pruebas piloto, ya que ofrece un balance entre eficiencia de secado y calidad del producto final.

#### ***4.1.2. Determinación de la densidad aparente***

Las pruebas de densidad aparente se realizaron en tres repeticiones, a partir de las cuales se calculó una densidad promedio. La realización de varias repeticiones permitió obtener un resultado más confiable y representativo, reduciendo el efecto de posibles errores individuales en la medición. Los resultados obtenidos en estas pruebas son presentados en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Cálculo de la densidad aparente de los pellets*

Muestras	masa (g)	volumen (ml)	densidad ( $\rho$ )
m1	5	4,04	1,24
m2	6,49	5,05	1,29
m3	6,81	5,07	1,34
			<b>1,29</b>

Como resultado de estas pruebas se obtuvo una densidad promedio de 1,29 g/ml, lo que puede indicar que se trata de un material compacto, con una alta concentración de masa en poco espacio, lo que puede influir en su resistencia mecánica, estabilidad y en la forma como se comporta en procesos de separación o transporte.

#### 4.2. Construcción e instalación del prototipo

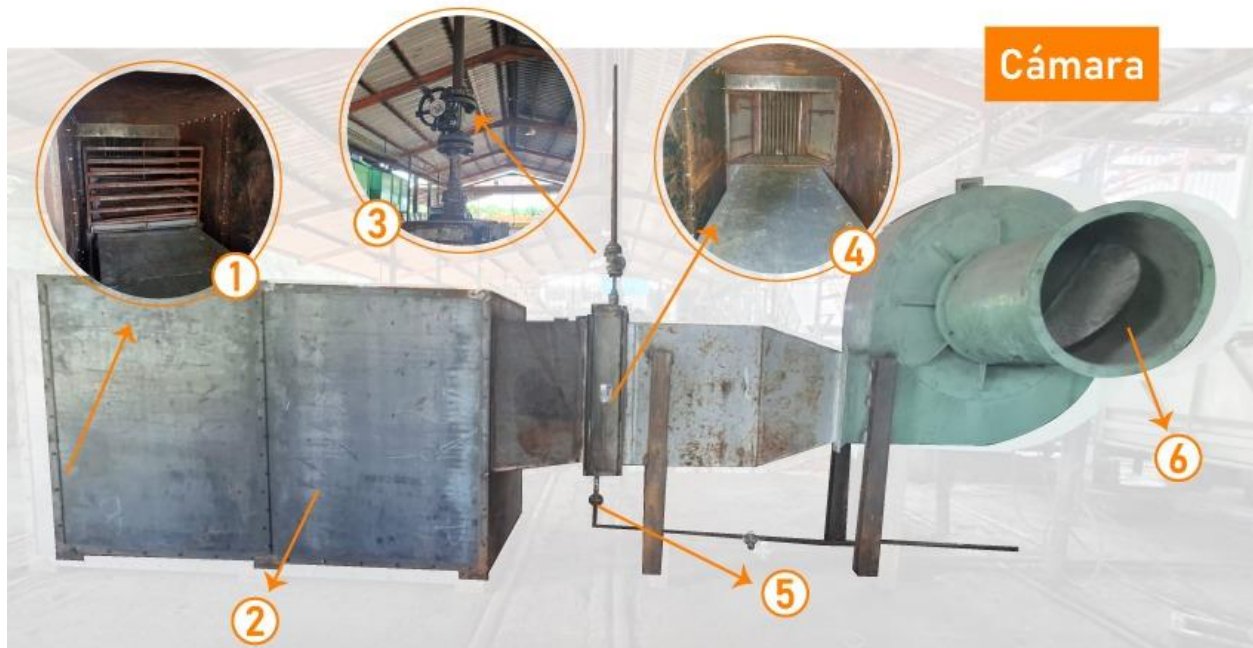
La Figura 9 se muestra el prototipo de cámara de secado construida a escala piloto en la empresa PPW. El sistema funciona con circulación forzada de aire impulsado por un ventilador centrífugo industrial hacia un radiador. La línea de entrada de vapor conduce vapor saturado desde la caldera hacia el intercambiador, el cual está constituido por tubos por los que circula el vapor. El aire generado por el ventilador pasa por el exterior de los tubos y recibe el calor por conducción y convección desde las superficies de transferencia. Al ceder su calor latente, el vapor se condensa y es evacuado por la línea de salida de condensados en la parte inferior. La alimentación de vapor al radiador se controla mediante una válvula manual, y la temperatura del aire de secado se monitorea con el medidor de termómetro instalado en un costado de la cámara.

La cámara de secado constituye el espacio principal de operación, en el cual se ingresan módulos de bandejas móviles: un primer carro con siete bandejas y un segundo con cuatro bandejas tipo malla, cada una con un área efectiva de  $0.85 \text{ m}^2$ . La entrada frontal permite la carga y descarga de los carros, mientras que el diseño favorece la circulación transversal del aire caliente a través de las capas de pellets.

El prototipo permite analizar la influencia de la distribución de aire en un sistema de bandejas múltiples, evaluando parámetros como la velocidad del aire, la temperatura y el espesor de la capa de producto en cada bandeja.

**Figura 9**

*Partes equipo de secado de pellets*



**1. Entrada cámara secado**  
**2. Cuerpo de la cámara**  
**3. Entrada vapor**

**4. Radiador o intercambiador**  
**5. Salida condensados**  
**6. Entrada aire**

#### 4.3. Validación del sistema de secado

Teniendo establecida anteriormente una variable de diseño correspondiente a la temperatura en 70 °C, a partir de pruebas experimentales se estableció a su vez otra variable como fue el caudal de aire en 8.256,6 m<sup>3</sup>/h. A partir de este flujo se logró tener un balance con la temperatura de la cámara, logrando así un secado más eficiente y controlado de los pellets. En la tabla 3 se describen los parámetros de diseño del sistema de secado.

**Tabla 3**

*Condiciones de operación del sistema para lograr una  $T=70$  °C*

<i>Area transferencia piloto</i>		
w	0,82	m
l	0,5	m
A	0,41	m <sup>2</sup>
<i>Condiciones de piloto</i>		
v	20160	m/h
Q	8265,6	m <sup>3</sup> /h

Iniciando con las pruebas de validación del equipo se obtuvieron los siguientes resultados correspondientes al comportamiento del secado en las 11 bandejas analizando inicialmente carga de 5 kg para estudiar el comportamiento del secado con una cantidad baja como se puede observar en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Comportamiento humedad de pellets con carga de 5 kg por bandeja*

<b>TIEMPO</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>	<b>B6</b>	<b>B7</b>	<b>B8</b>	<b>B9</b>	<b>B10</b>	<b>B11</b>
<b>15</b>	42%	42%	38%	38%	46%	46%	52%	50%	48%	47%	48%
<b>30</b>	29%	31%	27%	23%	30%	31%	39%	41%	40%	46%	45%
<b>45</b>	9%	12%	9%	10%	14%	22%	29%	33%	34%	40%	38%
<b>60</b>	4%	3%	3%	4%	7%	11%	12%	12%	20%	37%	27%

Al observar un buen resultado de secado para la primera carga se decidió escalar la cantidad de carga a 10 kg, 15 kg y 20 kg. Los resultados de cada prueba se pueden apreciar en las tablas 5, 6 y 7 respectivamente.

**Tabla 5***Comportamiento humedad de pellets con carga de 10 kg por bandeja*

<b>TIEMPO</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>	<b>B6</b>	<b>B7</b>	<b>B8</b>	<b>B9</b>	<b>B10</b>	<b>B11</b>
<b>15</b>	51%	45%	45%	43%	51%	49%	49%	46%	53%	42%	50%
<b>30</b>	39%	32%	35%	31%	33%	29%	35%	45%	47%	48%	40%
<b>45</b>	33%	28%	25%	23%	27%	24%	39%	35%	44%	46%	39%
<b>60</b>	30%	18%	14%	13%	20%	13%	24%	26%	34%	33%	31%
<b>75</b>	12%	11%	9%	6%	8%	4%	9%	12%	11%	12%	11%

**Tabla 6***Comportamiento humedad de pellets con carga de 15 kg por bandeja*

<b>TIEMPO</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>	<b>B6</b>	<b>B7</b>	<b>B8</b>	<b>B9</b>	<b>B10</b>	<b>B11</b>
<b>15</b>	52%	54%	55%	53%	53%	50%	53%	50%	43%	49%	45%
<b>30</b>	40%	47%	47%	46%	35%	43%	46%	35%	36%	36%	42%
<b>45</b>	32%	38%	47%	42%	34%	33%	39%	33%	28%	27%	32%
<b>60</b>	19%	36%	34%	33%	32%	26%	33%	24%	19%	27%	27%
<b>75</b>	12%	20%	24%	23%	25%	15%	26%	22%	17%	25%	30%
<b>90</b>	10%	11%	12%	10%	11%	11%	9%	12%	12%	10%	12%

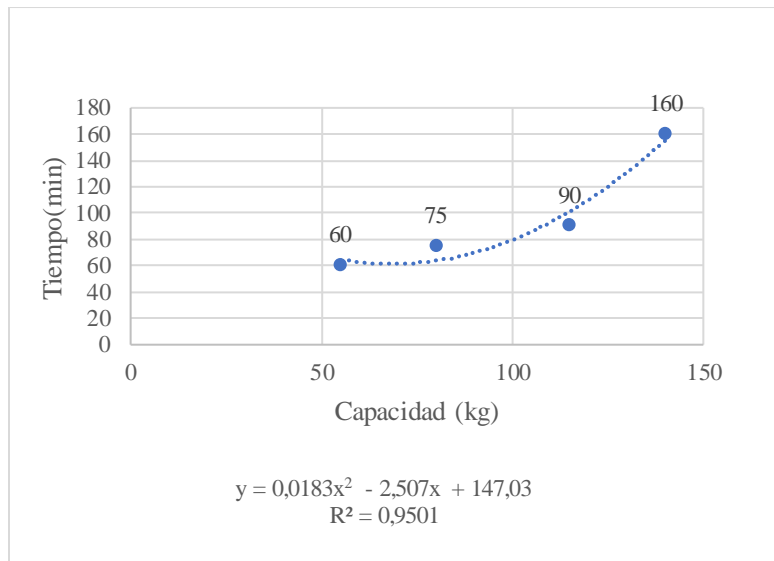
**Tabla 7***Comportamiento humedad de pellets con carga de 20 kg por bandeja*

<b>TIEMPO</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>	<b>B6</b>	<b>B7</b>	<b>B8</b>	<b>B9</b>	<b>B10</b>	<b>B11</b>
<b>20</b>	48,4%	44,6%	55,1%	54,3%	56,0%	53,0%	49,8%	49,5%	57,7%	48,6%	43,2%
<b>40</b>	46,5%	45,6%	51,9%	51,0%	50,0%	44,4%	48,6%	46,5%	46,5%	45,5%	40,8%
<b>60</b>	41,0%	44,6%	47,6%	50,0%	49,0%	40,0%	44,8%	40,2%	40,0%	41,9%	38,7%
<b>80</b>	26,5%	36,8%	41,4%	15,0%	46,0%	39,0%	42,8%	36,7%	38,2%	38,5%	30,5%
<b>100</b>	20,5%	35,1%	40,5%	43,0%	43,0%	37,2%	38,5%	32,5%	35,4%	30,6%	28,9%
<b>120</b>	11,9%	24,2%	37,8%	39,1%	39,0%	26,7%	30,2%	28,5%	20,4%	25,4%	22,4%
<b>140</b>	10,2%	18,9%	20,7%	25,0%	24,0%	22,0%	28,0%	25,3%	18,4%	20,4%	19,4%
<b>160</b>	9,5%	12,8%	10,4%	12,0%	13,0%	11,0%	12,0%	13,7%	11,4%	11,9%	11,2%

Además de analizar la humedad para cada prueba, también se analizó el comportamiento de la capacidad para las 4 cargas desarrolladas. En la figura 9 se puede observar cómo fue su comportamiento.

### Figura 10

*Análisis de capacidad de las pruebas de humedad*



Analizando los resultados obtenidos en las tablas 4, 5, 6, 7 y la figura 10. Se encontró que las humedades promedio de las bandejas para cada carga fueron de 10%, 12%, y 11%, donde se puede inferir que las pruebas que presentaron mejor comportamiento final en la humedad fue la de una carga de 15 kg por bandejas.

Además, analizando el tiempo de secado a partir de esta capacidad se tiene un tiempo de 1 hora y media, logrando así un buen tiempo de secado que permite disminuir consumos de servicios como energía y vapor debido a extensos tiempos de secado.

Seguido de esto, se realizó el cálculo de las constantes cinéticas que tuvo como finalidad identificar la cinética de secado en cada bandeja de la cámara, permitiendo establecer qué zonas presentaban un mayor o menor desempeño. De esta forma, los valores de K se convirtieron en un indicador, asociado a la distribución del aire caliente en el interior del equipo.

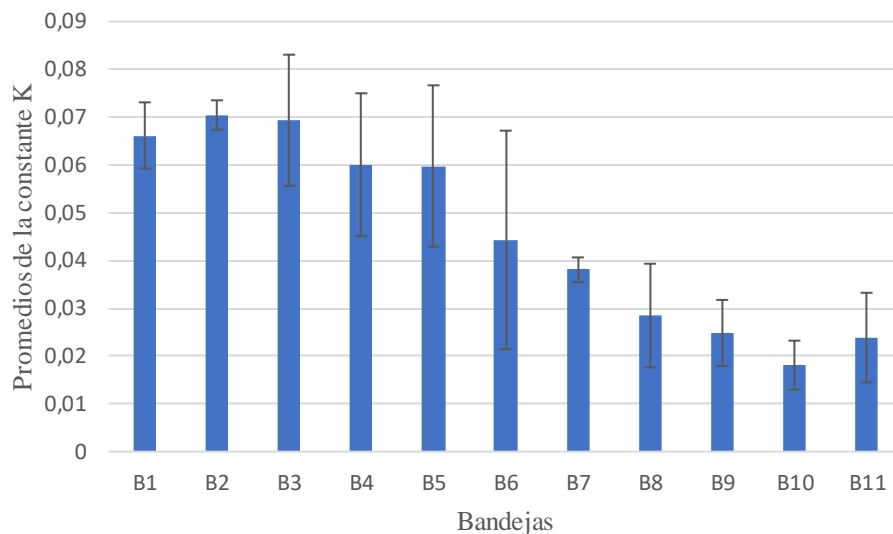
Adicionalmente, para evaluar si las diferencias encontradas entre bandejas eran estadísticamente significativas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA). Este procedimiento permitió contrastar la hipótesis de igualdad entre medias de K y así determinar el impacto de la posición dentro de la cámara sobre la cinética del secado.

<b>Bandejas</b>	<b>Prueba A</b>	<b>Prueba B</b>	<b>Prueba C</b>
B1	0,0603	0,0644	0,0738
B2	0,0739	0,068	0,0694
B3	0,0816	0,0719	0,0545
B4	0,0704	0,0668	0,0429
B5	0,0756	0,042	0,0617
B6	0,0689	0,0237	0,0403
B7	0,0352	0,0402	0,0388
B8	0,0224	0,022	0,041
B9	0,0169	0,028	0,0296
B10	0,0187	0,0127	0,0229
B11	0,0131	0,0302	0,0283
<b>Promedio</b>	0,0488182	0,0427182	0,0457455
<b>Max</b>	0,0816	0,0719	0,0738
<b>Min</b>	0,0131	0,0127	0,0229

A su vez se presenta en la figura 10 el comportamiento del promedio de la constante K para los 11 niveles de bandejas.

**Figura 11**

*Comportamiento constante K promedio en bandejas*



Siguiendo con la fase de validación del equipo se realizó un análisis por medio de ANOVA para así conocer el comportamiento de los resultados obtenidos y concluir con el cumplimiento del proceso de secado de los pellets bajos las condiciones de diseño establecidas para el equipo.

**Tabla 8**

*Resultados análisis ANOVA de las K*

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
<i>Entre grupos</i>	0,01207056	10	0,001207056	8,49153231	1,6605E-05	2,296695957
<i>Dentro de los grupos</i>	0,00312726	22	0,000142148			
<i>Total</i>	0,01519782	32				

$H_0$  (hipótesis nula): La posición de la bandeja no influye en la constante cinética de secado, es decir, todas las medias de K son iguales.

$H_1$  (hipótesis alternativa): La posición de la bandeja si influye en la constante cinética, indicando un efecto de la posición en el secado.

Como  $F$  calculado (8.49)  $>$   $F$  crítico (2.29), se rechaza la hipótesis nula. El  $p$ -valor es muchísimo menor que 0.05, lo que confirma que la diferencia entre bandejas es estadísticamente significativa. Esto significa que la posición de la bandeja dentro de la cámara piloto influye directamente en la velocidad de secado, lo cual es consistente con las pruebas experimentales y la distribución no uniforme de aire caliente en la cámara.

Un análisis importante para finalizar la validación del equipo se basó en la revisión económica asociada a los costos de producción del alimento tras el desarrollo del equipo de secado para tener una estimación de su costo de producción final.

Inicialmente se tienen en la tabla 9 los datos relacionados con la composición del alimento y el rendimiento de equipos como la peletizadora y el tiempo de uso.

**Tabla 9**

*Composición de alimento y requerimiento de equipos*

<b>Materia prima</b>			
Cant. Bandejas			7
Carga/bandeja (kg)			15
Carga total húmeda (kg)			105
Cantidad	Torta palmiste	0,2	21
	Torta tricanter	0,8	84

<b>Equipos</b>		
Capacidad Peletizadora:	10	kg/min
	600	kg/h
Tiempo en uso:	0,175	kg/h
Ventilador tiempo en uso	0,45	h

En seguimiento, con los cálculos de costos de secado presentado en la tabla 10 y costo de final de producción de los pellets en la tabla 11.

**Tabla 10***Costos de proceso de secado*

<i>Costo de secado</i>					
<i>Tipo</i>	<i>Detalle</i>	<i>Cantidad</i>	<i>CostoxUnid\$</i>	<i>Tiempo(hr)</i>	<i>Costo\$</i>
<i>Materia prima</i>	Torta palmiste(Kg)	21	\$ 650,00	-	\$ 13.650,00
	Torta tricanter(kg)	84	\$ -	-	\$ -
	Vapor(kg)	-	-	-	-
<i>Energia</i>	Ventilador (kw)	1,3895	\$ 530,00	1	\$ 736,44
	Pelletizadora(kw)	11	\$ 530,00	0,175	\$ 1.020,25
<i>Mano de obra</i>	Operario	-	\$ 12.505,00	1,5	\$ 18.757,50
<i>Otros insumos</i>	Costales	2	\$ 881,00	-	\$ 1.762,01
<i>Total humedo \$</i>					<b>\$ 35.926,19</b>
<i>Precio(Kg) humedo \$</i>					<b>\$ 342,15</b>
<i>Precio (ton) humedo \$</i>					<b>\$ 342.154,23</b>

**Tabla 11***Costo final de producción de pellets tras proceso de secado*

<i>Costo pellet</i>	
<i>Cantidad (kg) seco</i>	42
<i>Precio (kg) seco</i>	\$ 855,39
<i>Precio (ton) seco</i>	\$ 855.385,58

Analizando el precio final de producción de los pellets se tiene un alimento con un precio competitivo para el mercado, manteniéndose dentro de rangos aceptables de costo por tonelada y garantizando viabilidad económica frente a insumos comerciales disponibles.

## **5. Conclusiones**

El sistema piloto de secado demostró la viabilidad técnica de utilizar el vapor disponible en la planta de Palmeras de Puerto Wilches S.A. para estabilizar pellets formulados con subproductos de palma. La caracterización del material permitió establecer la temperatura (70 °C) como variable crítica del proceso, mientras que las pruebas experimentales confirmaron la reducción de la humedad hasta niveles normativos (12%) en tiempos adecuados. Se evidenció que el espesor de la capa de pellets influye directamente en el tiempo de secado, definiéndose 15 kg por bandeja como la capacidad óptima de operación. El análisis cinético y estadístico reveló además que la posición de las bandejas influye en la cinética de secado debido a la variación de la velocidad del aire dentro de la cámara. Finalmente, el estudio valida que el secado convectivo asistido con vapor es una alternativa viable y escalable para el acondicionamiento de pellets de residuos de palma, planteando condiciones de operación que mejoran el uso energético y la calidad del producto final. Estos resultados favorecen la valorización de subproductos agroindustriales y refuerza la sostenibilidad del proceso productivo en Palmeras de Puerto Wilches S.A.

## 6. Referencias

- Agroya. (s/f). Peletizadora 180Kg/Hr. Agroya. <https://agroya.co/product/peletizadora-180kg-hr/?srsItd=AfmBOooUKWOfJJnhm3u6kC1hdaJQ22swd01FBvDHANE2nXt4X1DyDZ>
- Cárdenas, A. (2005). Construcción y puesta en marcha de un secador de bandejas directo para la obtención de curvas de secado. Universidad de los Andes  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/fcee980c-33ca-4dc3-a091-7f6d42ea1933/content>.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). *Unit operations of chemical engineering* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Notiagro. (2019). Torta de tricanter, suplemento alimenticio a bajo costo.  
<https://www.agromundo.co/blog/torta-tricanter-suplemento-alimenticio/>
- PPW. (2015). Torta de Palmiste. Palmeras de Puerto Wilches S.A. <https://ppw.com.co/torta-de-palmiste/>
- Rackerseder, K. (2013). *Uso novedoso del Decanter/Tricanter® en la industria del aceite de palma*. Palmas, 34, 47–55.  
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10701>
- Rapalino, A. (2025). Aprovechamiento del potencial nutricional de la torta de tricanter como alimento para bovinos en la empresa Palmeras de Puerto Wilches S.A. Universidad Industrial de Santander.
- Rincón, J. (2017). Evaluación y diagnóstico del proceso de extracción de aceite de palma en la planta de beneficio cooperativa palmas Risaralda (COOPAR), Norte de Santander [Universidad de Pamplona].

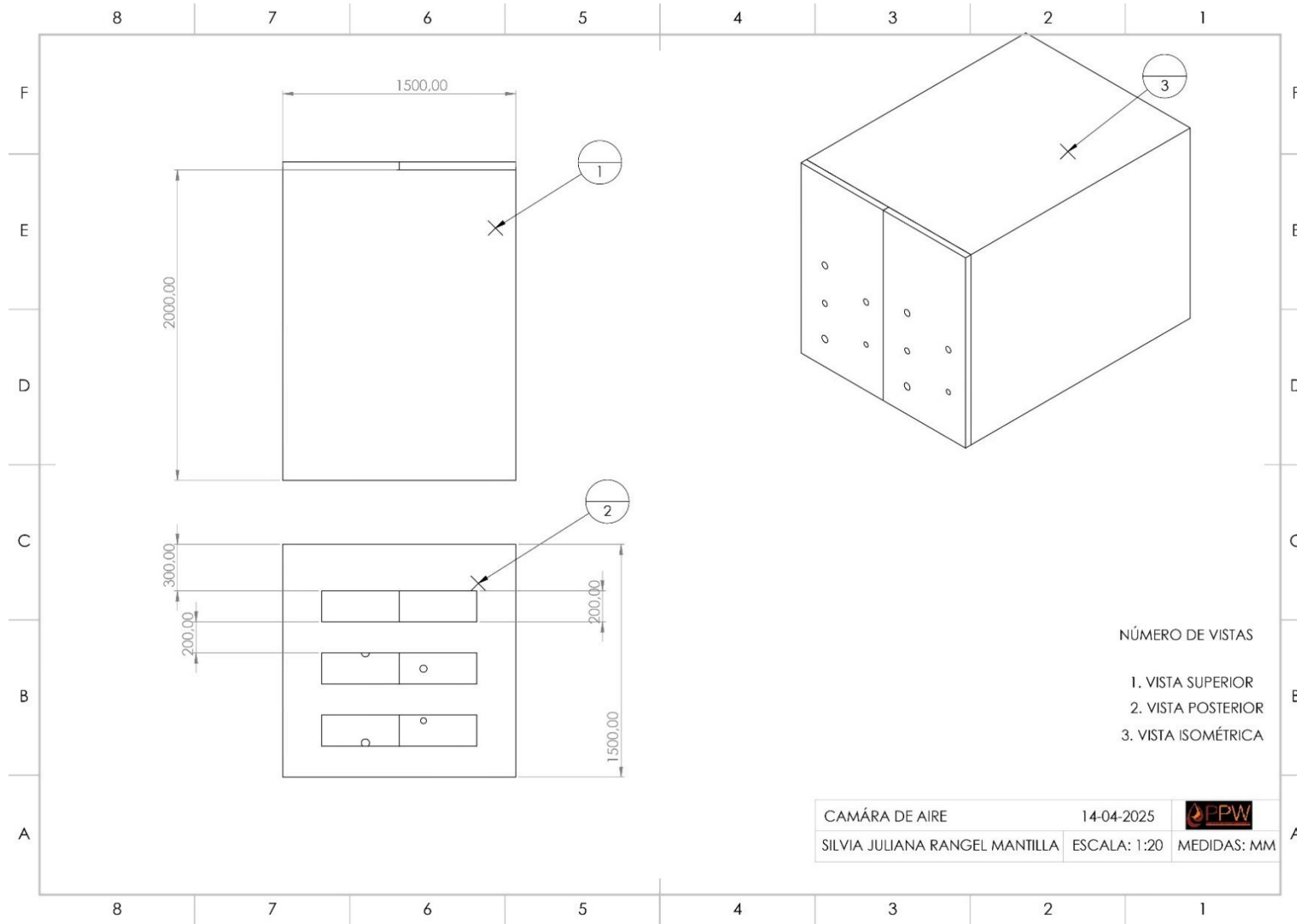
[http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5003/1/Rinc%C3%B3n\\_2017\\_TG.pdf](http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5003/1/Rinc%C3%B3n_2017_TG.pdf)

Sabarez, H. (2017). Módulo de Referencia en Ciencia de los Alimentos.

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/convective-drying>

**7. Apéndices**

**Apéndice A** *Medidas cámara de secado*



**Apéndice B** *Medidas módulo de bandejas*

