

“Optimización de la cinética de secado en semillas de papaya”

Universidad De Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Biosistemas

“Optimización de la cinética de secado en semillas de papaya”

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en
Ingeniería Agrícola.

Natalia Sánchez Salmerón

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica

Diciembre, 2018

“Optimización de la cinética de secado en semillas de papaya”

Esta tesis fue aceptada por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.

Natalia Sánchez Salmerón.

Candidato.

Ing. Guillermo Vargas Elías, D. Sc.

Director de Tesis.

Dr. rer. nat. Luis Barboza Barquero

Miembro, Comité Asesor.

Ing. Ovidio Valerio Cubillo, Lic.

Miembro, Comité Asesor.

Ing. José Francisco Aguilar. MSc.

Presidente, Tribunal Examinador.

Ing. Beatriz Mazón Villegas, Ph.D.

Miembro, Tribunal Examinador.

Dedicatoria

A mis padres, hermanas y sobrino por su apoyo incondicional para poder cumplir esta meta e impulsarme siempre a seguir adelante y alcanzar nuevos horizontes.

Agradecimientos

A Dios porque su misericordia es infinita y me ha llenado de bendiciones toda mi vida, y me permite recibir regalos como este, que me hacen crecer como persona y como profesional.

A Guillermo Vargas Elías por su apoyo y su guía durante esta etapa, para desarrollar el trabajo de la mejor manera instruyéndome por medio de sus conocimientos.

A Luis Barboza, por permitirme hacer mi trabajo final de graduación en el Centro para Investigaciones de granos y semillas (CIGRAS), apoyarme con sus conocimientos y ayudarme a que me facilitaran la materia prima para desarrollar la investigación.

A Ovidio Valerio por depositar su confianza en mi persona y capacidades, para realizar este estudio brindándome una mano amiga y de compañerismo siempre.

A la Estación Experimental Los Diamantes propiedad del Instituto de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA), por facilitarme papayas de excelente calidad para llevar a cabo mis experimentos.

Al personal administrativo y técnico del CIGRAS por recibirme tan bien y hacer un espacio ameno para trabajar, además de brindarme su ayuda y servicios siempre que lo requerí.

A la Escuela de Ingeniería en Biosistemas por brindarme una educación de calidad y poder amar la profesión que elegí.

A la Universidad de Costa Rica por ser un centro de educación con tanto prestigio a nivel nacional e internacional, y desarrollar profesionales educados de manera integral y con valores y ética profesional.

Índice General

RESUMEN	VII
CAPÍTULO 1. CONTEXTO DEL PROYECTO	8
1.1 <i>Justificación del proyecto</i>	8
1.2 <i>Estado de arte</i>	9
CAPÍTULO 2. ARTÍCULO CIENTÍFICO	23
2.1 <i>Introducción</i>	23
2.2 <i>Objetivos</i>	24
2.3 <i>Metodología</i>	26
2.4 <i>Resultados y Discusión</i>	38
CAPÍTULO 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
3.1 <i>Conclusiones</i>	72
3.2 <i>Recomendaciones</i>	74
REFERENCIAS	75
ANEXOS	80

Resumen

El secado en las semillas de papaya es un proceso importante para reducir el contenido de humedad hasta un nivel deseado y seguro, para optimizar la tasa de germinación. El objetivo de la presente investigación es estudiar el secado de capa fina por convección forzada, para determinar un modelo matemático que represente la cinética de secado en la semilla de papaya sin producir daño en su germinación. Para lograr esto se utilizaron semillas provenientes de frutos de papaya de la variedad “Híbrido Pococí”. Se utilizó un prototipo de secadora vertical para reducir la humedad a su punto de equilibrio ante temperaturas de 25°C, 30°C y 35°C en tres velocidades de secado 0,75, 1,5 y 3 m/s. La cinética de secado se analizó con los modelos de Page, Midilli, Lewis, Verma, Henderson-Pabis Modificado y Logarítmico. Se encontró que el modelo logarítmico es el que presenta un ajuste más adecuado. Se determinó que la temperatura óptima para germinación corresponde a 30°C. Los resultados anteriores son importantes para el diseño industrial de una línea de procesamiento de semillas de papaya.

Capítulo 1. Contexto del proyecto

1.1 Justificación del proyecto.

Esta investigación es importante para el proyecto de mejora genética de papaya de la Universidad de Costa Rica; actualmente en el país no se han realizado estudios similares para este nuevo producto con un costo aproximado de mil colones el gramo de semilla en el presente año, por lo tanto no existe un método preciso con el que se pueda trabajar para garantizar la mayor calidad a las semillas que llegan a los productores nacionales.

El proceso de secado mecánico es una opción idónea debido a que en las zonas de producción se puede instalar una secadora para remover el agua superficial de la semilla.

La presente investigación se enfocó en la generación de una cinética de secado en las semillas de papaya que se ajuste a las condiciones que se requieren en el país, sin producir daño en la semilla y así optimizar la producción de semillas de calidad.

1.2 Estado de arte.

1.2.1 Generalidades.

La papaya pertenece a la familia *Caricaceae*, género *Carica*, especie *Carica papaya L.* Es una planta nativa de América tropical, específicamente de la región Mesoamericana [1]. El género *Carica* incluye 22 especies, de las cuales la mayoría son silvestres y alrededor de 6 de estas especies son cultivadas siendo la *Carica papaya* de las más populares del mundo [2].

La papaya (*Carica papaya L.*) es la fruta más importante económicamente dentro de la familia *Caricaceae*. Su mayor producción se da en países subtropicales y tropicales, entre México y Costa Rica. Siendo México uno de los mayores productores a nivel mundial, antecedido por Nigeria, Indonesia, la India y Brasil [3].

El cultivo de papaya es muy significativo por ser uno de los productos que proporciona una producción continua durante todo el año después de iniciada su floración. La papaya es una planta perenne y semi leñosa que puede alcanzar los 8 a 10 metros de altura, la cual puede cultivarse desde el nivel del mar hasta los 1000 m.s.n.m; es una dicotiledónea de tronco hueco y de madera carnosa, en la parte apical se desarrollan constantemente nuevas hojas,

y a medida que el tallo va creciendo, las hojas viejas maduran y caen, este fenómeno deja libre el espacio en que posteriormente ha de desarrollarse el fruto que es el que se consume [4].

Es una planta pequeña, herbácea arborescente, de rápido crecimiento y desarrollo. Presenta un único tronco relativamente grueso, de madera blanda, usualmente no ramificado, sobre el cual se desarrollan sus hojas, flores y frutos [2]. Presenta hojas grandes, palmeado lobular, de color verde oscuro y peciolo huecos, largos y ligeramente curvados hacia arriba [5]. Las flores son pequeñas, blancas o crema amarillentas, con cinco pétalos y aparecen en forma de racimo sobre la inserción de los peciolo; sin embargo por lo general solo una es la que desarrolla el fruto [2].

El fruto es una baya proveniente de un ovario súpero, de pericarpio carnoso y succulento, cuyo color y tamaño depende de la variedad. La cáscara generalmente es amarilla cuando el fruto madura y el color de la pulpa puede ser amarilla, naranja o roja según el cultivar [1]. El fruto de la papaya está compuesto por 8,5% de semillas, 12% de piel, 79,5% de pulpa, en promedio, sin embargo, esto varía dependiendo de una variedad [4].

La papaya es un fruto muy gustado a nivel mundial debido a su aroma y alto contenido de azúcares que le confieren un sabor agradable. Esta fruta se consume fresca principalmente, pero también se consume en otras preparaciones como trozos en almíbar, mermeladas, refrescos [5]. Es rico en vitaminas A y C, y en minerales como Potasio y Calcio. Tiene un alto contenido de agua y un porcentaje de fibra cercano al 0.7%. El contenido nutricional puede ser diferente entre variedades, condiciones de cultivo y estado de madurez [1].

1.2.2 El cultivo de papaya en Costa Rica

En Costa Rica se han utilizado variedades criollas, conocidas como “*Lucia*” y “*Parriteña*”, caracterizadas por ser heterogéneas, así como otras variedades genéticamente estables como “*Sunset*” y “*Sunrise*”, del cultivar “*Solo*”, conocido como “*Hawaina*”. Estas últimas se caracterizan por producir frutos pequeños. También se ha utilizado la variedad “*Maradol*” importada de Cuba [5].

En los últimos años la Universidad de Costa Rica (UCR) y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) han realizado investigaciones con el fin de desarrollar híbridos con mayor adaptación a las condiciones edafoclimáticas de las zonas productoras y con características comerciales deseables [6].

En 1999 se desarrollo un nuevo híbrido llamado “*Pococi*”, resultado del cruce entre la papaya “criolla” y la “*Hawaiana*”, esto fue liberado oficialmente en el 2006 [7].

En el 2011, el área total de siembra con papaya en el país fue de 760 ha, con un rendimiento promedio de 80 ton/ha [7]. En la actualidad hay un área sembrada de 900 ha de papaya en el país [8].

1.2.3 Híbrido Pococi

La papaya Pococi se ha convertido en una excelente opción para los productores costarricenses, ya que es una fruta de alta calidad, posee un buen rendimiento (120-150 ton/ha). Aunado a lo anterior, la primera cosecha se obtiene aproximadamente entre 7 y 8 meses después de la siembra, periodo inferior al de los genotipos utilizados tradicionalmente en Costa Rica, que tardan de 9 a 10 meses para producir [9].

Este híbrido tiene genes que le confieren mayor porcentaje de sólidos solubles, alrededor de 11° Brix, frutos de tipo periforme, y de 1.3 kg de peso promedio. Además, presenta mayor vigor y estabilidad en sus características. Su tallo es más alto y grueso y es una planta más frondosa y productiva que otras variedades criollas [9].

1.2.4 Germinación

En la actualidad el método más sencillo de propagar la papaya es con la semilla la cual se extrae de frutos maduros y libres de infecciones virales. La semilla que se utiliza para la propagación es únicamente la semilla que proviene de plantas hermafroditas [4]. La reproducción de la semilla depende de un conjunto de variables como la capacidad germinativa de la semilla, debida a factores genéticos y por la calidad de la misma. Los factores ambientales, tales como la humedad, y aireación apropiada en el suelo, temperatura óptima de germinación y presencia de luz cuando aparecen los cotiledones también juegan un papel importante. Adicionalmente se debe de contar con un medio de siembra limpio, aireado y mullido. Además de elegir los mecanismos adecuados para acelerar y favorecer la buena germinación. El rango de temperatura para su desarrollo es entre los 22 °C y 30°C, siendo de 23 a 26 °C las temperaturas ideales. El suelo para su cultivo debe ser suelto, húmedo, profundo, con buen drenaje, alto contenido de materia orgánica y un ph de entre los 6 y 7 [10].

La subsistencia de la semilla ofrece un soporte a los procesos de mejoramiento, posibilita el intercambio de germoplasma y principalmente, la conservación de la viabilidad genética [11]. Dentro de los factores que afectan el mantenimiento de la calidad de la semilla a lo largo de un periodo determinado, se destaca el grado de humedad, las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire de almacenamiento [3].

La semilla de papaya se clasifica como ortodoxa, por lo que puede ser almacenada a bajas temperaturas y con bajos contenidos de humedad por periodos prolongados sin afectar su viabilidad [12].

La duración de las semillas está influenciada por otros factores tales como la especie, variedad, el historial del lote de semillas y estado de madurez del fruto [13]. En general necesitan niveles adecuados de oxígeno, humedad y temperatura para germinar. Para lograr una adecuada plantación se requiere contar con semillas de buena calidad, y se hace necesario conocer su capacidad de germinación [14].

Además del uso de una semilla de calidad, es importante que durante la etapa de almácigo se utilice un sustrato que permita una adecuada retención de la humedad, aireación, y anclaje de la plántula, condiciones que benefician la germinación y crecimiento de las mismas. Existen muchos sustratos orgánicos e inorgánicos que son utilizados como sustratos como la turba, la granza de arroz, carbón, fibra de coco, arena y agua, entre muchos otros, sin embargo, no todos sirven para un adecuado crecimiento de una determinada especie, por lo que es necesario realizar pruebas que establezcan en cual se desarrolla mejor cada especie [15].

En algunos estudios se ha observado un efecto negativo sobre la germinación debido a la presencia en el arilo o sarcotesta de sustancias inhibidoras (fenoles). También se dice que la

marcada disminución de la germinación, en presencia de sarcotesta, es debida a la poca oxigenación de la semilla, por lo que se recomienda la remoción de la misma [16].

Para la remoción del arilo se debe de colocar la semilla con agua, en un procesador de alimentos, con un acople de regulador de voltaje, con el fin de regular la velocidad de las aspas. El voltaje utilizado es de 60 Voltios durante 120 segundos divididos en dos lapsos, haciendo un daño mínimo a la semilla [15].

Para estimular la germinación se han evaluado diferentes tratamientos pre germinativos, como el ácido giberélico (AG_3) con dosis de 100 a 800 ppm, dando como resultado el aumento significativo en el porcentaje de germinación en muchos casos [16].

1.2.5 Humedad de equilibrio en la semilla.

Las semillas de papaya se caracterizan por tener un alto contenido de humedad que oscila entre el 70 y 80 % (b.h.), por lo que el secado de las mismas es una operación fundamental para obtener un buen proceso [17]. Un contenido de humedad del 5 al 7% (b.h). es ideal para adquirir una semilla de calidad que puede almacenarse sin sufrir daño [18]. El contenido de humedad de equilibrio es un factor necesario de determinar durante el secado, el cual se define como el contenido de humedad alcanzado por un material dejado en una temperatura y humedad relativa del aire circundante fijo durante un periodo de tiempo [19].

La rapidez en que el sólido alcanza el equilibrio depende del método y principalmente de la eficacia del movimiento de aire a través de su superficie. El método de equilibrio estático consiste en colocar una muestra de granos entre 2 y 3g dentro de desecadores sin que haya movimiento de aire por un periodo de tiempo entre 3 a 6 semanas hasta alcanzar el equilibrio [20]. El equilibrio dinámico consiste en mover aire en condiciones estables de temperatura y humedad relativa a través de un local donde hay una masa de granos [21]. Hay otro método para alcanzar el equilibrio del aire, y es el semiestático que consiste en modificar el contenido de humedad de los granos controladamente y obtener la humedad relativa como la variable de respuesta, este método fue empleado para obtener la humedad relativa de equilibrio en las nueces de macadamia [22], semilla de palma africana [23], los granos de maíz [54], el café beneficiado [24], el frijol y el arroz en granza [25]. El método semiestático aún no ha sido comparado contra el método estático.

La forma de la curva de equilibrio depende desde la variedad hasta de las propiedades físicas de la semilla. En la Figura 1.1 se muestra una clasificación según la forma del ajuste para la relación de equilibrio higroscópico y el fenómeno de desorción y adsorción.

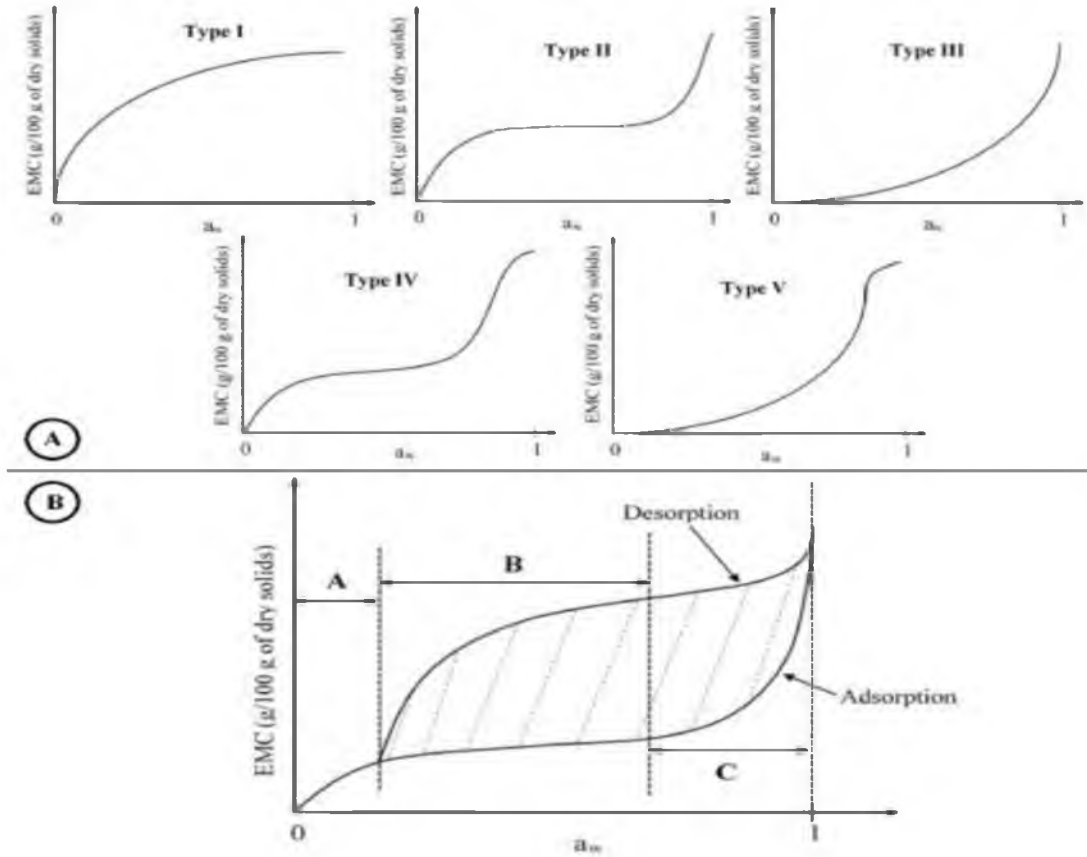


Figura 1.1. Tipos de curva de equilibrio clasificación por la forma [26].

En el cuadro 1.1 se muestran los cuatro modelos de equilibrio más utilizados y con mejores resultados en otras investigaciones, como herramientas para representar el contenido de humedad de equilibrio de cada producto.

Cuadro 1.1. Modelos matemáticos de equilibrio higroscópico en productos agrícolas.

	Nombre	Ecuación	Referencia
1	Guggenheim, Anderson y Boer (GAB)	$x_{we} = \frac{x_w * C * K * a_w}{(1 - k * a_w) * (1 + (C - 1) * K * a_w)}$	[27]
2	Modelo de multicapa (BET)	$x_{we} = \frac{x_w * C * a_w}{(1 - a_w) * (1 + (C - 1) * a_w)}$	[28]
3	Henderson	$x_{we} = 0,01 \left(\frac{-\log(1 - a_w)}{10^f} \right)^{\frac{1}{n}}$	[28]
4	COPACE	$x_{we} = e^{(a-bt+c*a_w)}$	[29]

X_{we} es el contenido de agua (g de H₂O/ % (b.s)), X_w el contenido de agua en la monocapa, a_w es la actividad del agua, k es una constante de GAB, A,B y C son constantes de cada modelo, n y f parámetros característicos del producto, y T es la temperatura en °C.

Para estimar los parámetros de los modelos de equilibrio se realiza un análisis estadístico de regresión no lineal y con esto obtener un error estándar de los parámetros para determinar cual modelo es más acertado [28].

1.2.5 Proceso de Secado

Los procesos de secado se utilizan para reducir el contenido de humedad hasta un nivel deseado. Hoy en día existen algunos métodos para llevar a cabo esta operación, el método natural que tiene la influencia directa de los vientos y del sol ya sea en el campo o asoleadores, depende de las condiciones ambientales. El secado artificial que se lleva a cabo en secadores continuos de aire caliente, y se clasifica en secado mecánico en bajas

temperaturas con aire natural ligeramente calentado; o también puede secar a altas temperaturas donde se trabaja el lecho fijo en flujos cruzados y flujos concurrentes en cascada. También se utiliza el secado artificial en combinación que utiliza tanto bajas como altas temperaturas y el secado artificial en aireación [30].

El secado a bajas temperaturas es un proceso lento que se caracteriza por usar aire a temperatura ambiente o calentado en 3 a 5°C, en donde se emplean bajos flujos de aire entre 2,0 - 5,0 m³/min. La transferencia de masa está sujeta a perturbaciones procedentes por las fluctuaciones de humedad y temperatura ambiente [30]. Por otro lado para el secado a altas temperaturas se utilizan temperaturas mayores a 50 °C y se emplea en los predios en que hay grandes producciones y la cosecha diaria es de un alto volumen, y en unidades almacenadoras, que reciben los productos húmedos [4].

El secado de capa fina reside en hacer pasar aire, a humedad, temperatura y velocidad de flujo constantes, a través de una capa delgada de material húmedo. Durante un periodo de tiempo se puede observar el comportamiento de secado del material bajo estas condiciones constantes. Se ha determinado que el secado tiene lugar en dos o más periodos diferentes. Primero en materiales muy húmedos, hay un periodo durante el cual la evaporación tiene lugar a una velocidad constante, casi como la de una superficie líquida libre. Esto es seguido por uno o más periodos en los cuales la velocidad de evaporación cae

continuamente. Estos periodos diferentes están separados por un contenido de humedad crítico en el que puede ocurrir una clara discontinuidad [19].

A nivel mundial se han desarrollado distintos modelos matemáticos de secado para capa fina cuyo objetivo es realizar la cinética de secado del producto estudiado y permitir ajustar los resultados de acuerdo al tipo de cultivo que se está trabajando. En el Cuadro 1.2 se muestran los modelos más utilizados en la literatura.

Cuadro 1.2. Modelos matemáticos utilizados para secado de capa fina en productos agrícolas.

	Nombre	Ecuación	Referencia
1	Page	$M_R(t) = \exp(-kt^n)$	[31]
2	Midilli	$M_R(t) = a \cdot \exp(-kt^n) + bt$	[32]
3	Henderson - Pabis	$M_R(t) = a \cdot \exp(-kt)$	[33]
4	Henderson- Pabis Modificado	$M_R(t) = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt) + c \cdot \exp(-ht)$	[34]
5	Verma	$M_R(t) = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \cdot \exp(-gt)$	[35]
6	Hii	$M_R(t) = a \cdot \exp(-kt^n) + c \cdot \exp(-gt^n)$	[36]
7	Lewis	$M_R(t) = \exp(-kt)$	[37]
8	Logaritmico	$M_R(t) = a \cdot \exp(-kt) + c$	[38]
9	Two Terms	$M_R(t) = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-gt)$	[39]
10	Overhults	$M_R(t) = \exp(-(kt)^n)$	[40]

$M_R(T)$ es la razón del producto en un tiempo determinado, t es el tiempo de secado, k , a , b , c , g , h y n son parámetros o constantes de cada modelo.

Como se puede determinar en los diez modelos hay similitudes entre cada una de las ecuaciones considerando parámetros muy parecidos entre uno y otro, sin embargo según estudios realizados sobre cinética de secado para distintos productos, sugieren que los modelos de Henderson-Pabis Modificado, logarítmico [41], Midilli y Page [42], han demostrado tener mejores resultados, permitiendo ajustes de parámetros de correlación más cercanos a lo deseado, ratificando los resultados de otros estudios similares [41].

A continuación en el cuadro 1.3 se exponen algunas investigaciones realizadas sobre el secado en capa fina en otros productos, los parámetros y los modelos matemáticos utilizados para la cinética de secado que fueron más significativos en sus resultados, estos serán de ayuda para fundamentar lo anteriormente descrito.

Cuadro 1.3. Secado en capa fina en otras especies.

Especie	Temperatura °C	Muestra	Tipo de Secador	Tiempo horas	Modelo Matemático	Referencia
Semillas de albarico que	60,80 100 y 120	masa de 550 g	Secador experimental	3 monitoreo cada 20 minutos	Midilli y Henderson-Pabis Modificado	[43]
Limón	30,40,50	Capa de 10 mm	Secador experimental	7 monitoreo cada 30 minutos	Logarítmico	[41]
Lemna obscura	55,75,95 y 115	Capas de 4,5 y 6 mm	Horno de convección forzada	1 monitoreo cada 5 minutos	Midilli y Hii	[42]

Capítulo 2. Artículo Científico

2.1 Introducción

El secado de las semillas es un proceso que se debe de llevar a cabo con cuidado para no afectar la viabilidad de las mismas.

En Costa Rica el secado de las semillas de papaya se realiza mediante la acción de flujo con ventiladores sin control de las variables físicas como la velocidad, la temperatura, y las condiciones de humedad. Esto evidencia una necesidad de estudiar el proceso de secado en más detalle para tener un protocolo que sea preciso, accesible y estable aplicado a cualquier condición del país.

Por tal razón el objetivo es desarrollar un modelo matemático que represente la rapidez del secado mecánico en capa delgada en la semilla de papaya. El modelo antes mencionado permitirá determinar las variables necesarias para establecer el contenido de humedad de equilibrio, las temperaturas y las velocidades de secado que requiere el producto sin perjudicar el índice de germinación y así optimizar las condiciones de este proceso.

Con este proyecto se espera obtener un protocolo para secar semillas de papaya, lo cual será de gran utilidad en el proyecto de producción de semillas de papaya de la Universidad de Costa Rica (UCR). Personal de la universidad y del Instituto de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA) mejoraron genéticamente plantas de *Carica papaya* y lograron obtener híbridos con alta producción y mejor calidad comparados con los materiales presentes en años anteriores [6]. El híbrido producto de dicho programa de mejoramiento se denominó “*Híbrido Pococi*”, y se ha comercializado exitosamente en el mercado nacional e incluso internacional.

La investigación sirve como base para posteriores proyectos e impulsar su aplicación con mayor frecuencia por parte de los productores nacionales, ya que actualmente en el país no hay ningún estudio entorno a este tema.

2.2 Objetivos

I. Objetivo General

Determinar el modelo matemático que mejor ajusta la cinética de secado en la semilla de papaya sin producir daño en la germinación.

II. Objetivos Específicos

Para cumplir con el objetivo general se realizaron los objetivos específicos:

1. Ajustar un modelo matemático para la cinética de secado en la semilla de papaya a temperatura constante.
2. Establecer el efecto de la temperatura en la rapidez de secado.
3. Determinar la influencia de la velocidad del aire en la rapidez de secado.
4. Realizar la curva de equilibrio higroscópico para la semilla de papaya y ajustar un modelo matemático para determinar la humedad de equilibrio durante el proceso de secado mecánico.
5. Optimizar las condiciones de secado para mantener la calidad biológica de la semilla.

2.3 Metodología

2.3.1 Elaboración de Pruebas

El presente trabajo se desarrolló en el Centro para Investigaciones de Granos y Semillas (CIGRAS), en la Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica (UCR), en San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

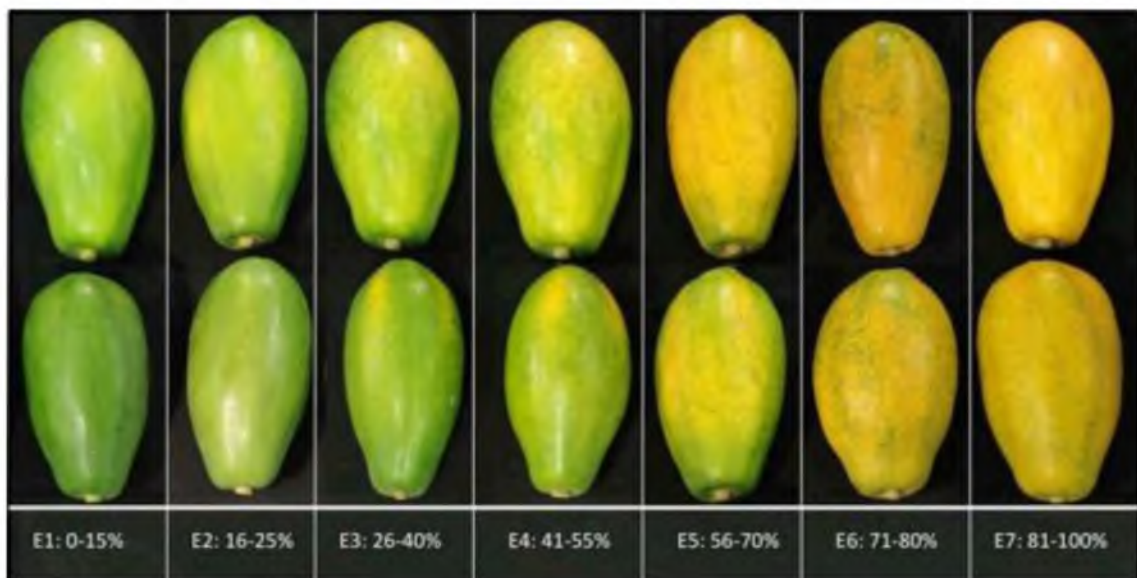
2.3.2 Materia Prima

Se utilizaron semillas provenientes de frutos de la variedad Pococí, desarrolladas por la Universidad de Costa Rica (UCR) y el Instituto Nacional De Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), producidas en la Estación Experimental Los Diamantes, ubicada en Guápiles de Limón, Costa Rica.

Se manejaron en total 120 papayas cosechadas con estado de madurez 5 o “dos pintas o tres pintas”; que corresponde entre un 16 a 40% de estado de madurez del fruto (Cuadro 2.1 [44] y figura 2.1). Las semillas fueron procesadas y la sarcotesta (arilo) se extrajo de forma manual.

Cuadro 2.1 Estados de madurez de la papaya híbrido Pococi [44].

Estado de madurez (N°)	color amarillo externo (%)
0	0-5
1	6-15
2	16-25
3	26-40
4	41-55
5	56-70
6	71-80
7	81-100

**Figura 2.1.** Aspecto visual de frutos de papaya Pococi para cada estado de madurez [44].

2.3.3 Procesos realizados

En la figura 2.2 se presenta el proceso seguido para el desarrollo de la metodología de la investigación.

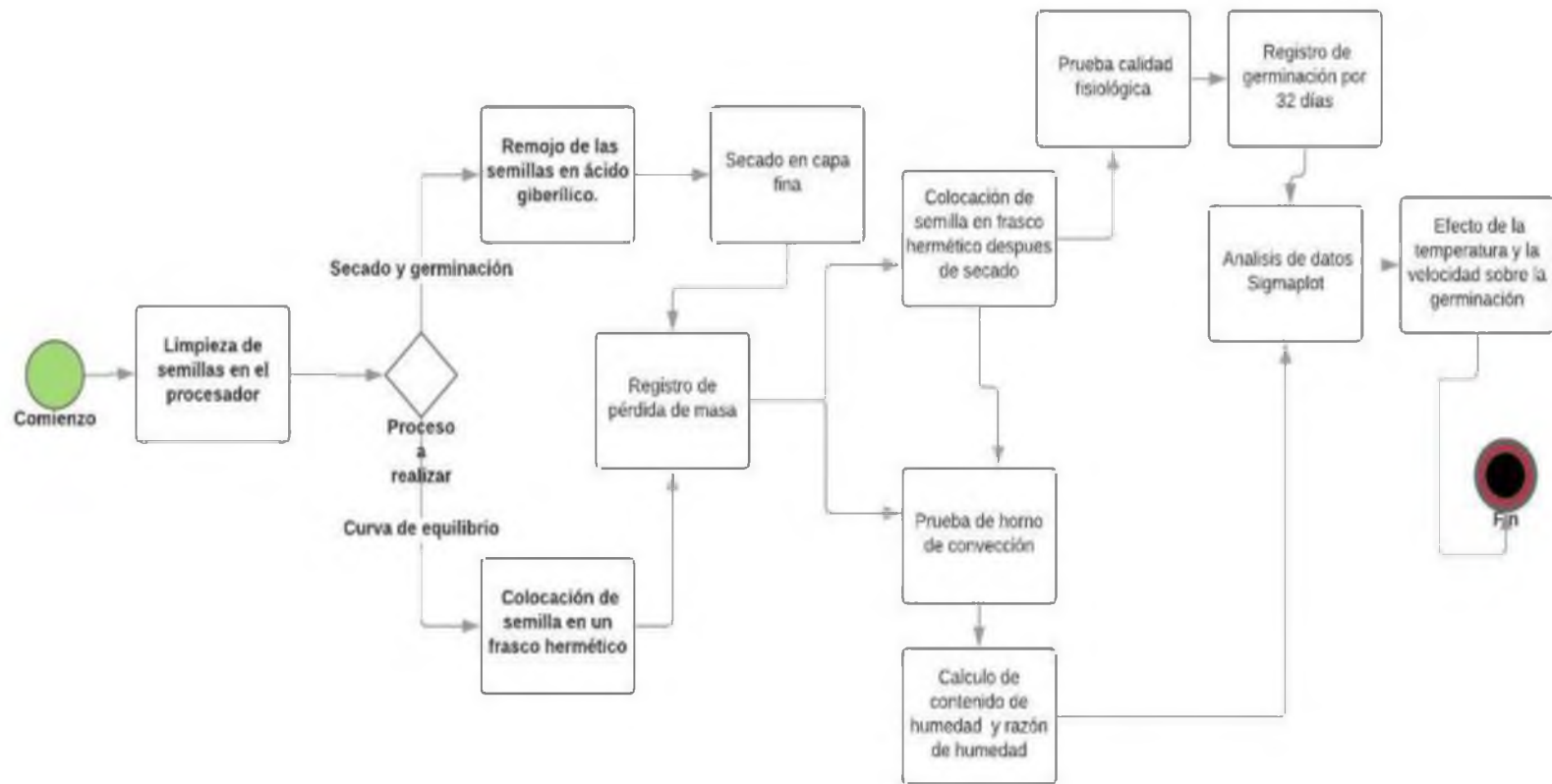


Figura 2.2. Diagrama de la metodología utilizada para la extracción y procesamiento de la semilla.

Limpieza de semilla

Para el proceso de limpieza, por medio de la fricción de álabes, se utilizó un procesador de alimentos comercial de la marca Hamilton Beach y un regulador de voltaje en 60 V. Se colocaron 50 g de semillas y 200 mL de agua (Figura 2.3), y se aplicaron tres repeticiones en el procesador por 1 minuto cada una. Se pasaron por un colador para separar las semillas del agua y del mucílago desprendido.



Figura 2.3 limpieza de la semilla.

Cálculo de pérdida de masa

La pérdida de masa de la semilla para cada muestra se basó en la diferencia de masa antes y después del proceso, y se determinó según la Ecuación 1.

$$M = 100 \cdot \left(\frac{m_c - m_t}{m_c} \right) \quad (1)$$

M es la pérdida de masa de la semilla (%).

m_c es la masa de la semilla antes de la prueba (g).

m_t es la masa de la semilla después de la prueba (g).

Calculo contenido de humedad

Para calcular el contenido de humedad durante la prueba de secado se aplicó la ecuación 2

$$X_n = \left(1 + (X_0 - 1) * \frac{M_0}{M_n} \right) * 100 \quad (2)$$

X_n es el contenido de humedad en base húmeda en el tiempo t de secado (porcentaje).

X_0 es el contenido de humedad en base húmeda en condición de equilibrio (decimal).

M_0 es la pérdida de masa de la semilla (g).

M_n es la masa final de la semilla en el tiempo t de secado (g).

Se utilizó la ecuación 3 para calcular el contenido de humedad en base seca de las semillas.

$$\bar{X}_s = \frac{100 * X_n}{(100 - X_n)} \quad (3)$$

X_s es el contenido de humedad en base seca en el tiempo t de secado (porcentaje).

X_n es el contenido de humedad en base húmeda en el tiempo t de secado (porcentaje).

Cálculo Razón de humedad

Con la ecuación 4 se determinó la razón de humedad en base seca de las semillas para cada repetición.

$$RX = \frac{(X_s - X_e)}{(X_i - X_e)} \quad (4)$$

RX es la razón de humedad en base seca en el tiempo t de secado (decimal).

X_s es el contenido de humedad en base seca en el tiempo t de secado (porcentaje).

X_e es el contenido de humedad de equilibrio en base húmeda en el tiempo t de secado (porcentaje).

X_i es el contenido de humedad en base seca en el tiempo inicial del secado (porcentaje).

Cálculo Actividad de agua

Con la ecuación 5 se determinó la actividad de agua para determinar la isoterma de desorción.

$$A_w = \frac{HR}{100} \quad (5)$$

A_w es la actividad de agua (decimal).

HR es la humedad relativa del aire (porcentaje).

Remojo en ácido giberélico

Las semillas fueron remojadas en 1 litro de agua destilada y 12 ml de ácido giberélico por dos horas a temperatura ambiente, esto se realizó como tratamiento pre germinativo (Figura 2.4).



Figura 2.4 Tratamiento pre germinativo.

Secado en capa fina

Para realizar el proceso de secado, las pruebas fueron realizadas entre el 24 de abril del 2018 hasta el 3 de octubre del mismo año. En el cuadro 2.2 se observan las fechas específicas donde se realizaron las repeticiones.

Cuadro 2.2 Prueba de secado.

Repeticición	Fecha de Prueba	Temperaturas (°C)	Velocidad (m/s)
1	24 de abril	25, 30, 35	1,5
2	16 de mayo	25, 30, 35	1,5
1	3 de Julio	25, 30, 35	3
2	11 de Julio	25, 30, 35	3
1	8 de agosto	25, 30, 35	0,75
2	3 de octubre	25, 30, 35	0,75

Como se muestra en el cuadro 2.2 se procesaron 18 papayas para cada día de trabajo. Las semillas obtenidas de las repeticiones fueron divididas en tres muestras con un peso promedio de 115,91 g, pero dado que todas las papayas tenían diferente cantidad de semillas no se pudo hacer que la masa fuera constante entre las repeticiones.

Se realizó con seis papayas de peso promedio de 1517,32 g, una distribución porcentual de la masa de la cáscara, la pulpa y las semillas, para determinar cuál es la masa aprovechable de toda la fruta para la investigación. Obteniendo 59,04 % de pulpa del total de la fruta, 27,47% de la cáscara y un 8,05% de las semillas.

Las muestras de cada ensayo fueron colocadas en un tamiz de aluminio de 428,59 g y este a su vez fue colocado en una secadora experimental de convección forzada (Figura 2.5) en capa fina con un autotransformador a 120 Voltios.

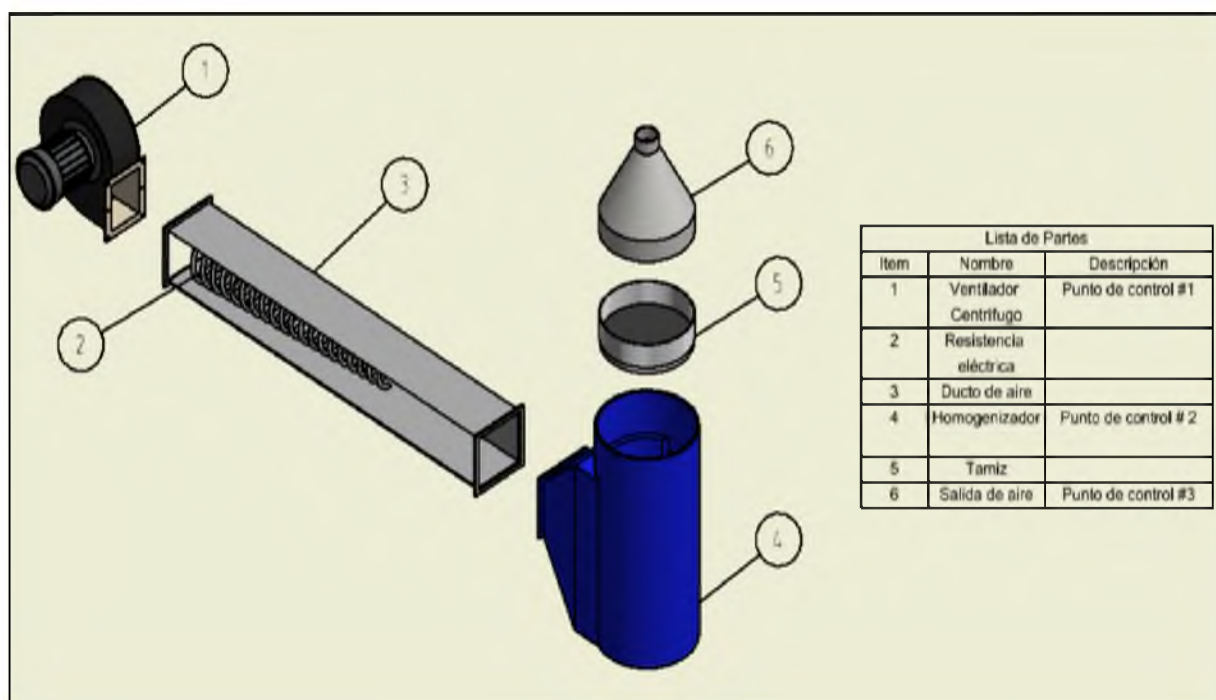


Figura 2.5 Secadora experimental de convección forzada. [53]

Cada muestra fue secada a tres temperaturas y tres velocidades. Las temperaturas seleccionadas para esta prueba fueron de 25 °C, 30°C y 35°C. Las velocidades elegidas fueron 0,75m/s, 1,5m/s y 3,0 m/s. El proceso para cada temperatura y velocidad correspondiente tuvo una duración de aproximadamente 1 hora con 20 minutos, con revisiones en intervalos de cada 2 minutos los primeros 10 minutos y posteriormente se realizaron revisiones cada 5 minutos los restantes 1 hora y 20 minutos. Se registró la pérdida de agua asociada al cambio de masa en el tiempo con una balanza analítica marca BOECO modelo BPS 52 plus (figura 2.6). Las semillas se secaron hasta alcanzar una diferencia de masa menor o igual a 0,5%. Se realizaron dos repeticiones para cada tratamiento de velocidad y temperatura para determinar si se genera alguna diferencia significativa entre ellas.



Figura 2.6 Registro de pérdida de agua en proceso de secado.

Curva de equilibrio

Las semillas fueron colocadas en un recipiente hermético de vidrio con un *data logger* marca ONSET HOBO, modelo U12-013 y uno modelo MX1011, para determinar la temperatura y el porcentaje de humedad relativa en el aire en la muestra por un periodo promedio de 18 horas. Los recipientes fueron colocados en una incubadora marca INCUCELL, a 25 °C.

La generación de diferencias en el contenido de humedad de las semillas se realizó a través de la humedad relativa del aire, mediante cambios de temperatura y velocidad en la secadora conocida como el método dinámico.

Prueba horno de convección

Con las semillas secas, se procedió a colocarla en el horno de convección marca Lab- Line Instruments, modelo Imperial IV a 105°C por 24 horas según la norma Reglas para Análisis de Semillas MAPA (MAPA 2009). Se realizaron tres repeticiones de 5 g de semillas.

Efecto de la temperatura en la rapidez de secado

El efecto de la temperatura en la rapidez de secado se determinó con la ecuación Arrhenius, ecuación 5, para cuantificar la energía de activación mínima para iniciar el proceso de desorción [17].

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R_g \cdot T_a}\right) \quad (5)$$

Donde, k_0 es el factor pre-exponencial (min^{-1}),

E_a es la energía de activación (J mol^{-1}),

R_g es la constante del gas ($8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$),

T_a es la temperatura absoluta de tostado (K).

Pruebas de calidad Fisiológica

Las pruebas de calidad fisiológica, se realizaron a través del análisis de germinación de semillas siguiendo las normas del Laboratorio de Semillas del Centro para Investigaciones de Granos y Semillas (CIGRAS).

El sustrato utilizado para realizar las pruebas de germinación fue la turba (marca Theriault & Hachey Grower Mix) acondicionada según las normas de la International Seed Testing Association (ISTA, 2004).

Para llevar los ensayos a cabo se utilizó cajas plásticas transparentes de 30×21,5×23cm con tapa. Cada caja fue dividida en cuatro secciones numeradas, en donde se colocaron 50 semillas en cada sección. Este procedimiento se realizó para cada repetición de temperatura y velocidad, al día siguiente de realizada la prueba de secado.

Las cajas a su vez fueron colocadas en una cámara de germinación fabricada por el CIGRAS que utiliza una cortina de agua constante. La cámara previamente mencionada tiene una temperatura constante de 30°C, una humedad relativa aproximada de 98% y con fotoperiodos de 12 horas [15].

Las evaluaciones para cada uno de los ensayos de germinación fueron realizadas cada dos días durante un mes. En estas evaluaciones se registró la cantidad de semillas germinadas.

A los 15 días de sembradas las semillas, cuando el hipocórito de la plántula tiene una altura promedio de 10 cm y han germinado la mayoría de plántulas, fue extraída de la caja y se observó si es una plántula sana o enferma. Los restantes 15 días se siguieron realizando evaluaciones para determinar si había nuevas plántulas repitiendo el procedimiento antes descrito.

Análisis Estadístico

Se utilizó el software SIGMA PLOT 14 para realizar los ajustes de regresión no lineal de los modelos matemáticos y el diseño experimental fue analizado al azar con un arreglo de tres factores en Infostat 2018. El grado de ajuste fue evaluado a partir de la magnitud del coeficiente de determinación (R^2) y la desviación estándar (SE).

2.4. Resultados y Discusión

2.4.1 Cinética de secado

2.4.1.1 Selección de modelo matemático con mejor ajuste

Las figura 2.7, 2.8 y 2.9 muestran los ajustes de los seis modelos para la temperatura de 25°C a las velocidades de 0,75, 1,5 y 3 m/s respectivamente. Los valores observados de las repeticiones mantuvieron la misma tendencia decreciente siguiendo un patrón de rapidez semejante.

Se logró determinar que al final del secado se tiende a un valor de equilibrio, donde la pérdida de contenido de humedad se hace cada vez más inferior. Se denota que al principio del secado la pérdida de masa es grande y conforme se llega alrededor de los 60 minutos, la misma tiene diferencias menores a los 0,5 gramos, volviéndose constante a partir de los 70 minutos.

El comportamiento previamente descrito se le atribuye a que inicialmente las semillas de papaya tienen un alto contenido de humedad, en un rango entre los 65 y 72% (b.h.). Durante el período inicial del secado la temperatura de la superficie de la semilla aumenta,

y se da la evaporación del agua superficial llegando a rangos de humedad de equilibrio entre 22 y 26% (b.h.). En el rango inferior a 22% el secado es principalmente controlado por mecanismos de difusión interna. Este comportamiento similar se ha demostrado en otras investigaciones [45-47].

En la figura 2.7 se observa que el modelo de Midilli presentó un mejor ajuste con R^2 de 0,994. Sin embargo, el valor del coeficiente de determinación fue mayor que 0,99 en los modelos Logarítmico (0,992), Verma (0,991) y de Henderson y Pabis Modificado (0,992), es decir; también pueden representar adecuadamente el secado de la semilla de papaya a 25 °C.

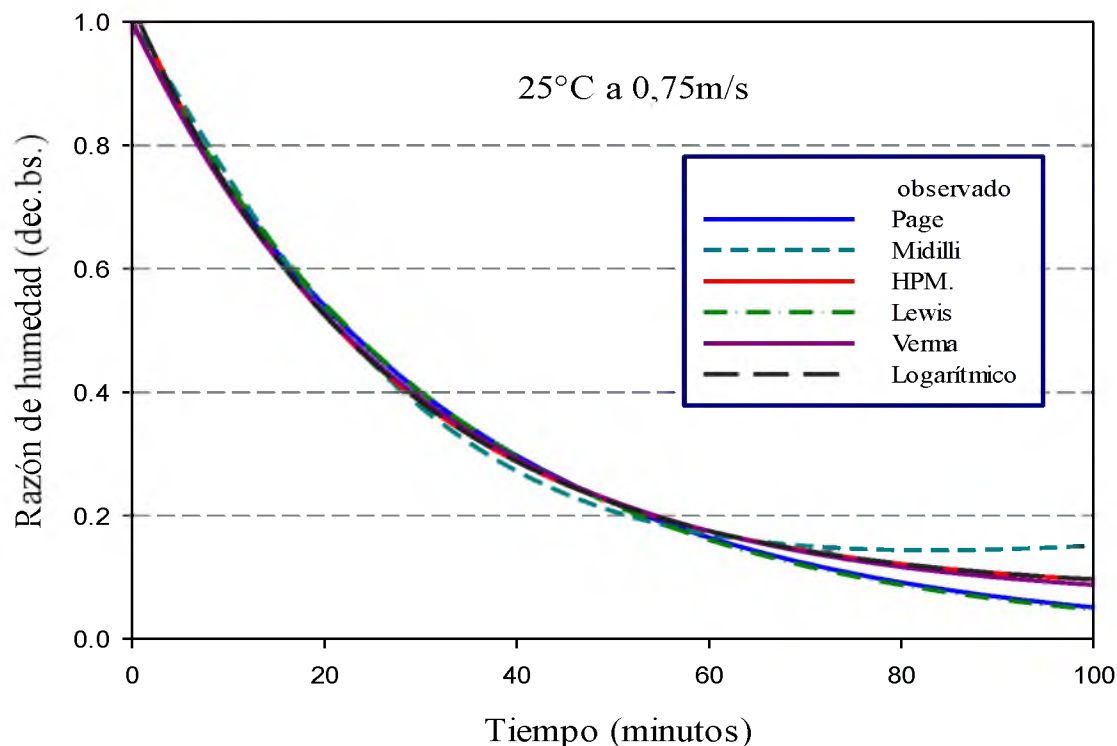


Figura 2.7 Cinéticas de secado a 25°C a velocidad de 0,75 m/s en seis modelos matemáticos.

En la figura 2.8, se determinó que el modelo de Midilli, Henderson Pabis Modificado y Logarítmico presentan un mejor ajuste con un R^2 de 0,938. Sin embargo se puede observar en los seis modelos los valores observados no se ajustan de una manera ideal. Esta diferencia que existe entre las repeticiones en esta velocidad hace que el ajuste general se vea afectado. Lo anteriormente descrito ocurre por el efecto de la masa inicial, dado que las papayas no tenían la misma cantidad de semillas generando la diferencia de constantes de secado. Sin embargo en esta velocidad el modelo Logarítmico es el que tiene un error estándar más bajo (0,070).

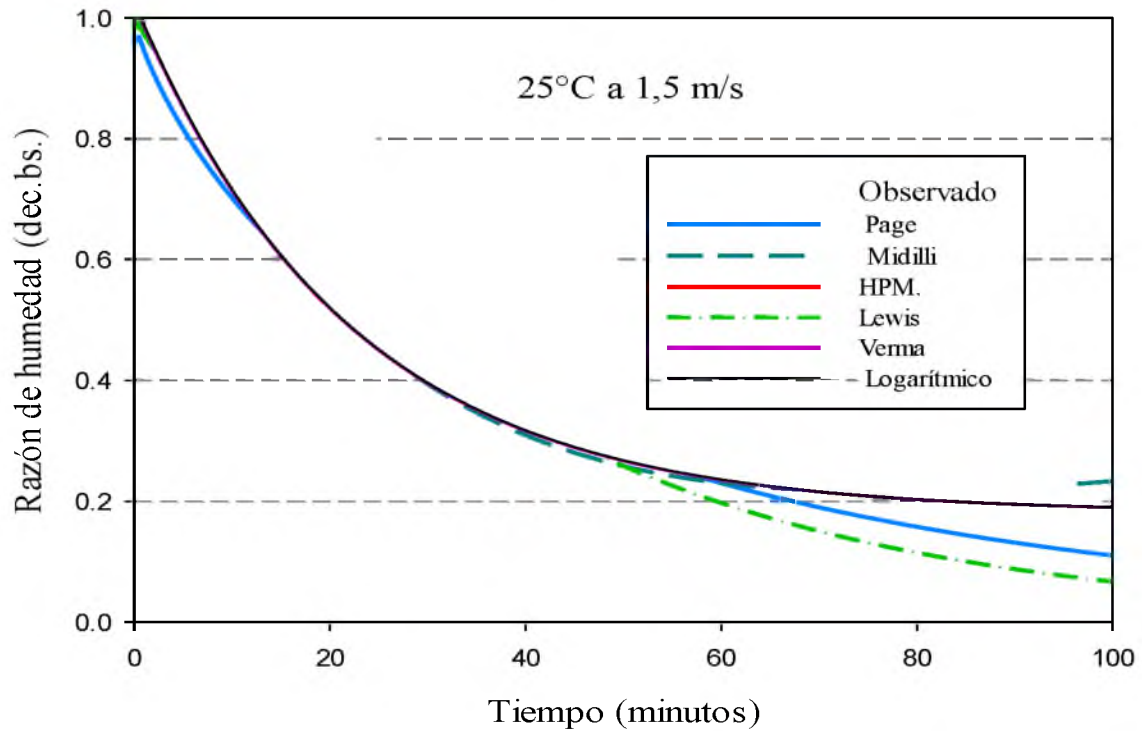


Figura 2.8 Cinéticas de secado a 25°C a velocidad de 1,5 m/s en seis modelos matemáticos.

En la figura 2.9 se presentan los modelos de Midilli, Henderson Pabis Modificado y Logarítmico para la velocidad de 3 m/s en la temperatura de 25°C respectivamente. Los mejores ajustes observados en esta velocidad tiene el mismo coeficiente de determinación R^2 de 0,978. Sin embargo el modelo Logarítmico presenta un error estándar más bajo de 0,045.

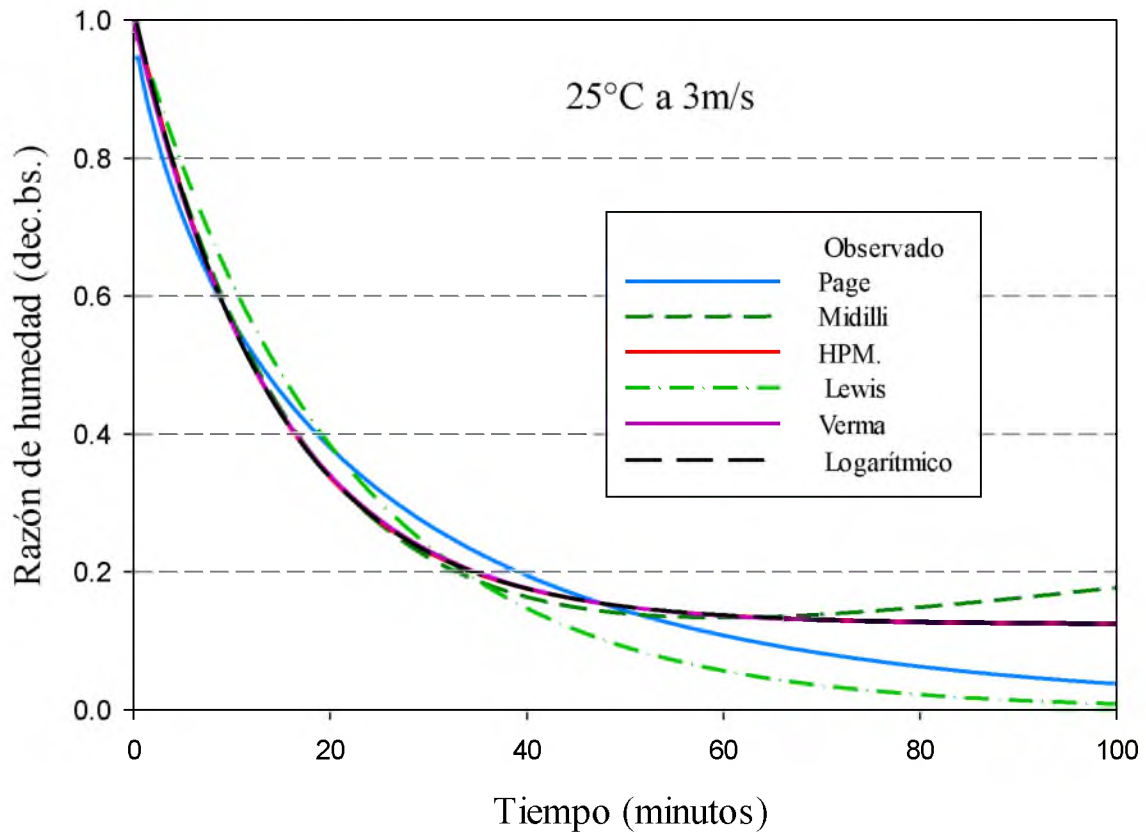
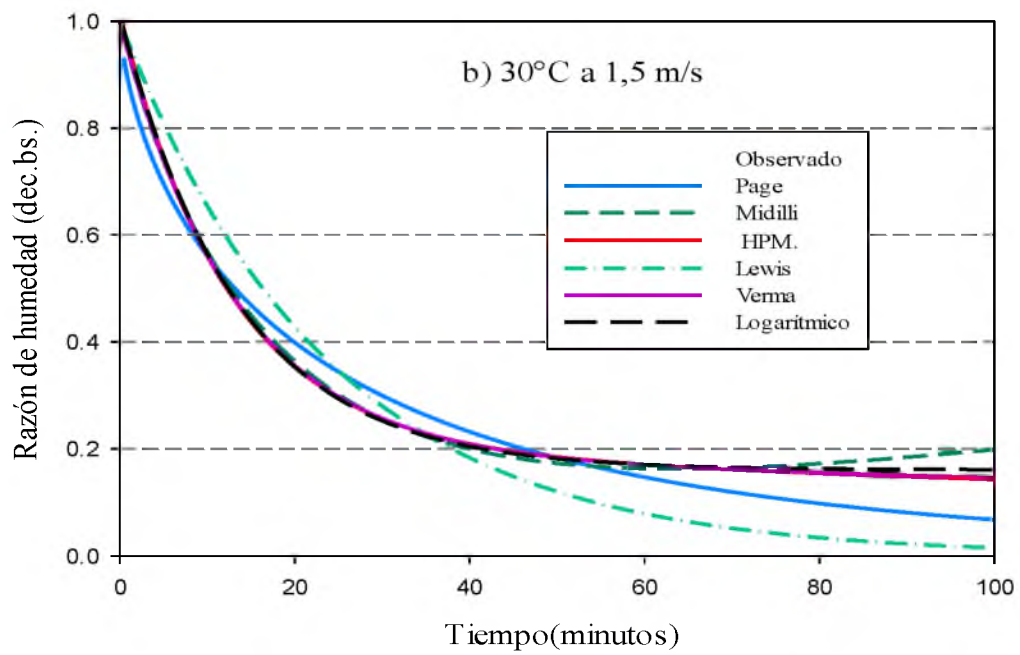
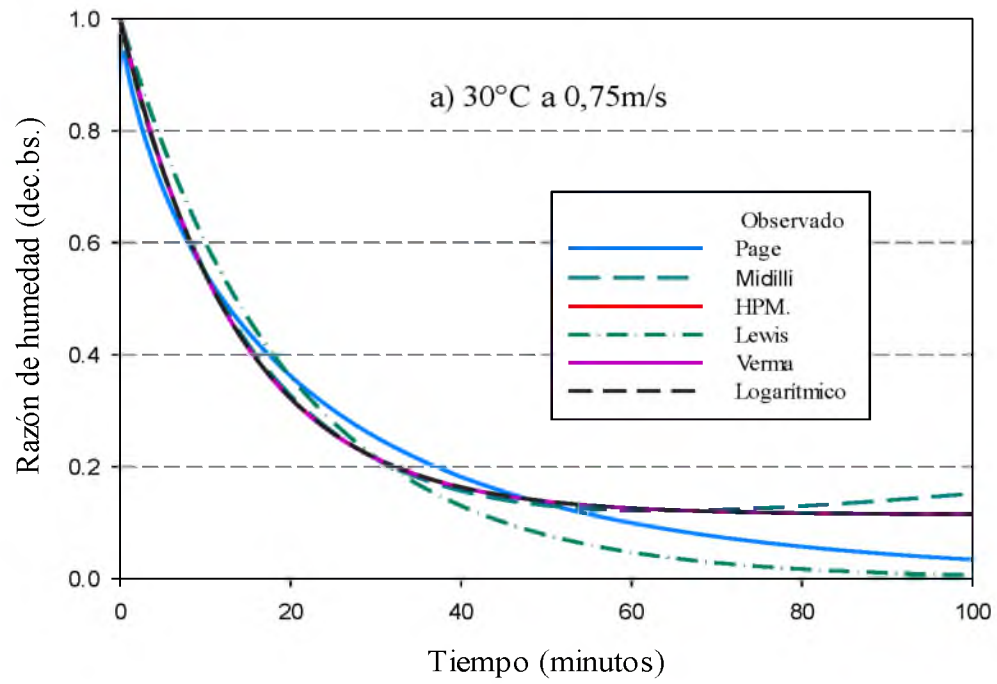


Figura 2.9. Cinéticas de secado a 25°C a velocidad de 3m/s en seis modelos matemáticos.

En la figura 2.10 se presentan las cinéticas de secado a 30°C en las tres velocidades estudiadas, se determinó que presentan el mismo patrón de comportamiento decreciente,, siendo los modelos de Henderson Pabis Modificado, Verma y Logarítmico los que presentan los mejores ajustes y con coeficientes de errores más bajos y similares en las tres velocidades. Para 0,75 m/s tienen un coeficiente de determinación de 0,985, para la velocidad de 1,5 m/s el R^2 es de 0,935 y para la velocidad de 3 m/s un coeficiente de 0,980.



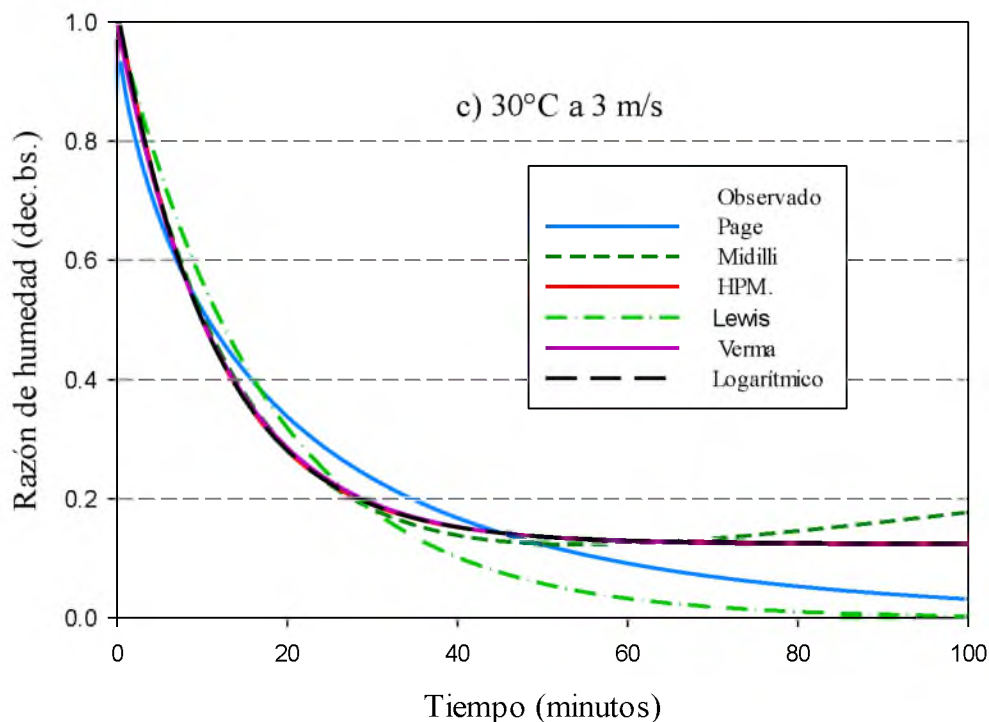
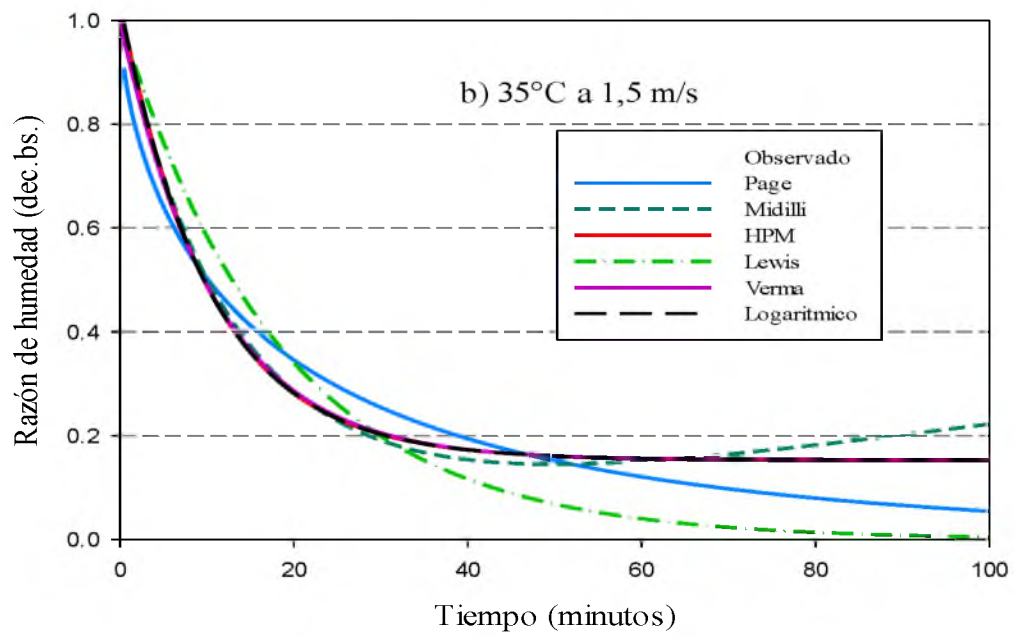
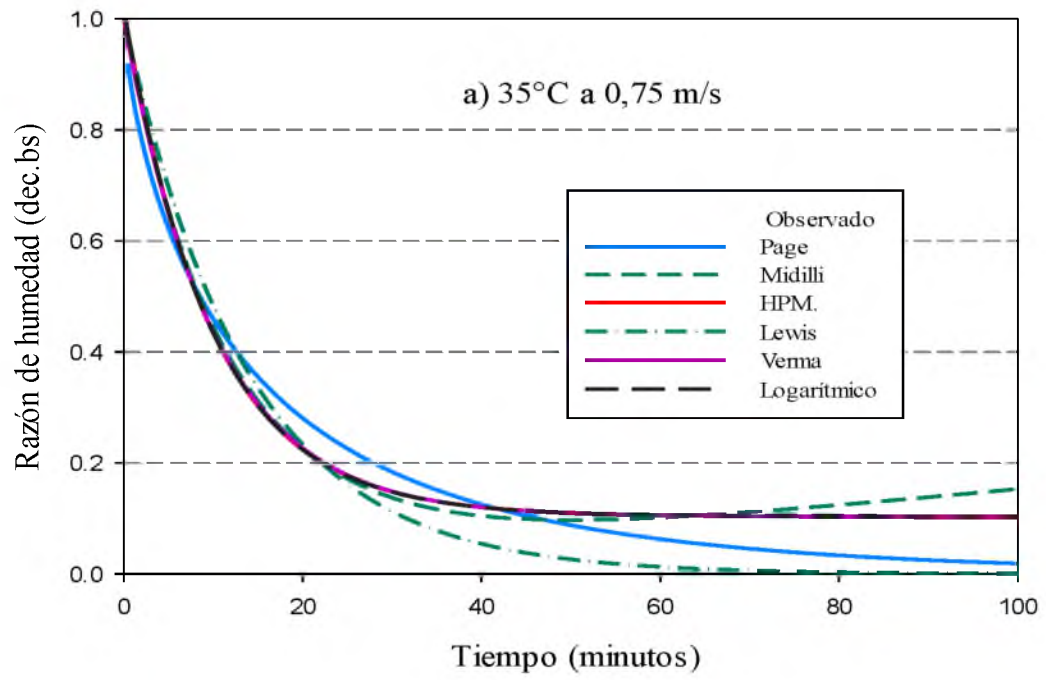


Figura 2.10. Cinéticas de secado a 30 °C en las tres velocidades en seis modelos matemáticos. a) 0,75m/s b) 1,5 m/s y c) 3m/s.

En la figura 2.11 se presentan las cinéticas de secado a 35°C en las tres velocidades estudiadas, para todas las velocidades el modelo logarítmico presento un mejor ajuste en todos los casos con coeficientes de determinación altos y errores estándar más bajos. Siendo para la velocidad de 0,75 m/s un R^2 de 0,983 con un error de 0,038. En la velocidad de 1,5 m/s se determinó un coeficiente de determinación de 0,953 con un error (0,059) y finalmente para la velocidad de 3 m/s el R^2 es de 0,919 y un error de (0,082).



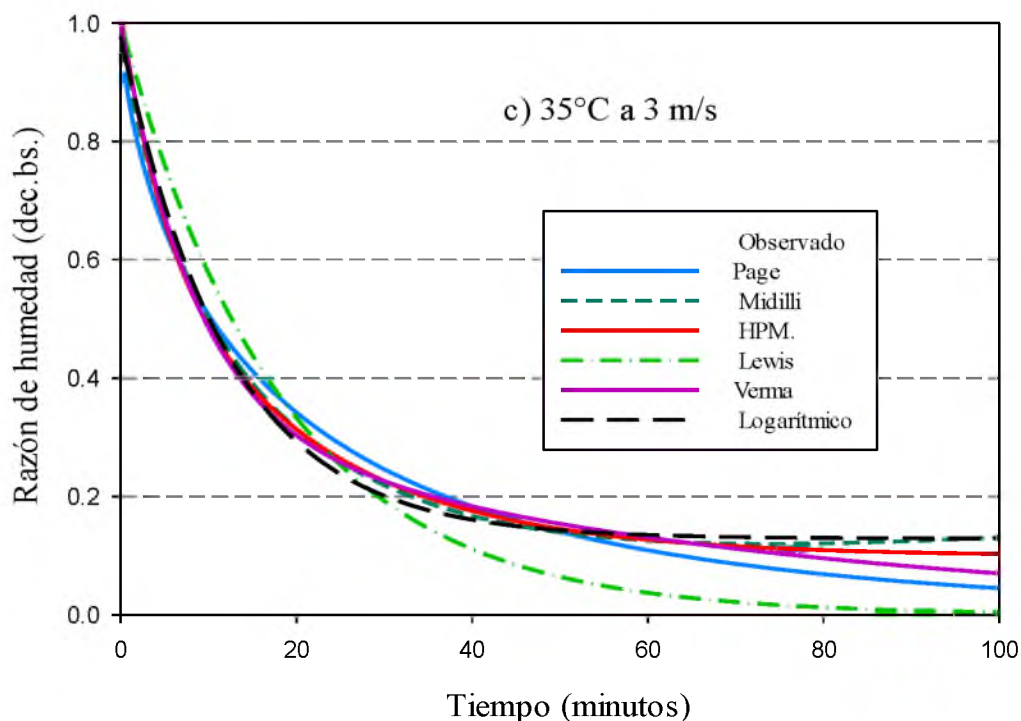


Figura 2.11. Cinéticas de secado a 35°C en las tres velocidades en seis modelos matemáticos. a) 0,75m/s b) 1,5 m/s y c) 3m/s.

En el cuadro 2.3 se presentan los parámetros de los modelos matemáticos con la repetición general para las temperaturas de 25, 30 y 35°C en las tres velocidades. Se denotó que el modelo Logarítmico, Verma, Henderson Pabis Modificado y Midilli representan adecuadamente las cinéticas de secado de papaya y con errores estándar bajos.

También se observó que el parámetro que multiplica el tiempo (k), en cada uno de los modelos aumenta conforme se aumenta la temperatura de secado y por ende la temperatura del producto aumenta generándose un secado más rápido, lo que influye en el comportamiento de la cinética de secado al realizar un ajuste adecuado. [17, 48].

Cuadro 2.3 Parámetros de los modelos matemáticos para las tres temperaturas en las tres velocidades.

Temperatura °C	Velocidad m/s	Parámetros	Modelos matemáticos					
			Page	Midilli	Henderson Pabis M.	Lewis	Verma	Logarítmico
25	0,75	k(dec)	0,030	0,020	0,037	0,030	0,035	0,037
		R ²	0,994	0,997	0,996	0,994	0,995	0,996
		E.E	0,033	0,024	0,029	0,034	0,030	0,028
	1,5	k(dec)	0,057	0,033	0,046	0,027	0,431	0,046
		R ²	0,961	0,969	0,968	0,950	0,968	0,968
		E.E	0,076	0,071	0,073	0,085	0,070	0,070
	3,0	k(dec)	0,099	0,062	0,072	0,048	0,070	0,072
		R ²	0,978	0,989	0,988	0,965	0,990	0,988
		E.E	0,060	0,445	0,046	0,076	0,045	0,045
30	0,75	k(dec)	0,109	0,072	0,072	0,051	0,073	0,072
		R ²	0,985	0,984	0,985	0,941	0,985	0,985
		E.E	0,050	0,047	0,038	0,070	0,037	0,037
	1,5	k(dec)	0,124	0,079	0,080	0,042	0,077	0,074
		R ²	0,913	0,932	0,935	0,850	0,935	0,935
		E.E	0,080	0,073	0,074	0,104	0,071	0,071
	3,0	k(dec)	0,126	0,083	0,888	0,057	0,084	0,090
		R ²	0,953	0,978	0,980	0,918	0,980	0,980
		E.E	0,063	0,044	0,043	0,082	0,042	0,041
35	0,75	k(dec)	0,152	0,999	0,102	0,073	0,999	0,102
		R ²	0,977	0,980	0,982	0,926	0,982	0,983
		E.E	0,060	0,042	0,040	0,077	0,039	0,038
	1,5	k(dec)	0,0163	0,088	0,097	0,054	0,092	0,097
		R ²	0,909	0,949	0,953	0,833	0,952	0,953
		E.E	0,081	0,062	0,074	0,108	0,060	0,059
	3,0	k(dec)	0,149	0,124	0,212	0,055	0,120	0,082
		R ²	0,914	0,922	0,924	0,851	0,922	0,919
		E.E	0,084	0,082	0,083	0,109	0,080	0,082

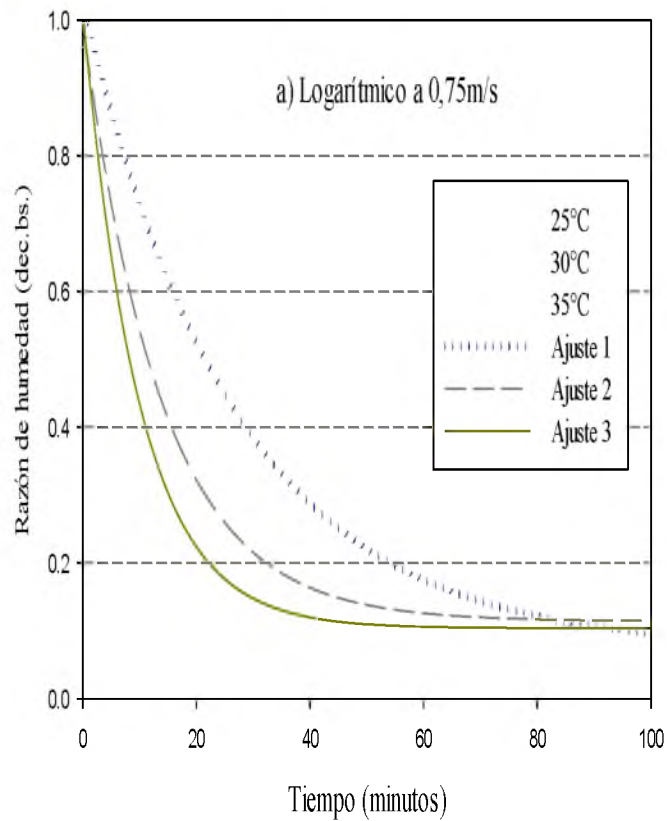
T es la temperatura de secado, V velocidad de secado, k parámetro de cada modelo que multiplica el tiempo. R² es el coeficiente de determinación y E.E. es el error estándar.

Con las figuras y cuadro anterior se observa que no hay un comportamiento general en cuanto a un solo modelo matemático que realice un mejor ajuste, porque difiere de la temperatura y la velocidad; siendo los modelos de Midilli, Henderson Pabis Modificado y logarítmico los que presentan cinéticas de secado con ajustes altos, tal como lo explica los estudios consultados para semillas de papaya [17] y otros productos como limón [41], albaricoque [43] y ñame [48].

De manera general se pudo determinar que conforme se aumenta la temperatura del aire de secado, el proceso se hace más rápido, perdiendo más masa al inicio y estabilizándose en un periodo menor. Dicho proceso es el esperado en la cinética de secado en capa delgada [17, 41,43, 47, 48].

El modelo logarítmico fue seleccionado para el estudio de la cinética de secado debido a que fue el que presentó mejores ajustes con errores estándares bajos y además porque la constante de secado representa simplificación de variables. Este modelo ha sido utilizado y seleccionado como el mejor en otros estudios [41, 48].

En la Figura 2.12 se muestra el comportamiento del modelo seleccionado en las tres temperaturas para cada una de las velocidades. Se determinó que el modelo logarítmico representa el mejor arreglo de los valores observados y se verifica que a mayor temperatura del flujo de aire, el secado de la semilla es más rápido. Además se observó que a mayor velocidad el secado de la semilla es más rápido.



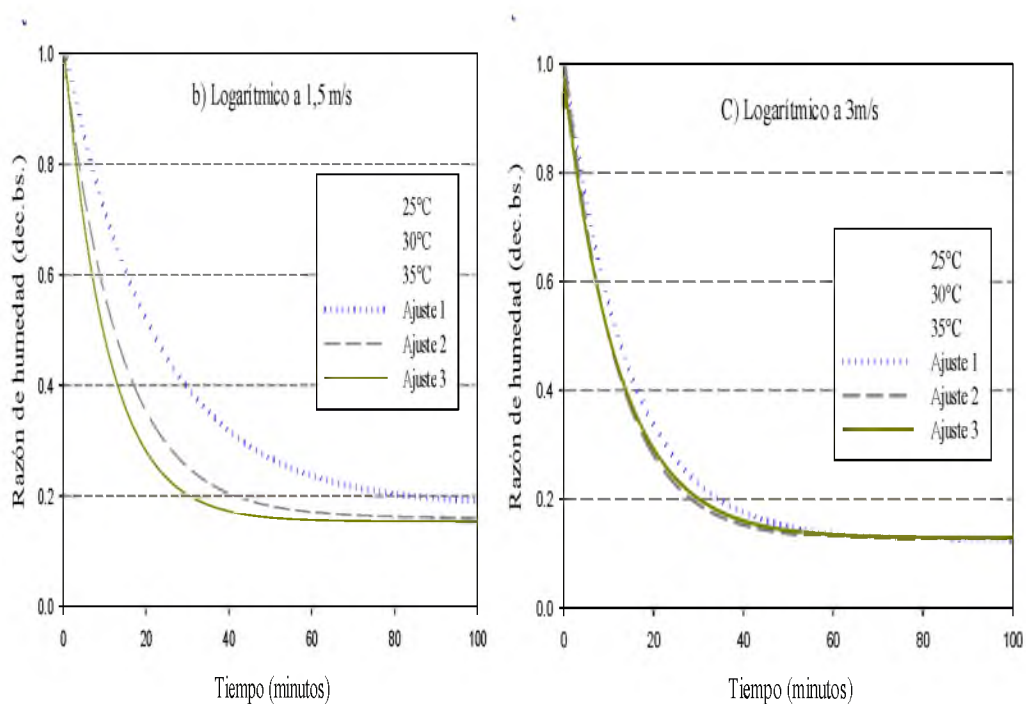


Figura 2.12 Cinéticas de secado del modelo logarítmico en las tres temperaturas a velocidad constante.

2.4.2.2 Energía de activación

En el cuadro 2.4 se observó que las constantes de secado k , en el modelo logarítmico, incrementa conforme se aumenta la temperatura del aire de secado, este comportamiento es el esperado al igual que otros estudios [17,41, 47, 48]. Lo anterior puede explicarse por el efecto de la evaporación, la difusividad y la transferencia de calor durante el secado que

acelera la migración del agua a través del mecanismo de difusión dentro del producto y la absorción del agua por el aire [47].

Se observó que para la temperatura de 35°C en la velocidad de 3 m/s la constante k es menor que la de 30°C. Esto pudo deberse por la distribución del flujo del aire durante el proceso de secado, al aumentar la rapidez del aire, se logra mover la semilla debido a que el aire pasa a través de la misma, por su baja densidad específica y tamaño, lo que facilita el cambio de posición y aumenta el área expuesta al flujo de aire, por lo tanto requiere menos energía para iniciar el proceso de secado. Se debe mencionar que a diferencia de otros granos el cambio en la densidad de la semilla es considerable siendo muy baja al final del proceso y con riesgo de pérdida de masa conforme se secan a velocidades como 3m/s.

Cuadro 2.4. Constantes de secado en el modelo logarítmico para las tres temperaturas y tres velocidades.

T°C	v (m/s)	k (min ⁻¹)
25	0,75	0,037
30	0,75	0,072
35	0,75	0,102
25	1,5	0,046
30	1,5	0,074
35	1,5	0,097
25	3,0	0,072
30	3,0	0,088
35	3,0	0,082

T es la temperatura de secado, V velocidad de secado, k constante de secado.

Con las constantes de secado expuestas anteriormente, se procedió a asociarlas con la relación lineal que plantea la ecuación de Arrhenius (5). En el cuadro 2.5 se muestra el factor pre exponencial de Arrhenius y la energía de activación mínima para iniciar el proceso de desorción para las tres velocidades estudiadas.

Cuadro 2.5 Factor preexponencial y energía de activación para el modelo Logarítmico en las tres velocidades.

0,75 m/s		1,5 m/s		3m/s	
K_0	E_a (J mol ⁻¹)	K_0	E_a (J mol ⁻¹)	K_0	E_a (J mol ⁻¹)
$1,03 \times 10^{12}$	76.599,33	$4,933 \times 10^8$	57.184,86	4,859	10.337,59

K_0 Factor preexponencial. E_a : energía de activación,

Se determinó que los valores de energía de activación para las velocidades de 0,75 m/s y 1,5 m/s, se encuentran dentro de los rangos para productos agrícolas, entre los 12,7 kJ mol⁻¹ y los 110 kJ mol⁻¹[45, 48]. Además se observó que conforme aumenta la velocidad, el factor pre exponencial de Arrhenius y la energía de activación van disminuyendo, este comportamiento es el esperado y se ha corroborado en otras publicaciones [49].

En la figura 2.13 se graficó la relación proporcional entre la constante de secado y la temperatura en las velocidades de 0,75 y 1,5 m/s, se logró determinar esa relación a través del ajuste lineal con transformación de variables y la energía de activación.

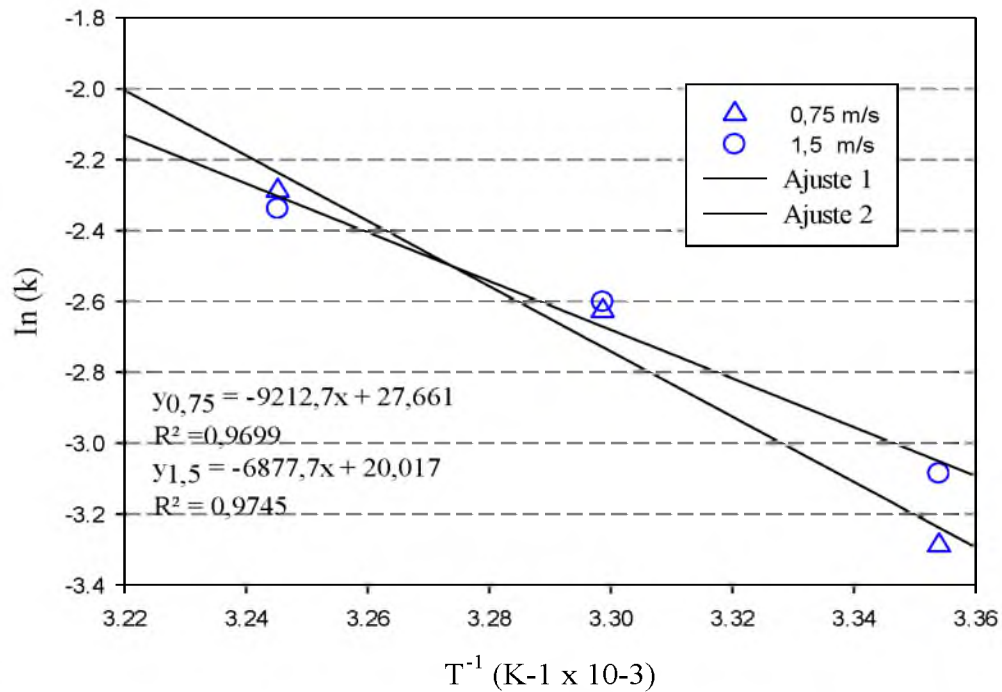


Figura 2.13 Relación entre la temperatura y la constante de secado en semilla de papaya para las velocidades de 0,75 y 1,5 m/s.

La energía de activación fue establecida adecuadamente con coeficientes de determinación mayor o igual que 0,97, para las velocidades de 0,75 y 1,5 m/s, de tal manera que representan la energía requerida para iniciar la difusión de la humedad durante el secado, como ha sido confirmado por otros autores [17, 41, 48].

2.4.2.3 Efecto de la velocidad sobre la constante de secado

En la figura 2.14 se observa relación entre las constantes de secado y las velocidades para las tres temperaturas. Para 25°C y 30 °C el efecto es proporcional conforme se aumenta la velocidad aumenta la constante de secado, este efecto obtenido es el esperado.

El efecto obtenido en la temperatura de 35°C es distinto a los previamente descritos. Lo anterior se puede describir por el modo en que se empleó el flujo de aire. El flujo del aire en las menores temperaturas atravesó las semillas en el proceso de secado, haciendo que el calor se transfiera de manera homogénea. En la temperatura de 35°C hubo una variación en la dirección de flujo por los límites operativos del sistema. Es conocido que el secado es afectado por el modo en que el flujo de aire entra en contacto con la semilla [47].

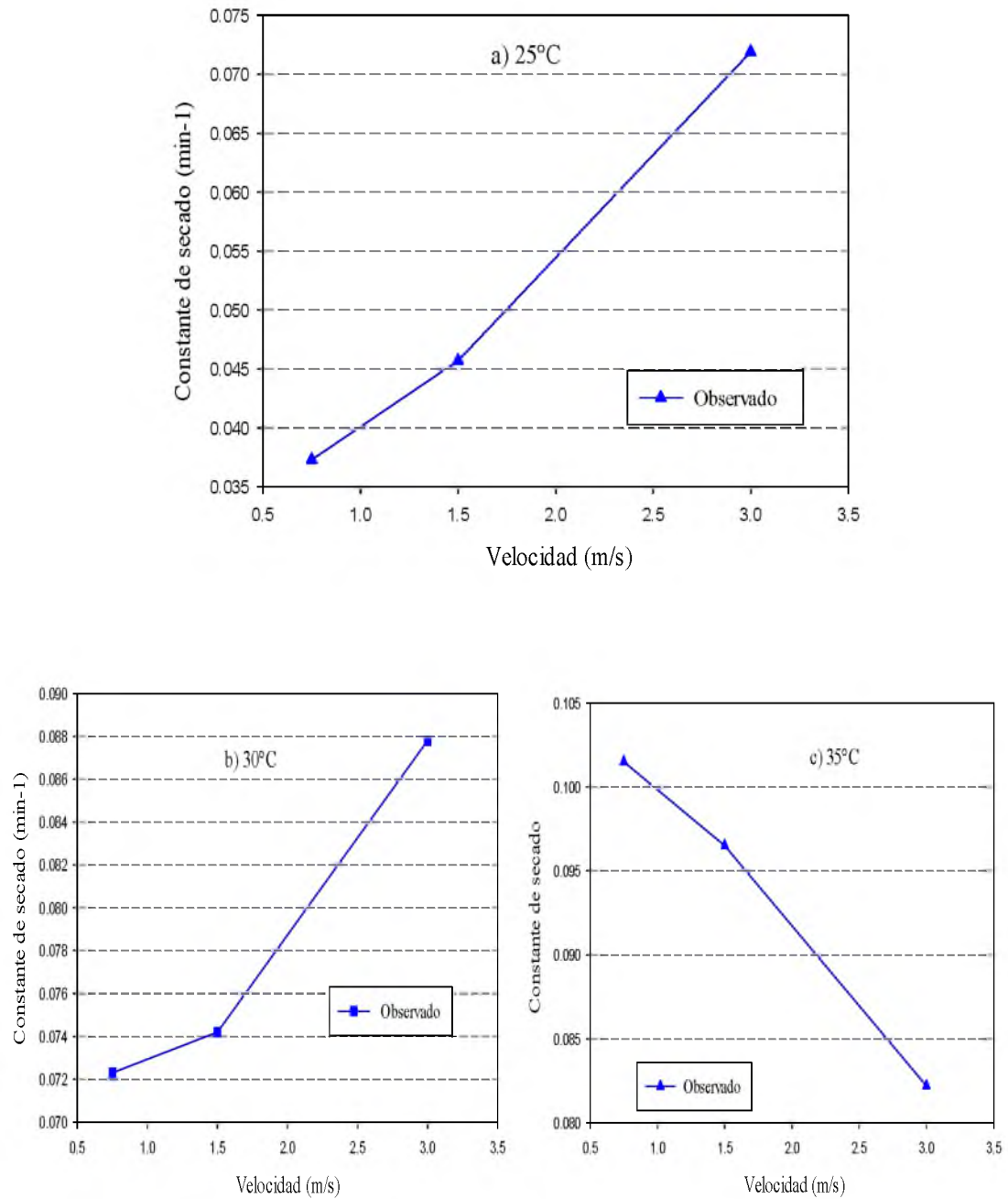


Figura 2.14 Efecto de la velocidad sobre la constante de secado en semilla de papaya para las tres temperaturas.

2.4.2 Curva de equilibrio higroscópico

Experimentalmente se determinó que el tiempo para alcanzar el equilibrio en la humedad relativa del aire fue de 12 horas. Después de analizar el equilibrio dinámico, fue necesario incluir el secado de las semillas por medio de la convección natural utilizando sales como CaCl_2 , llamado método semiestático, cuyo fin fue generar los puntos de menor humedad relativa.

El contenido de humedad inicial de las semillas fue de 257,14 % (b.s.). En esta condición se saturaría el 100% del aire alrededor, el cual debe disminuirse hasta 60%(b.s.) para utilizar los resultados de la figura 2.15. La isoterma a 25 °C es semejante a una curva de desorción Sigmoidal tipo II característica de productos frescos como frutas y verduras, donde a mayor actividad del agua, el contenido de humedad decrece de una manera más pronunciada [26, 28].

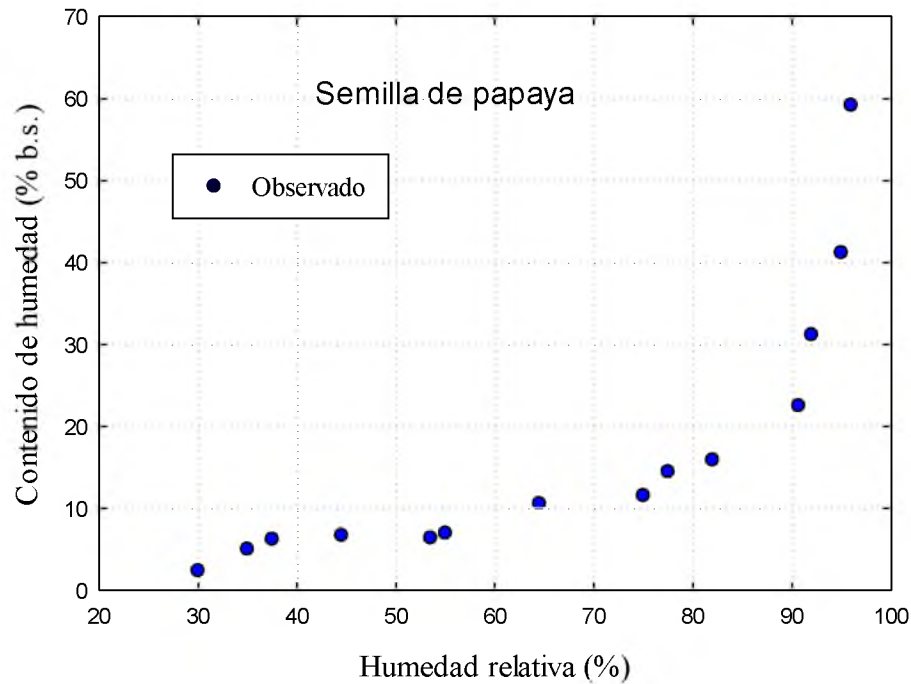


Figura 2.15 Relación de equilibrio entre el contenido de humedad de la semilla de papaya y la humedad relativa del aire.

Según la figura 2.16 se observan dos tendencias con respecto a la disminución del contenido de humedad, una con disminución considerable de 60 a 40 % (b.s.) y otra con disminución leve para humedades menores que 20 % (b.s.).

Siguiendo la línea de desorción de las semillas de 60 a 20 % (b.s.) con una humedad relativa de equilibrio que varía de 100 y 90%, respectivamente. A partir de esta información se calculó una disminución lineal con pendiente de 6% (b.s.)/% de humedad del aire. Para

los contenidos de humedad menor que 20 % (b.s.) y humedades relativas inferiores a 90 %, se calculó una pendiente menor de 0,22% (b.s.)/% de humedad del aire.

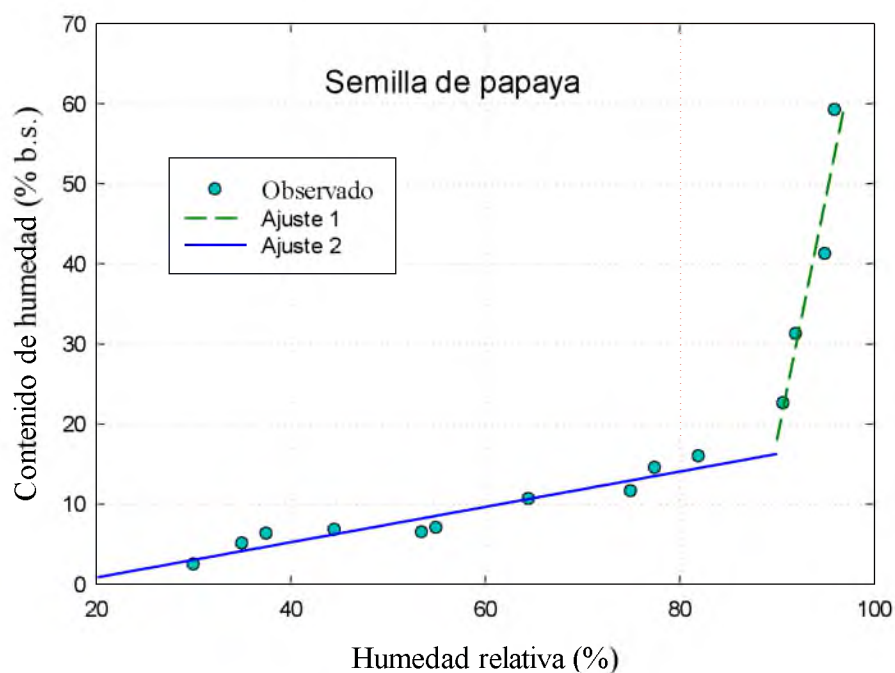


Figura 2.16. Ajustes realizados a la relación de equilibrio entre el contenido de humedad de la semilla y la humedad relativa del aire.

En el cuadro 2.6 se presentan los ajustes lineales realizados a la relación de equilibrio entre el contenido de humedad en base seca y la humedad relativa del aire, mostrada en la figura anterior, siendo las pendientes de los ajustes decrecientes como es esperado. El ajuste 1 tiene una pendiente más pronunciada siendo 27 veces mayor con respecto a la pendiente del segundo ajuste. Además de tener coeficientes de determinación altos igual o mayor al 0,900.

Cuadro 2.6 Parámetros del ajuste lineal.

Ajuste	m	b	R ²	E.E
1	6,003	-522,268	0,900	6,106
2	0,220	-3,590	0,914	1,341

m pendiente, b intersección de la recta, R² coeficiente de determinación, E.E, error estándar.

Con los datos de la figura 2.17 se ajustaron a los modelos matemáticos de equilibrio higroscópico utilizados en productos agrícolas. En la figura 2.18, se observan los 4 modelos referenciados, se determinó el modelo de Guggenheim, Anderson y Boer (GAB) ajusta adecuadamente con un coeficiente de determinación de 0,978, seguidamente del modelo BET con R² de 0,967. Estos modelos han sido utilizados eficazmente en otros productos como maíz [26], ñame [51] y frijoles [52].

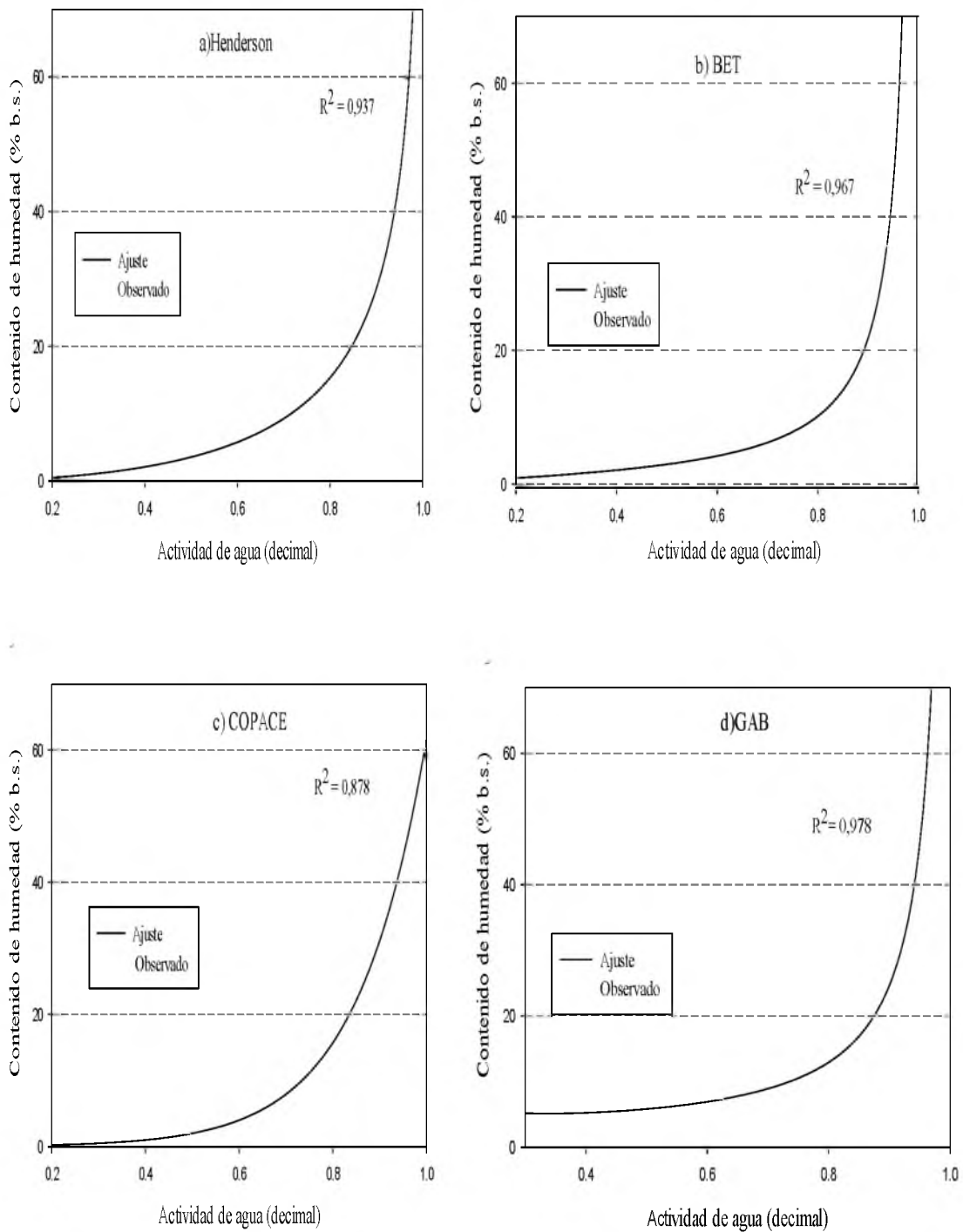


Figura 2.17. Ajuste de modelos de equilibrio higroscópico en semillas de papaya.

El cuadro 2.7 presenta los parámetros determinados para las isotermas de equilibrio en desorción de 25°C.

Cuadro 2.7. Parámetros de los modelos matemáticos de equilibrio.

Modelo	Xm	a	b	c	n	k	R ²	E.E
GAB	2,560	-	-	0,888	-	8,886	0,978	2,719
BET	2,319	-	-	5,60	-	-	0,967	3,006
Henderson	-	-	-1,990	-	0,576	-	0,937	4,274
Copace	-	3481,24	139,369	6,850	-	-	0,878	6,210

Xm, contenido de agua de la monocapa, a,b, c, n y k, son constantes de los modelos, R², coeficiente de determinación y E.E, error estándar.

Se desarrollo un nuevo modelo matemático para mejorar la aproximación con los valores obtenidos, mediante simulación matemática y estadística como se observa en la figura 2.18.

Se obtuvo un coeficiente de determinación de R² de 0,992, siendo este el mejor de los ajustes con respecto a los anteriormente descritos.

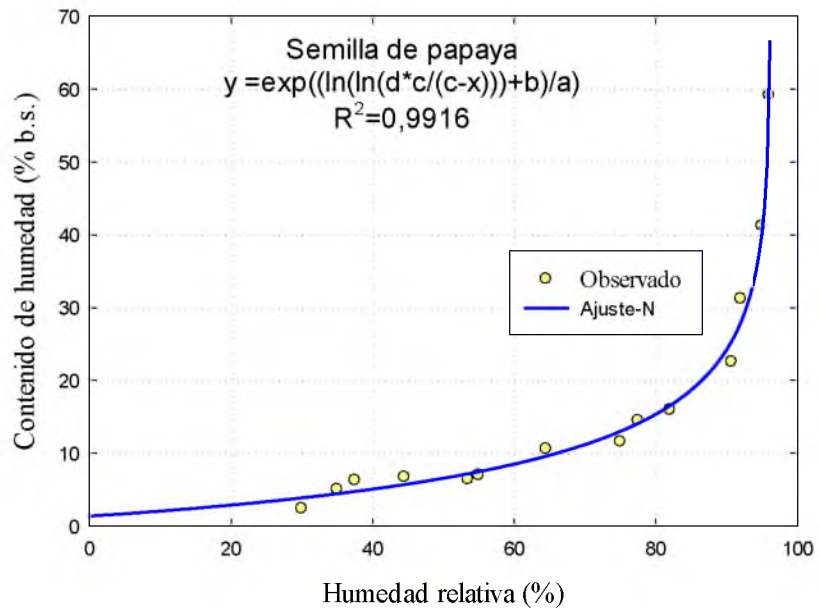


Figura 2.18. Nuevo modelo matemático de equilibrio para la semilla de papaya Pococi.

En el cuadro 2.8 se muestran los parámetros del modelo. Se determinó que presenta el error estándar más bajo de 1,628.

Cuadro 2.8. Parámetros del nuevo modelo de equilibrio

a	b	c	d	R ²	E.E
0,846	1,595	96,200	1,305	0,992	1,628

a, b, c, d contantes del modelo, R² coeficiente de determinación, E.E error estándar.

Según la relación de equilibrio higroscópico se puede separar en tres niveles el contenido de humedad de la semilla de papaya, lo cual influye significativamente en las condiciones de secado y almacenamiento. La humedad alta que comprende desde 260 hasta 60 % (b.s.), la humedad intermedia que se ubica entre 60 y 20 % (b.s.), y finalmente en humedad baja inferior al 20 % (b.s.).

El contenido de humedad de la semilla se puede disminuir hasta aproximadamente 20 % (b.s.), utilizando solamente aire a temperatura ambiente en flujo transversal. El almacenamiento seguro requiere contenido de humedad inferiores al 10 % (b.s.) para evitar el desarrollo de hongos y la germinación prematura. En este caso se requiere elevar la temperatura del aire y alcanzar una humedad relativa hasta al 60%.

2.4.3 Calidad Fisiológica

Las plántulas de papaya emergieron a los ocho días según literatura consultada con uso de ácido giberélico, mejorando la germinación [15, 50]. Se debe destacar que las semillas fueron sembradas después de un reposo menor a 18 horas y posterior al proceso de secado, por lo tanto estas no fueron almacenadas por un periodo de tiempo antes de sembrarlas como generalmente se realiza en otras investigaciones donde se analizan las condiciones de almacenamiento [15, 50].

En la figura 2.19 se muestra la relación entre el porcentaje de germinación y el tiempo en 32 días de observación. Se determinó que en las tres temperaturas estudiadas el tratamiento de secado a 30 °C es la que presentó mejor porcentaje de germinación con respecto a las temperaturas de 25 y 35 °C a la menor velocidad del aire de secado 0,75m/s. Se obtuvo que la repetición dos a 30°C presentó el mayor porcentaje de germinación del experimento con un valor de 81%.

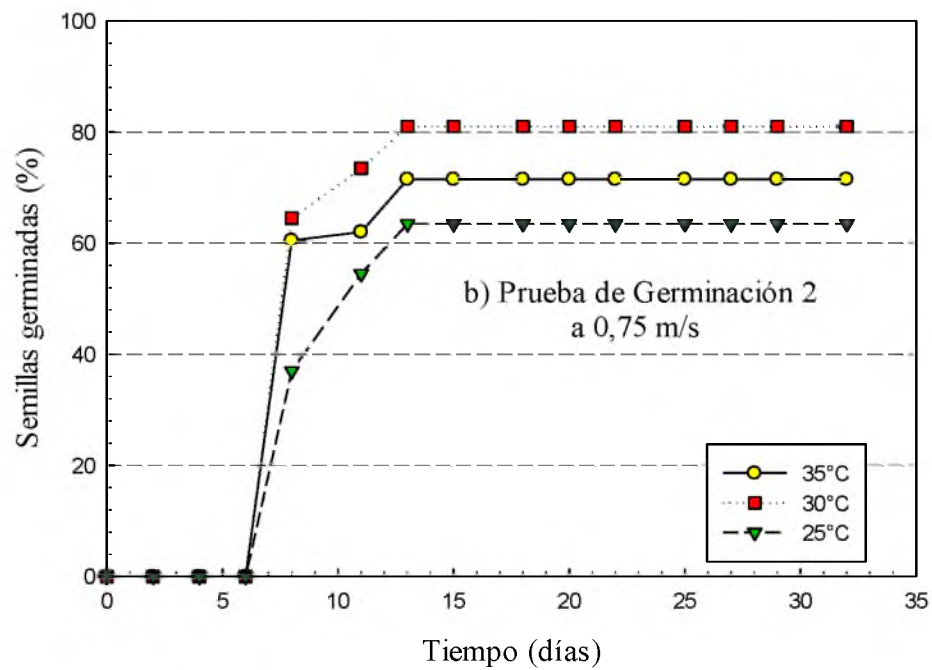
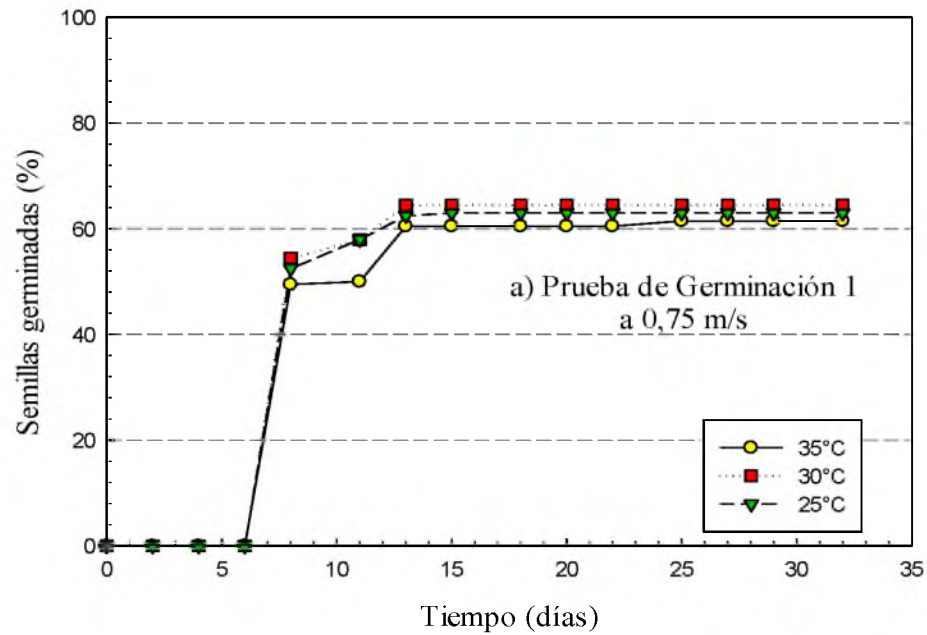


Figura 2.19 Efecto de la temperatura de secado en la germinación de las semillas de papaya con el tiempo para la velocidad de 0,75 m/s en los dos repeticiones, a) repetición 1 y b) Repetición 2.

Se recomendó la temperatura de 30°C puede realizarse en un sistema de secado optimizado con aire caliente, sin embargo por los resultados obtenidos en la repetición 1; no se descarta el uso de temperaturas menores o iguales a 35 °C, lo cual es característico de zonas calientes donde se produce el cultivo de papaya.

En el cuadro 2.9 se muestran los datos obtenidos en la germinación para las velocidades de 0,75, 1,5 y 3,0 m/s y las tres temperaturas. Se destaca que los porcentajes fueron muy similares en promedios de germinación dentro del rango de 58,5 a 67,5%. Además se determinó que la temperatura de 30°C en las dos velocidades y las dos repeticiones realizadas, obtienen mayor porcentaje de germinación en comparación con las otras dos temperaturas. En el anexo A se muestra los gráficos del porcentaje de germinación para estas dos velocidades.

Cuadro 2.9. Porcentaje de germinación obtenido a los 15 días en las tres temperaturas estudiadas.

Temperatura °C	Repetición	Velocidad m/s	Germinación %	Desviación estándar %
25	1	0,75	62,50	5,00
25	2	0,75	63,50	5,97
30	1	0,75	64,50	7,69
30	2	0,75	81,00	7,75
35	1	0,75	61,50	5,51
35	2	0,75	71,50	11,82
25	1	1,5	58,50	11,12
25	2	1,5	62,50	10,63
30	1	1,5	61,00	18,65
30	2	1,5	65,50	1,91
35	1	1,5	58,50	9,98
35	2	1,5	62,50	7,72
25	1	3,0	60,50	10,88
25	2	3,0	64,50	5,97
30	1	3,0	61,50	1,91
30	2	3,0	67,50	4,44
35	1	3,0	60,00	9,93
35	2	3,0	64,50	12,9

El porcentaje de germinación de las semillas a los 15 días fue entre 55 y 81%, fueron extraídas las plántulas donde se dio la germinación en todos los casos, como se observó en la figura 2.19 y anexo A. Las mediciones se continuaron hasta los 32 días de sembradas, para determinar nuevas plántulas germinadas pero en la mayoría de los tratamientos fue entre 1 y 2 plantas más. En la figura 2.20 se compara la germinación en 15 y 32 días por repetición, y se presentan las desviaciones estándar para cada barra, en las tres temperaturas a la velocidad de 0,75 m/s. Se determinó que 15 días fue suficiente para alcanzar la máxima germinación, en los días posteriores no representaron diferencias en el promedio de la germinación. Se observó este mismo resultado en las semillas secadas a mayores velocidades, de 1,5 y 3,0 m/s. (Anexo B).

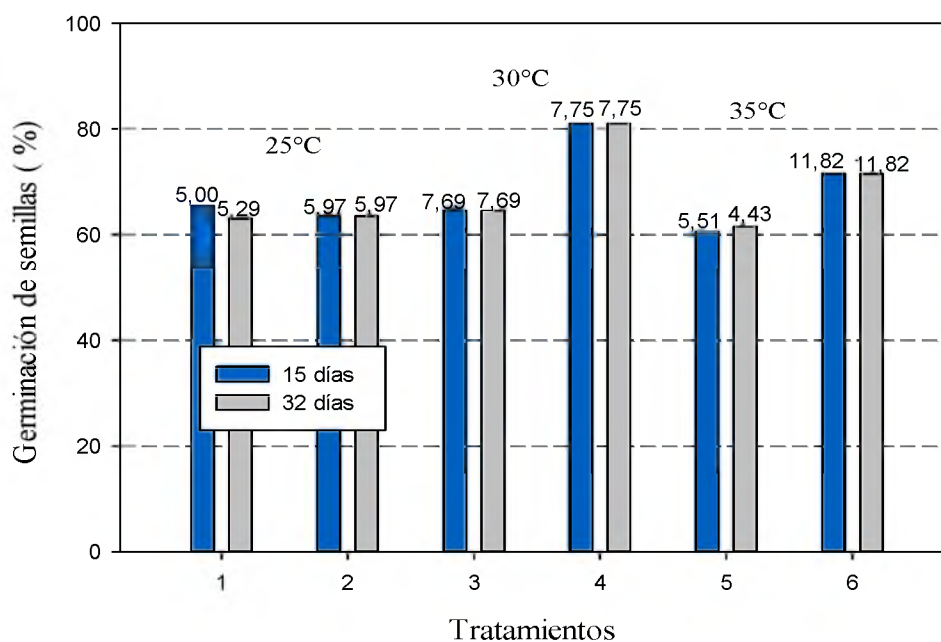


Figura 2.20 Comparación según el porcentaje de germinación entre los 15 y 32 días de observación en la velocidad de 0,75 m/s.

En el cuadro 2.10 se observa el promedio del porcentaje de germinación y su desviación estándar en 15 días de observación, se determinó que los mayores porcentajes de germinación se dan en la velocidad de 0,75 m/s, siendo la temperatura de 30°C la que tiene germinación más alta. Sin embargo se observó que las otras velocidades y temperaturas también fueron adecuadas con valores muy similares entre sí. La humedad de la semilla se puede remover a con baja velocidad del aire de secado, por lo que no se recomienda la inversión en ventiladores de mayor tamaño y sí en una forma efectiva de paso del aire a través de las semillas.

Cuadro 2.10. Porcentaje de germinación de las semillas de papaya según la temperatura y velocidad de secado de semilla.

Repetición	Temperatura	Velocidad		
	°C	0,75 m/s	1,5 m/s	3,0m/s
1	25	62,50±5,00	58,50±11,12	45,00±3,46
2	25	63,50 ± 5,97	62,50±10,63	64,50±5,97
1	30	64,50±7,69	61,00±18,65	56,60±5,26
2	30	81,00±7,75	65,50±1,91	61,50±3,42
1	35	60,50±5,51	57,00±9,59	59,00±10,52
2	35	71,50±11,82	62,50±7,72	52,00±5,89

Con la información del cuadro anterior se realizó el análisis de varianza que se muestra en el Anexo C.1, donde se comparo las repeticiones y temperaturas según las velocidades. Se determinó que no existen diferencias significativas ($p < 0,01$), por lo tanto no hay efecto de la velocidad sobre la germinación.

En el Anexo C.2, se muestra el análisis de varianza que se realizó para determinar si hay un efecto de temperatura en la germinación y si hay un efecto de la repetición sobre la germinación. Ambos valores de p son mayores a 0,01, por lo tanto no hay diferencias significativas y no hay efecto de la temperatura y la repetición en la germinación. Es decir se puede usar el aire a temperatura del ambiente de 25 a 35 °C para secar que no tiene efecto en la germinación en las semillas.

Capítulo 3. Conclusiones y recomendaciones

3.1 Conclusiones

1. El modelo matemático logarítmico representa adecuadamente el proceso de secado en la semilla de papaya. Sin embargo los modelos de Midilli, Henderson Pabis Modificado y Verma también pueden utilizarse para describir las cinéticas de secado.
2. El aumento de la temperatura genera un aumento en la rapidez del proceso reduciendo el tiempo de secado con un contenido de humedad de equilibrio de entre el 22 a 26%.
3. La velocidad del aire tiene influencia sobre la rapidez en el secado, a mayor velocidad menor el tiempo para llegar al contenido de humedad de equilibrio deseado.
4. En el proceso de secado en las semillas de papaya la temperatura de 30°C es la temperatura óptima para la germinación. Sin embargo las temperaturas de 25 y 35 °C también dan resultados satisfactorios.

5. El nuevo modelo matemático de equilibrio higroscópico ajusta adecuadamente la curva de desorción a 25 °C para la semilla de papaya híbrido Pococí.

6. Las condiciones de temperatura y velocidad del aire de secado no tuvieron efectos significativos en la calidad fisiológica de la semilla, lo cual fue óptimo para el porcentaje de germinación en el tiempo esperado.

3.2 Recomendaciones

1. Para la remoción del arilo es más conveniente realizar tres limpiezas por minuto en el procesador de alimentos, para que la semilla quede más limpia.
2. Realizar las pruebas de cinética de secado y la de calidad fisiológica de manera consecutiva, para optimizar la eficiencia del ácido giberélico como agente reactivo y acelerador de la germinación.
3. La variabilidad de la semilla depende de muchos factores que deben analizarse para cuantificar la variación en el porcentaje de germinación por lo tanto se recomienda realizar un control comercial.

Referencias

1. Teixeira J, Rashid Z, Tan D, Sivakumar D, Gera A, Teixeira M, Tennant P. *Papaya (Carica papaya L.) Biology and Biotechnology*. TFSB. 2007; 1(1): 47.
2. Zuchowski W. *A guide to tropical plants of Costa Rica*. Distribuidores Zona Tropical. Miami, Estados Unidos. 2005; 1(1): 529.
3. Romero J, Rangel J, Ramos M, Rodríguez R, Robles L. *Identificación y patogenicidad de Hongos en semilla de papaya (Carica papaya L.)*. Ciencias y Tecnol. Agrop Mexico.2013. 1(1); 12-19.
4. Sánchez L. *Efecto del secado de semillas de papaya (Carica Papaya L.) en la calidad a través del Tiempo*. [Tesis Licenciatura]. Coahuila, México. Universidad Autónoma Agraria De México, Antonio Narro; 2009.
5. Guzmán G. *Guía para el cultivo de la papaya (Carica papaya L.)*[Internet]. San José, Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Gandería.1998 [Consultado 20 abril 2018]. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/>.
6. Mora E, Bogantes A. *Evaluación de híbridos de papaya (Carica papaya) en Pococí, Limón, Costa Rica*. Agronomía Mesoamericana. 2004; 15(1): 39-44.
7. Elizondo A. *Análisis del mercado de papaya*. Servicio de información e inteligencia de mercados. Consejo Nacional de Producción.2012; 1(1): 1-8.
8. Mora S, Quirós Y. *Boletín estadístico agropecuario*. Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. 2018; 28(1): 42.
9. Bogantes A, Mora E. *Validación del rendimiento del híbrido de papaya "Pococí" (Carica papaya L.) en el Caribe de Costa Rica*. Alcances Tecnológicos.2006; 4(1): 53-57.
10. Villacencio M. *Extracción, concentración y cuantificación de la actividad enzimática de la papaína a partir de la papaya (Carica papaya)*. [Tesis Licenciatura]. Ambato, Ecuador .Universidad Técnica de Ambato.2011.
11. Aroucha M; Da Silva F, Balbinot E, Sousa G. *Qualidade fisiológica de semente de mamãoapós o armazenamento dos frutos e de sementes*. Revista Caatinga Brasil. 2007; 20(3): 136.

12. Magnitskiy S, Plaza G. *Physiology of recalcitrant seeds of tropical trees*. Revista Universidad Nacional de Colombia.2007; 25(1): 96-103.
13. Esquivel M, Ortíz Y, Ramos R,Oliva H, Capote M. (2011). *Dormancia en semillas de papaya cv Maradol roja durante el almacenamiento*. Agronomía Mesoamericana. 2011; 22(2): 351-357.
14. Berbert A, Carlesso O, Da Silva F. *Qualidade fisiológica de semente de mamãoem função da secagem do armazenamento*. Revista Brasileira de Semillas. 2008; 30(1): 23-25.
15. Ramírez S. *Condiciones para la germinación y el almacenamiento en semillas de papaya (Carica papaya L).*[Tesis Licenciatura]. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 2013.
16. Tokuhisa D, Fernandez D, Mantovani E, Hilst P, Demuner J. *Compostos fenólicos inibidores da germinacao em semestes de mamao (Carica papaya L.)*. Revista Brasileira de Sementes.2007; 29(3): 180-188.
17. Mocelin B, Oliveira D, Chielle D). *Medición matemática de la sequedad de capa de papaya en un secador de tunel, empleando un método de optimización de la temperatura de partícula*. Part.Sci.Technol.2014. 32(1); 123-130.
18. Zulhisyam A, Chuah T, Ahmad A, Azwanida N, Shazani S, Jamaludin M. *Effect of Storage Temperature And Seed Moisture Contents On Papaya (Carica papaya L.)*. Journal of Sustainability Science and ManagementT. 2013; 8(1): 87-92.
19. Bofa G, Farías A, Casiello F, Garetto O. *Secado Industrial de Granos de Origen agrícola: Estado de arte, herramientas de cálculo en la determinación de parámetros psicrométricos del aire del secado y aplicación de redes neuronales al control del proceso de secado.*. Buenos Aires, Argentina. Editorial Pontificia Universidad Católica de Argentina; 2012.
- 20.Rahman M. *Food Properties Handbook. Second edition*. Florida. USA: CRC Press Taylor & Francis Group. 2009.
21. Brooker D, Bakker F, Hall C. *Drying and Storage of grains and oilseeds*. AVI Publishing Company. 1992; 1(1): 450.

22. Vargas G. *Análisis del procesamiento de la nuez en concha de macadamia en región tropical húmeda de Costa Rica*. [Tesis Licenciatura]. San José Costa Rica. Universidad Costa Rica. 1999.
23. Jimenez R, Zeledón m, Alizaga R. *Moisture content/ relative humidity equilibrium of oil palm kernels produced in Costa Rica*. San José, Costa Rica. ASD. 1996; 10(1): 16-26.
24. Valverde R. *Desarrollo de las curvas de humedad de equilibrio para café pergamino y café oro coffe arábica de primera calidad de CR*. [Tesis Licenciatura]. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 1993.
25. Benavides F. *Relaciones de humedad de equilibrio para cultivares nacionales de Zea mays, Phaseolus vulgaris y Oryza Sativa*. [Tesis Licenciatura]. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 1996.
26. Kann,O; Singh, T. *Water transport in starchy foods: Experimental and mathematical aspect*. Illionis, USA. Food Science and Human Nutrition. 2018.
27. Vega A, Lemus R. *Modelado de la cinética de secado de la papaya chilena*. Revista Universidad de la Serena. 2006; 17(3): 23-31.
28. Ramírez M. *Determinación de Isotermas de Sorción en Harina a tres temperaturas y su ajuste a modelos matemáticos*. [Tesis Maestría]. DF, Mexico. Instituto Politécnico Nacional.2012.
29. Dominguez S, Dominguez A, Gonzalez A, Navarro S. *Cinética de imbibición e isotermas de adsorción de humedad de la semilla de jamaica*. Revista Mexicana de Ingeniería Química. 2007; 6(3): 309-316.
30. Martinello M. *Modelado del secado en granos en lecho fijo a bajas temperaturas de aire*. [Tesis doctorado]. Buenos Aires, Argentina. Universidad Nacional de la Plata. 2015.
31. Page G. *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. [Tesis Maestría], Indiana, USA. Purdue University.1949.
32. Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. *A new model for single layer drying of some vegetables*. Drying Technology. 2002; 20(1): 1503–1513.
33. Henderson M, Pabis S. *Grain Drying Theory II. Temperature effects on drying coefficients*. Journal of Agricultural. 1961; 44(1): 1111-1122.

34. Ertckin C, Yaldiz O. *Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model*. Journal of food Engineering. 2004; 63(1):349-359.
35. Verma L, Bucking R. *Effects of drying air parameters on rice drying models*. Trans. ASAE. 1985; 28(1): 296-301.
36. Hii C, Law C, Cloke M. *Modeling used a new thin layer drying model and product quality of cocoa*. Journal Food Engineering. 2009; 90(1):191-198.
37. Bruce D. *Exposed- layer barley drying, three models fitted to new data up to 150°C*. Journal of Agricultural Engineering. 1985; 32(1):337-347.
38. Togrul I, Pehlivan D. *Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers*. Journal of Food Engineering. 2002; 55(1): 209-216.
39. Henderson M. *Progress in developing the thin layer drying equation*. Trans. ASAE. 1974; 17(1):1167-1168.
40. Barrozo M.(1995). *Heat and mass transfer between air and in soybean seed in a sliding and cross flow bed*. PPG-EQ/UFSCar. 1995; 1(1): 1163-1178.
41. Puente L, Echegaray E, Castro E,Scala K. *Aplicación de modelos matemáticos al proceso de secado asistido por infrarrojos de descartes de limón*. DYNA.2012; 80(181):91-97.
42. Suarez L, Fainette A. *Modelado de secado en capa fina y del presecado al sol a diferentes alturas de capas de la Lemna oscura del lago de Maracaibo*. [Tesis Licenciatura]. Maracaibo, Venezuela. Universidad Rafael Urieta. 2013.
43. Qing A, Song Y. *Mathematical modeling of debittered apricot kernels during thin-layer drying*. Journal Food of China. 2016; 14(1): 509-5017.
44. Salazar D. *Establecimiento de la escala de madurez y potencial de vida útil durante el almacenamiento de la papaya (Carica papaya L.) híbrido Pococí*. [Tesis Licenciatura]. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 2012.
45. Zogzas N, Maroulis Z, Marinous-Kouris D. *Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs*. Dry Technol. 1996; 14(10): 2225-2253.

46. Padoin D, Assumpcao D, Meili L, Horomitsu E, Luiz G. *Convective drying of papaya seeds (Carica papaya L.) and optimization of oil extration*. ELSEVIER. 2016; 86(2016):221-228.
47. Udomkun P, Argyropoulos D, Nagle M, Mahayothee B, Janjai S, Muller J. *Single layer drying Kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow*. ELSEVIER. 2015; 64(2015): 67-73.
48. Montes J, Torres R, Andrade R, Pérez O, Marimon J, Meza I. *Modelado de la cinética de secado ñame en capa delgada*. Revista de Ingeniería e Investigación. 2008; 28(2): 45-52
49. Salcedo J, Mercado J, Vanegas M, Fernandez A, Vertel M. *Cinética de secado de la yucca variedad corpoica M-tai en funcion de la temperature y la velocidad de aire*. Revista ION. 2014; 27(2): 29-42.
50. Salvador M, Adriano M, Becerra C. *Efecto del remojo en agua sobre germinación en las semillas de papaya variedad Maradol*. Revista Chapingo. 2005; 11(1): 27-30.
51. Montes E, Torres R, Andrade A, Perez O, Marimon J, Meza I. *Modelado de las Isotermas de desorción del name (Discorea Rotundata)*. Dyna. 2009; 76(1):145-152.
52. Baptestini F, Correa P, Vanegas J, Leite R, Botelho F, Campos R. *Water sorption kinetics of damaged beans: GAB model*. Agriambi.2017; 21(8):550-555.
53. Gómez I, Murillo D, Vargas R, Vargas G. *Efecto de la temperatura en la cinética de secado de semillas de papaya sin mucilago*. CLIA 2018.
54. Reccio L. *Aireación bajo condiciones ambientales de alta humedad relative y baja temperatura para la conservación del maíz Amarillo almacenado*. [Tesis Licenciatura]. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 1999.

Anexos

Anexo A. Porcentajes de germinación en las tres temperaturas según velocidades de secado.

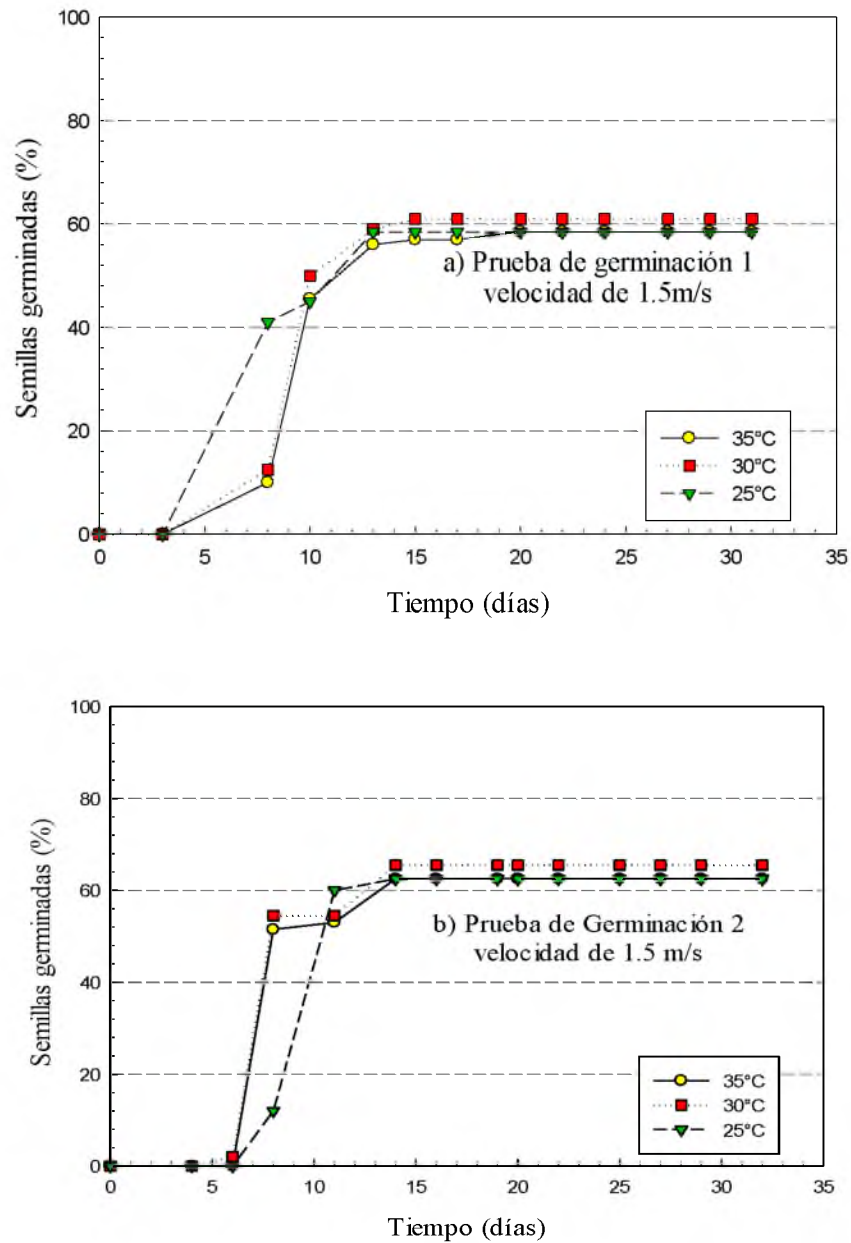


Figura A.1 Relación del porcentaje de germinación de las semillas de papaya con el tiempo para la velocidad de 1,5 m/s en las dos repeticiones. a) Repetición 1, b) Repetición 2.

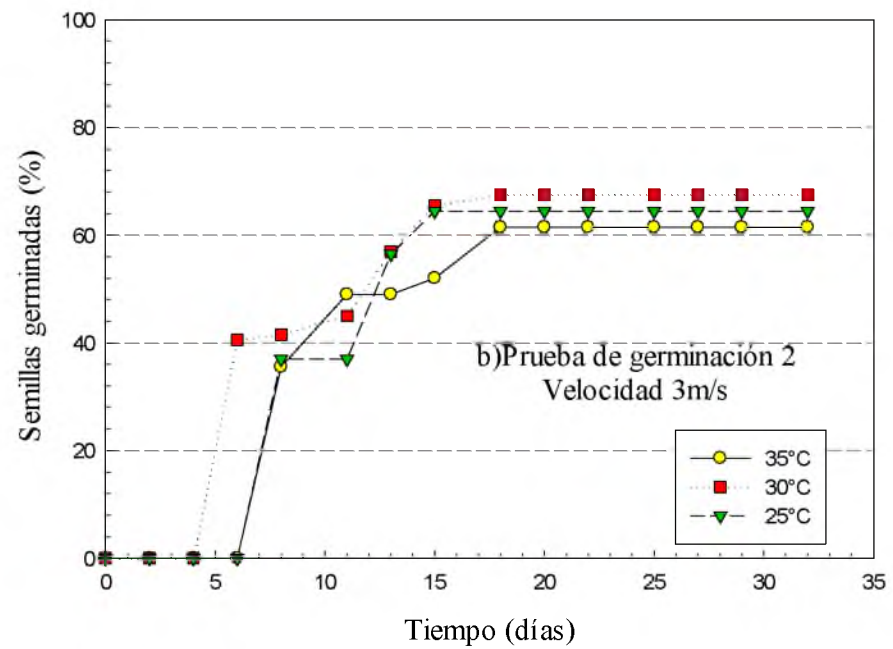
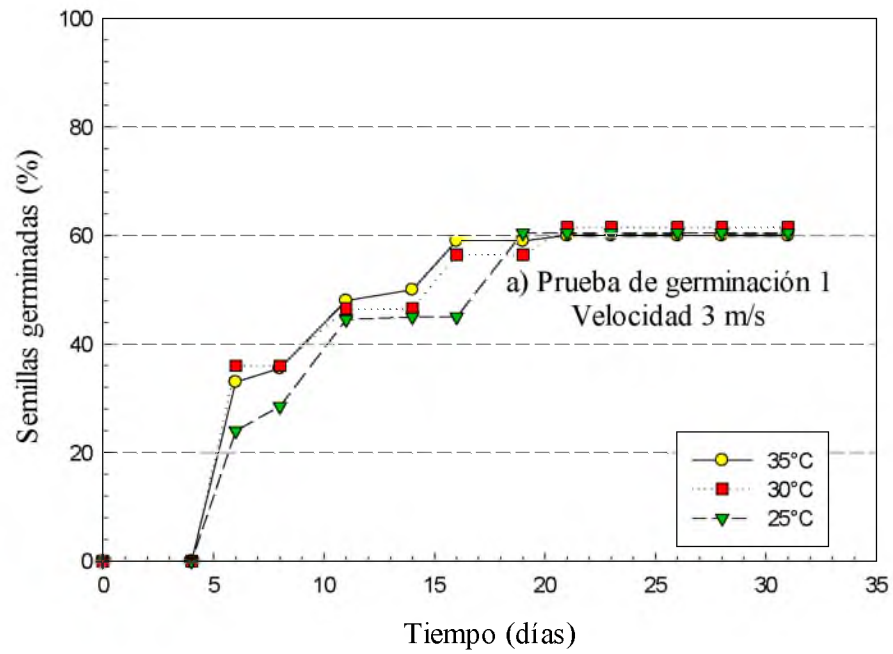


Figura A.2 Relación del porcentaje de germinación de las semillas de papaya con el tiempo para la velocidad de 3 m/s en las dos repeticiones. a) Repetición 1, b) Repetición 2.

Anexo B. Comparaciones del porcentaje de germinación según el tiempo de observación.

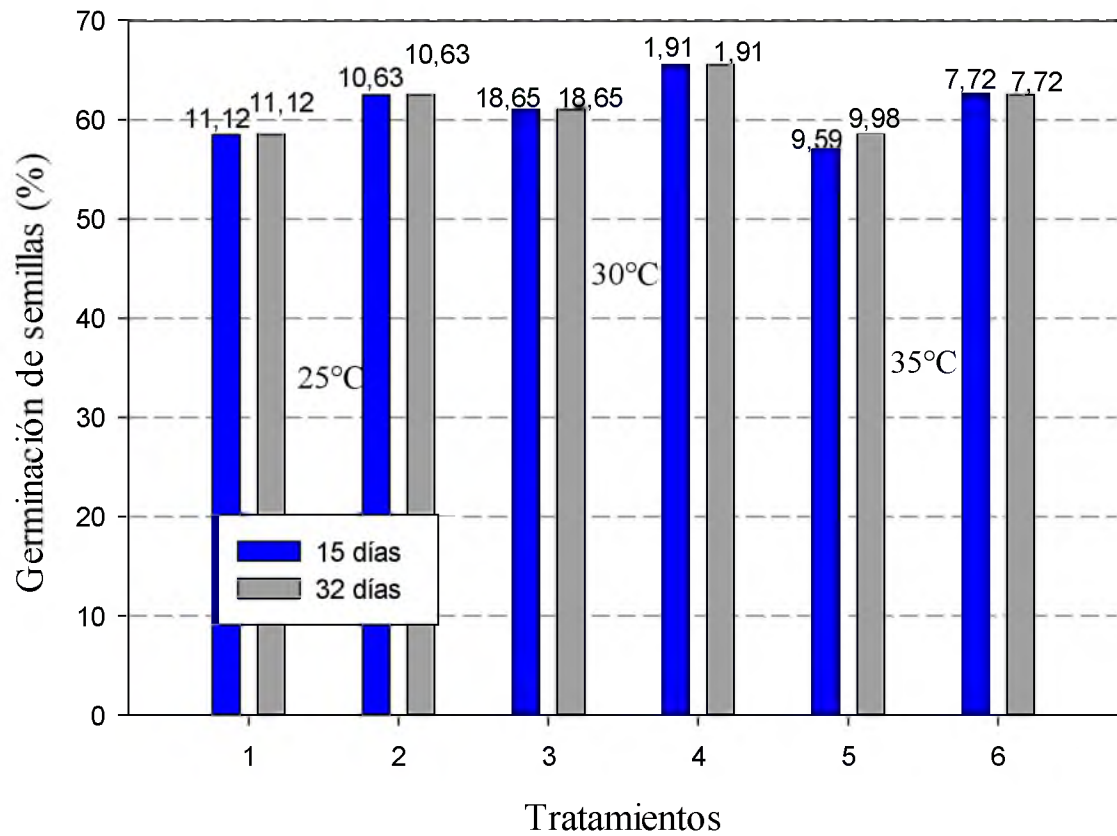


Figura B.1 Comparación según el porcentaje de germinación entre los 15 y 32 días de observación en la velocidad de 1,5 m/s.

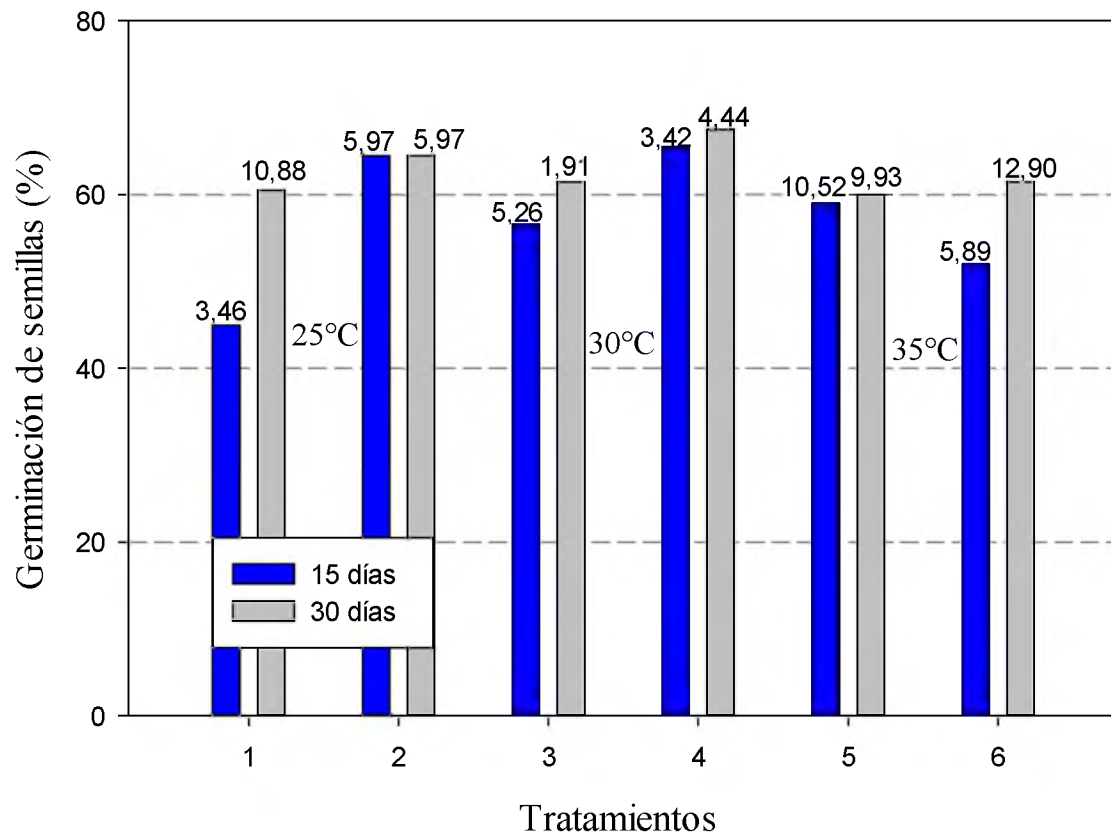


Figura B.2 Comparación según el porcentaje de germinación entre los 15 y 32 días de observación en la velocidad de 3,0 m/s.

Anexo C. Análisis de Varianza para determinar diferencias significativas en la prueba de calidad fisiológica.

Anexo C.1 Análisis de la varianza según la velocidad.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Velocidad	18	0.82	0.00	56.24

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	12.84	14	0.92	0.95	0.6011
Germinación	12.84	14	0.92	0.95	0.6011
Error	2.91	3	0.97		
Total	15.75	17			

Anexo C.2. Análisis de la varianza según la temperatura y repetición.

Análisis de la varianza

Temperatura

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Temperatura	18	0.74	0.00	17.12

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	220.83	14	15.77	0.60	0.7818
Germinación	220.83	14	15.77	0.60	0.7818
Error	79.17	3	26.39		
Total	300.00	17			

Repetición

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
repeticion	18	0.74	0.00	41.57

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3.33	14	0.24	0.61	0.7733
Germinación	3.33	14	0.24	0.61	0.7733
Error	1.17	3	0.39		
Total	4.50	17			