



TESIS
**“SECADO CONVECTIVO CON ATMOSFERA
MODIFICADA DE BANANO (*Musa AAA Cavendish*).”**

QUE PRESENTA:

ING. JUAN MANUEL HERNÁNDEZ CÁRDENAS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ISAAC ANDRADE GONZÁLEZ

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DRA. VANIA SBEYDE FARÍAS CERVANTES

REVISORES DE TESIS:

DR. ARTURO MOISES CHÁVEZ RODRÍGUEZ

DRA. MAYRA ITZCALOTZIN MONTERO CORTES

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA

TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO. MAYO, 2018.



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Tlajomulco

**DIRECCIÓN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**
Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, **30/Abril/2018**

No. DE OFICIO: DEPI/120/2018

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

**ING. JUAN MANUEL HERNÁNDEZ CÁRDENAS
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRÍA
PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**SECADO CONVECTIVO CON ATMÓSFERA MODIFICADA DE BANANO (*Musa AAA Cavendish*)**", ha informado a esta División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI), que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
Educando para la Sociedad Actual y el Futuro*




**DR. ISAAC ANDRADE GONZÁLEZ
JEFE DE LA DEPI**

S.E.P.
TECNM
14DIT0003B
IT TLAJOMULCO
DIV. DE ESTUDIOS
DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

C.c.p. L.I. Andrea Torres Rico.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

IAG/mjvs.



Km. 10 Carretera a San Miguel Cuyutlán – Mpio. Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco
C.P. 45640, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. Tels. Conmut. (33) 3772-4426 ó 27 Ext. 7024
e-mail. depi_tlajomulco@tecnm.mx www.ittlajomulco.edu.mx



AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a **DIOS** por permitirme culminar este proyecto y un ciclo profesional más en mi vida.

A mi director de tesis, Dr. Isaac Andrade González, por darme la oportunidad de realizar este proyecto, brindarme su apoyo, continuas enseñanzas, amistad y sobre todo bastante paciencia.

A la Dra. Vania sveide Farías Cervantes, por su valiosa contribución y conocimientos brindados, ya que fueron de suma importancia para el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Arturo Moisés Chávez Rodríguez y Dra. Mayra Itzcalotzin Montero Cortes, por su apoyo, amistad y enseñanzas brindadas en esta etapa profesional.

Compañeros y amigos del ITTJ especialmente al M.C Eduardo Figueroa, Ing. Genaro Meza, Ing. Rolando Bernabé, Ing. Salvador Romero, Ing. Franco Alegría, Ing. Nicolás Medina por su apoyo y amistad incondicional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por su valiosa contribución económica para el desarrollo del proyecto.

Finalmente a mi familia que es mi motor para seguir adelante. Angélica (esposa) gracias por todos tus regaños y sobre todo por caminar a mi lado.

RESUMEN

El secado convectivo es uno de los procesos de deshidratado más popular. Sin embargo, durante este proceso el principal problema que existe es la pérdida de algunos nutrientes y deterioro de la calidad sensorial (color, sabor, textura) en el alimento, el deterioro del color (pardeamiento enzimático) es causado por efecto del O_2 en la enzima Polifenol-Oxidasa. Por lo cual, el objetivo de este trabajo fue: Generar un proceso de deshidratado eficiente para evitar el oscurecimiento por oxidación del banano. El trabajo se realizó en un secador de charolas con una capacidad por lote de 20 kg, el banano que se utilizó fue de la variedad: *Musa AAA. Subgrupo Cavendish.*, se realizaron las cinéticas de secado para dos grosores de banano (3mm y 5mm), en tres diferentes temperaturas (60°C, 70°C y 80°C), esto para determinar el tiempo óptimo de secado para cada tratamiento. Los tratamientos realizados fueron los siguientes: 3mm 60°C, 3mm 70°C, 3mm 80°C, 5mm 60°C, 5mm 70°C, 5mm 80°C, deshidratándose de forma normal (de una forma tradicional). Posteriormente a estos mismos tratamientos se le aplicaron N_2 en dos vertientes: 1.- Inyección de N_2 al aire en la parte superior donde se encuentra el ventilador y las resistencias, 2.- inyección N_2 de forma localizada (directo a la muestra a deshidratar), obteniendo un total de 18 experimentos deshidratados. Las variables evaluadas fueron sus propiedades fisicoquímicas (porcentaje de humedad, actividad de agua, color y polifenoles totales), antes y después de deshidratar de cada tratamiento. El estudio mostró que la inyección de gas N_2 no influye en el contenido de actividad de agua (A_w) y porcentaje de humedad final de los tratamientos, ya que no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), obteniendo valores entre el 6-7 % de humedad y de A_w en un rango de 0.39 a 0.42. En el color final de cada tratamiento se mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$), resultando como el mejor tratamiento el de 3mm 70°C, el cual es el que tiene la menor diferencia de color total $\Delta E = 11.32$.

SUMMARY

Convective drying is one of the most popular dehydration processes. However, during this process the main problem that exists is the loss of some nutrients and deterioration of the sensory quality (color, taste, texture) in the food. Color deterioration (enzymatic browning) is caused by the effect of O₂ on the polyphenol-oxidase enzyme. Therefore, the objective of this work was: Generate an efficient dehydration process to avoid darkening by oxidation of banana. The work was carried out in a tray dryer with a capacity per batch of 20 kg. The banana that was used was of the variety: *Musa AAA. Cavendish Subgroup* the drying kinetics was performed for two banana thicknesses (3mm and 5mm), in three different temperatures (60 °C, 70 °C and 80 °C), this to determine the optimal drying time for each treatment. The treatments performed were the following: 3mm 60°C, 3mm 70°C, 3mm 80°C, 5mm 60°C, 5mm 70°C, 5mm 80°C, dehydrating in a normal way (in a traditional way). After these same treatments N₂ was applied in two aspects: 1. - Injection of N₂ into the air in the upper part where the fan and the resistors are located, 2. - N₂ injection in a localized way (direct to the sample to be dehydrated), getting a total of 18 dehydrated experiments. The variables evaluated were its physicochemical properties (percent moisture, water activity, color and total polyphenols), before and after dehydrating each treatment. The study showed that the injection of N₂ gas does not influence the content of water activity (A_w) and percent moisture final of the treatments, since they did not present statistically significant difference (p <0.05), obtaining values between 6-7% moisture and A_w in a range of 0.39 to 0.42. In the final color of each treatment there were significant differences (p <0.05), resulting as the best treatment the 3mm 70 °C, which is the one with the smallest difference in total color $\Delta E = 11.32$.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES	2
2.1 Deshidratación de alimentos.....	3
2.2 Clasificación de métodos de deshidratación de alimentos	5
2.2.1 Deshidratación por conducción	6
2.2.2 Deshidratación por radiación	6
2.2.3 Deshidratación por congelación	7
2.2.4 Deshidratación por aire o por convección.	7
2.3 Atmosferas modificadas.	12
2.4 Atributos fisicoquímicos de calidad.....	13
2.4.1 Contenido de humedad y actividad de agua de los alimentos.....	13
2.4.2 Color	13
2.4.3 Polifenoles Totales.....	16
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. OBJETIVOS	17
4.1 Objetivo general.....	17
4.2 Objetivos específicos	17
5. HIPÓTESIS	17
6. MATERIALES Y MÉTODOS	18
6.1 Material biológico	18
6.2 Preparación de la muestra	19
6.3 Perfil de temperatura.....	20
6.4 Cinéticas de secado	20
6.5 Secado Convectivo.....	20
6.6 Contenido de humedad y actividad de agua	21
6.7 Color.....	22
6.8 Cuantificación de fenólicos totales.....	22
6.9 Análisis estadístico	24

7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
7.1	Perfil de temperatura.....	25
7.2	Cinéticas de secado	25
7.3	Contenido de humedad y actividad de agua	28
7.4	Color.....	35
7.5	Contenido de polifenoles totales.	39
8.	CONCLUSIONES.....	43
9.	ANEXOS	49
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 Esquema de un deshidratador de charolas con flujo de aire paralelo al producto.	9
Figura 2 Esquema de un deshidratador de banda.	10
Figura 3 Esquema de un deshidratador de túnel con aire paralelo al producto a contracorriente.	11
Figura 4 Composición de la atmosfera.....	12
Figura 5 Esquema del sistema L*, a*, b*.....	14
Figura 6 Secador de charolas, marca POLINOX con una capacidad por lote de 20 Kg.	18
Figura 7 Cambios de color en la cascara en las diferentes etapas de maduración del banano.....	19
Figura 8 Preparación de la muestra.	19
Figura 9 Balanza de humedad, Medidor de actividad de agua.	22
Figura 10 Colorímetro X-rite.	22
Figura 11 Medición de la temperatura dentro de la cámara de secado.....	25
Figura 12 Cinética de secado para un grosor de 3mm.....	26
Figura 13 Cinética de secado para un grosor de 5mm.....	26
Figura 14 Tiempos de secado para cada tratamiento.....	27
Figura 15 ANOVA 3mm 70 °C.	29
Figura 16 ANOVA 3mm 60 °C.	29
Figura 17 ANOVA 3mm 80 °C.	30
Figura 18 ANOVA 5mm 60 °C.	30
Figura 19 ANOVA 5mm 80 °C.	31
Figura 20 ANOVA 5mm 70 °C.	31
Figura 21 ANOVA de Aw, 3mm 60 °C.	32
Figura 22 ANOVA de Aw, 3mm 70 °C.	33
Figura 23 ANOVA de Aw, 3mm 80 °C.	33
Figura 24 ANOVA de Aw, 5mm 60 °C.	34
Figura 25 ANOVA de Aw, 5mm 70 °C.	34
Figura 26 ANOVA de Aw, 5mm 80 °C.	35
Figura 27 Diferencia de color total (ΔE).	37
Figura 28 Diferencia de color total (ΔE) del experimento 14.....	38
Figura 29 Diferencia de color total (ΔE) del experimento 4.....	38
Figura 30 ANOVA mg EAG/gr, 3mm 60°C.....	40
Figura 31 ANOVA mg EAG/gr, 3mm 70°C.....	40
Figura 32 ANOVA mg EAG/gr, 3mm 80°C.....	41
Figura 33 ANOVA mg EAG/gr, 5mm 60°C.....	41
Figura 34 ANOVA mg EAG/gr, 5mm 70°C.....	42
Figura 35 ANOVA mg EAG/gr, 5mm 80°C.....	42
Figura 36 ANOVA mg EAG/gr, CONTROL.....	43
Figura 37 Test de tukey, CONTROL.	44
Figura 38 ANOVA mg EAG/gr, GAS N2 GENERAL.	44
Figura 39 Test de tukey, GAS N2 GENERAL.	45
Figura 40 ANOVA mg EAG/gr, GAS N2 LOCALIZADO.....	45

Figura 41 Test de tukey, GAS N2 LOCALIZADO. 46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores típicos de contenido de humedad y actividad de agua (A_w) de los alimentos, tanto en su forma original como bajo diversas formas de conservación. 4

Tabla 2 Clasificación de los métodos de deshidratación más utilizados para alimentos. 6

Tabla 3 Diseño Experimental. 20

Tabla 4 % contenido de humedad. 28

Tabla 5 Contenido de actividad de agua (A_w). 32

Tabla 6 Valores de color L^* , a^* , b^* 36

Tabla 7 Diferencia de color total (ΔE). 36

Tabla 8 Contenido de Polifenoles totales (EAG) de los tratamientos. 39

ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
ANOVA	Análisis de varianza
AOAC	Asociación de los químicos analíticos oficiales
A_w	Actividad de agua
°Bx	Contenido de sólidos solubles
ABS	Absorbancia
EAG	Equivalente de ácido gálico.
g	Gramos
nm	Nanómetros
µL	Microlitros
mm	Milímetros
N₂	Gas nitrógeno
O₂	Oxígeno
µmol	Micromol
y col.,	y colaboradores
°C	Grados centígrados
%	Porcentaje
ΔE	Diferencia de color total

1. INTRODUCCIÓN

El secado convectivo se puede definir como una operación en la cual se elimina el agua de un producto sólido o líquido por la acción del calor mediante una corriente de aire caliente la cual pasa a través del producto de tal manera que transfiera calor y elimine agua (Brennan, 2011; Morales-Delgado y *col.* 2014). Este tipo de secado se utiliza principalmente para la deshidratación de alimentos sólidos ya sean enteros, en trozos, rebanadas, segmentos (Colina Irezabal, 2014). Durante el proceso de secado el principal problema que existe es un deterioro de las propiedades sensoriales (color, sabor, textura), cambios en la composición química y la degradación de los componentes bioactivos en el producto seco (Woodroof *et al.*, 1986).

El desarrollo de nuevas y mejores tecnologías para deshidratar alimentos, que implica el control tanto de las características del alimento antes, durante y después de la deshidratación, como de la selección de los procesos y de las variables de operación de los mismos, son fundamentales para obtener productos con la calidad requerida (Colina Irezabal, 2014). Por tal motivo en este trabajo se plantea como objetivo generar un proceso de deshidratado eficiente para evitar el oscurecimiento por oxidación del banano y otros frutos. El cual se pretende lograr modificando la atmosfera del secador, en donde se requerirá una atmósfera con ambientes ricos en gas N_2 y pobres en O_2 , los cuales reducen el proceso de respiración en los productos, conservando sus características fisicoquímicas, sensoriales por un mayor tiempo (Ospina M. & Cartagena V., 2008).

2. ANTECEDENTES

La conservación de alimentos es importante para proveer alimentos sanos y de buena calidad a la población, por lo que utilizar diferentes métodos de conservación permite aprovechar al máximo, las cosechas de frutas y hortalizas, que de no procesarse alcanzarían niveles altos de pérdidas en campo mayores al 50% (Chacón, 2006).

A continuación, se mencionan algunos métodos de conservación aplicados en alimentos:

Métodos de conservación por acción corta:

- Refrigeración
- Atmosfera modifica
- Tratamientos químicos superficiales
- Tratamientos especiales de almacenaje y embalaje

Métodos de conservación por acción química:

- Preservación con azúcar
- Preservación con sal
- Conservación por fermentación
- Regulación de acidez, pH
- Uso de aditivos químicos

Métodos de conservación por tratamientos físicos:

- Uso de altas temperaturas, tratamiento térmico
- Uso de bajas temperaturas, congelamiento
- Deshidratación y concentración
- Uso de radiaciones ionizantes

2.1 Deshidratación de alimentos.

La deshidratación de alimentos es sin duda uno de los métodos más utilizados actualmente en la industria procesadora de alimentos. Los alimentos deshidratados se producen tanto con fines de conservación, como para obtener productos novedosos, fáciles de preparar, transportar, almacenar y consumir que le proporcionen al consumidor una amplia gama de posibilidades para lograr comodidad y una dieta más variada.

La deshidratación es el proceso en el cual se remueve casi la totalidad del agua de un producto, dando como resultado un producto sólido con un contenido de humedad significativamente bajo.

El desarrollo de los deshidratadores artificiales, desde principios de 1900 reemplazó al secado solar. El establecimiento de industrias con producción de alimentos deshidratados a gran escala trajo consigo no solo la necesidad de desarrollar nuevos y mejores sistemas de deshidratación de alimentos, sino del desarrollo paralelo de procesos de formulación y manufactura, así como el empleo de diversas técnicas y materiales para su envasado.

Existe gran diversidad de productos deshidratados, así como sus presentaciones a nivel comercial. Aunque las razones para deshidratar alimentos son tan diversas como la cantidad de productos por deshidratar y la diversidad de métodos de deshidratación, en una alta proporción de alimentos, el objetivo primordial de la deshidratación es conservarlos. Al reducir el contenido de humedad de un producto se reduce su actividad de agua (a_w), lo cual trae como consecuencia que se inhiba, o al menos disminuya, el desarrollo de microorganismos y la velocidad de las reacciones químicas y enzimáticas. En la tabla 1, muestra algunos valores típicos de contenido de humedad y actividad de agua de los alimentos, tanto en su forma original como bajo diversas formas de conservación.

Tabla 1 Valores típicos de contenido de humedad y actividad de agua (A_w) de los alimentos, tanto en su forma original como bajo diversas formas de conservación.

Alimento	Contenido de humedad (%)	A_w
Forma original	60-95	0.85-0.97
Concentrado	25-60	0.60-0.80
Deshidratado	1-15	0.10-0.30
Congelado	60-95	0.10-0.30

Además de la conservación del alimento, al reducir el contenido de agua hay otras ventajas en los alimentos deshidratados, entre las que pueden mencionarse:

- Vida útil muy prolongada (12-24 meses), sin la necesidad de aditivos.
- Almacenamiento a temperatura ambiente.
- Reducción del peso y, en ocasiones, del volumen del producto, lo que facilita y reduce costos del empaque, almacenamiento y transporte.
- Comodidad en el uso del producto (leche en polvo, café soluble, puré de papa instantáneo).
- Menor producción de residuos.

Sin embargo, los alimentos deshidratados también pueden presentar ciertas desventajas, como son:

- En algunos casos, dificultad para una completa rehidratación (depende del método y condiciones de la deshidratación).
- Modificación de la textura en alimentos sólidos.
- Modificación de sabor, olor y color en algunos productos.
- Algunos métodos de deshidratación (como la liofilización) tienen un costo relativamente elevado.

Es importante tener en cuenta que el proceso de deshidratación de un alimento no solo afecta el contenido de agua del producto, sino que también sus

características físicas y químicas, tomando en cuenta que los alimentos son sistemas biológicos muy complejos, tanto en composición química, por la gran cantidad de componentes presentes, como en su estructura, por tratarse de tejidos celulares compartimentalizados. Durante la deshidratación, puede haber pérdida de algunos nutrientes y deterioro de la calidad sensorial del alimento, por lo que debe buscarse que el producto deshidratado conserve lo más posible sus propiedades originales. (Colina Irezabal, 2014).

2.2 Clasificación de métodos de deshidratación de alimentos

Existen muchas clasificaciones de los métodos y equipos de deshidratación de alimentos, ya que pueden clasificarse de acuerdo con diferentes criterios, entre los que pueden mencionarse:

- El modo de transmisión de calor:
 - Deshidratación por convección (por aire).
 - Deshidratación por conducción.
 - Deshidratación por radiación.
 - Deshidratación por congelación (liofilización).
- La presión del proceso:
 - Deshidratación atmosférica.
 - Deshidratación al vacío.
- El tipo de producto por deshidratar:
 - Deshidratación de sólidos.
 - Deshidratación de fluidos de baja viscosidad.
 - Deshidratación de fluidos de alta viscosidad (pastas).
 - Deshidratación de fluidos con sólidos de gran tamaño en suspensión.

En la tabla 2, se presenta una clasificación de los métodos de deshidratación con base en el modo en el que transfiere el calor, así como algunos de los equipos de deshidratación más comunes y ejemplos de los alimentos que por lo general se deshidratan en ellos.

Tabla 2 Clasificación de los métodos de deshidratación más utilizados para alimentos.

Método de deshidratación	Equipos de deshidratación	Tipo de producto por deshidratar
Por aire (Convección) <div style="margin-left: 40px;"> <pre> graph TD A[Por aire (Convección)] --> B[En cama o banda] A --> C[De partículas] </pre> </div>	Deshidratador de charolas Deshidratador de banda Deshidratador de túnel Deshidratador por aspersion Deshidratador por espuma Deshidratador de lecho fluidizado	Sólidos (piezas, trazos), fluidos con sólidos de tamaño grande en suspensión y, en menor proporción, fluidos viscosos. Fluidos con pequeños sólidos en suspensión Fluidos con pocos sólidos en suspensión Sólidos de pequeño tamaño
Por conducción	Deshidratador de tambor	Fluidos muy viscosos (pastas)
Por radiación	Deshidratador por infrarrojo Deshidratador dieléctrico Deshidratador por microondas	Cualquier tipo de alimento
Por congelación	Liofilizador	Sólidos de tamaño pequeño y suspensiones

2.2.1 Deshidratación por conducción

Como su nombre lo indica, el calentamiento del producto se lleva a cabo por conducción a través del contacto del producto con una superficie caliente. En este caso, la temperatura de la superficie del producto expuesta a la fuente de calentamiento, se incrementa constantemente durante la deshidratación, aproximándose a la temperatura de calentamiento. Normalmente, el agua evaporada es removida por el aire circundante al producto.

2.2.2 Deshidratación por radiación

En estos sistemas, el calentamiento del producto se efectúa mediante energía radiante (infrarroja, dieléctrica o microondas). Al igual que en la deshidratación por conducción, el aire circundante arrastra el vapor del producto.

2.2.3 Deshidratación por congelación

Llamada también liofilización. En este caso, el producto se congela y somete a un vacío riguroso, lo que conduce a la sublimación del agua del producto. El agua se remueve a través del vacío.

2.2.4 Deshidratación por aire o por convección.

En este proceso, el calor requerido para evaporar el agua del producto es suministrado por aire caliente en contacto directo con el material que se va a deshidratar, efectuándose una transferencia de calor por convección.

Cuando la deshidratación por aire se efectúa a presión atmosférica, el mismo aire caliente es el que arrastra la humedad del producto. En este caso, inicialmente el producto en contacto con el aire caliente incrementará su temperatura superficial, pero en el momento en que la humedad del producto empieza a ser evaporada, su superficie sufre un enfriamiento hasta la temperatura de saturación adiabática del aire y esta temperatura se mantiene constante hasta que se ha eliminado el agua libre del producto. A su vez, los procesos de deshidratación por aire pueden clasificarse en: **Deshidratación de partículas, Deshidratación en cama o banda.** (Colina Irezabal, 2014).

➤ **Deshidratación de partículas**

Se lleva a cabo cuando el producto que se va a deshidratar, ya sea sólido o líquido, se encuentra dividido en finas partículas y el aire se mueve a través de ellas. Debido al pequeño tamaño de las partículas es fácil eliminar la humedad, por lo que el proceso está regido por la resistencia a la transferencia de calor que presenta el producto.

➤ **Deshidratación en cama o banda**

La deshidratación por aire en cama o banda se utiliza principalmente para la deshidratación de alimentos sólidos ya sean enteros, en trozos rebanadas, segmentos, etc., así como para algunos alimentos granulares o fluidos que contienen sólidos de tamaño considerable.

Entre los equipos más utilizados para la deshidratación por aire en cama o banda de alimentos sólidos se encuentran: **deshidratador de charolas, deshidratador de banda, deshidratador de túnel.** (Colina Irezabal, 2012).

• **Deshidratador de charolas o gabinete**

Consiste en cámaras o gabinetes aislados que contienen charolas sobre las que se coloca una o más capas del producto por deshidratar y se hace circular aire caliente, ya sea con flujo paralelo o bien con flujo transversal al producto. De manera opcional, en el caso de aire paralelo al producto y forzosamente en el aire transversal al producto, las charolas poseen un fondo de malla para permitir el paso del aire a través de ellas, obteniéndose tiempos de deshidratación más cortos debido a la mayor área superficial expuesta al aire. Cuando el producto alcanza el grado de deshidratación requerida, el gabinete se abre y las charolas se remplazan con otras que contienen nuevo producto por deshidratar.

En estos equipos las condiciones de deshidratación se controlan en forma simple y se cambian con facilidad. Sin embargo, es común que las charolas cercanas a la entrada de aire estén expuestas a condiciones bastante distintas de las que se encuentran cerca del final de la trayectoria del aire. Esta falta de uniformidad es principalmente resultado del movimiento no uniforme del aire dentro del deshidratador. Para evitar esto y lograr un proceso de deshidratación uniforme en todo el producto, es importante eliminar las bolsas de aire estancado y mantener una temperatura uniforme en todo el deshidratador, lo cual se logra haciendo pasar grandes volúmenes de aire a velocidades relativamente altas sobre las charolas. Como el gasto energético de calentar estos grandes volúmenes de aire

es elevado, muchas veces se procede a la recirculación de una fracción del aire caliente.

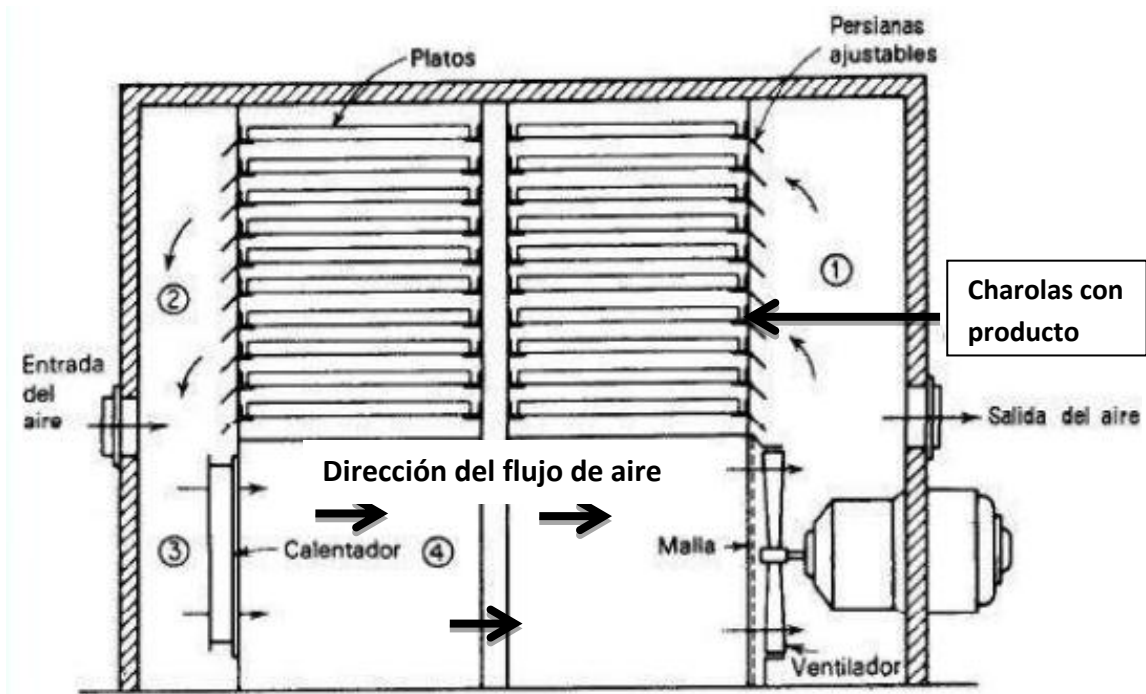


Figura 1. Esquema de un deshidratador de charolas con flujo de aire paralelo al producto.

Los deshidratadores de este tipo son relativamente baratos de construir y requieren bajos costos de mantenimiento. Sin embargo, su operación es costosa debido a la baja eficiencia calorífica y los altos costos de mano de obra. (Colina Irezabal, 2014).

- **Deshidratador de banda (operación continua)**

Los deshidratadores de banda, el producto por deshidratar se coloca, mediante un sistema adecuado al tipo de producto (tolva de alimentación, distribuidor vibrante, etc.), sobre una banda que puede tener perforaciones o fondo de tamiz y que transporta al producto a una velocidad controlada a través del deshidratador, por lo que estos equipos operan de manera continua.

Los deshidratadores de banda pueden funcionar con flujo de aire paralelo (concurrente o a contracorriente) o bien transversal al producto. Existen, asimismo, algunos diseños de deshidratadores de banda que manejan flujo de aire

mixto. En este caso, los deshidratadores funcionan en dos etapas, una con aire paralelo y la otra con aire transversal al producto.

Cuando se utiliza flujo de aire paralelo al producto, la selección de flujo concurrente o a contracorriente dependerá de las características del producto y la humedad final que requiera. Las operaciones con aire paralelo a contracorriente proporcionaran mayor temperatura cuando la humedad del producto es baja y, por ende, contrarrestan la resistencia a la remoción de la humedad que se presenta en las últimas etapas de la deshidratación y permiten obtener productos con muy bajo contenido de humedad final. Sin embargo, este flujo de aire aumenta la posibilidad de dañar la superficie del producto en sus etapas finales de deshidratación, por exposición excesiva al calor.

En ocasiones, los deshidratadores de banda están compuestos por diversas secciones en serie; cada una de ellas posee un ventilador y serpentines de calentamiento de aire, con objeto de tener mayor control sobre las condiciones de deshidratación. La última sección puede utilizar aire frío y seco para enfriar al producto que sale del deshidratador, a fin de proceder a su envasado inmediato.

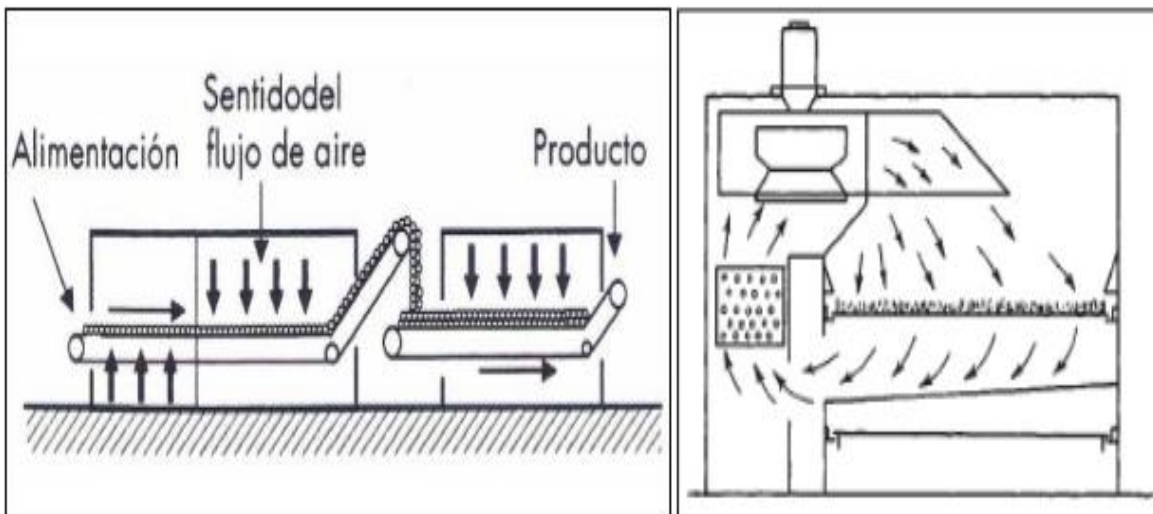


Figura 2. Esquema de un deshidratador de banda.

- **Deshidratador de túnel**

Estos deshidratadores consisten en túneles relativamente largos a través de los cuales se mueven carretillas en serie que contienen charolas, y en ella se coloca el sólido por deshidratar, las cuales se ponen en contacto con una corriente de aire caliente. Una carretilla con producto fresco se introduce periódicamente por uno de los lados del túnel, la cual desplaza a la carretilla anterior mediante una cadena móvil, provocando que, a su vez, salga del túnel la última carretilla con el producto deshidratado. El tiempo de estancia de las carretillas en el túnel debe ser lo suficientemente grande para lograr que el producto de salida posea la humedad final requerida.

El flujo del aire caliente puede ser paralelo, ya sea concurrente o a contracorriente, o bien transversal. La figura muestra el esquema de funcionamiento de un deshidratador de túnel con flujo de aire paralelo a contracorriente.

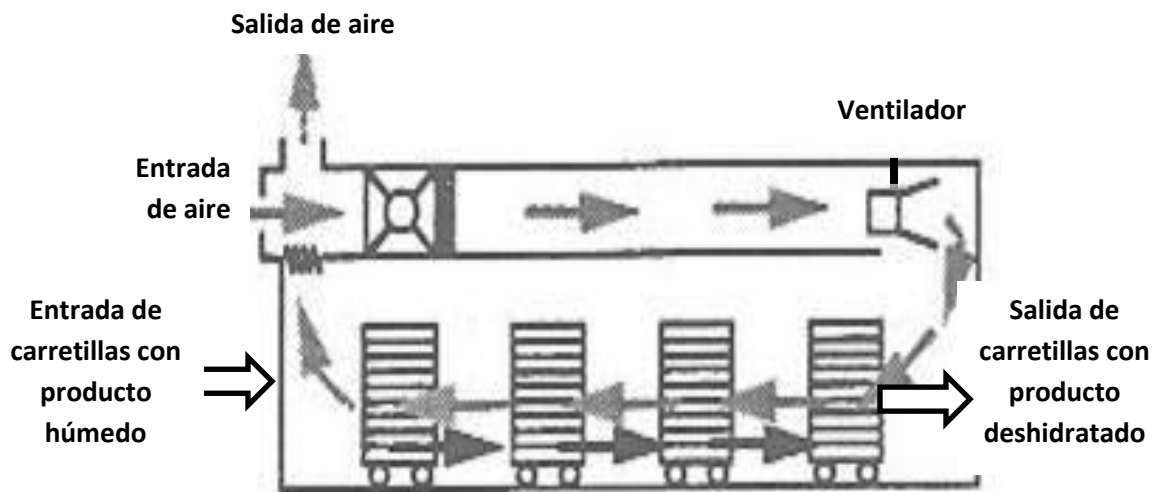


Figura 3. Esquema de un deshidratador de túnel con aire paralelo al producto a contracorriente.

2.3 Atmosferas modificadas.

Los alimentos se deterioran debido a factores físicos, químicos y microbiológicos, por lo que la vida útil de productos perecederos, como diferentes tipos de carnes (res, pollo, pescado), productos hortofrutícolas y de panificación, se encuentra limitada en presencia de aire. El efecto químico del oxígeno atmosférico y el desarrollo de microorganismos contaminantes son los dos factores que limitan la vida de anaquel de estos productos. Estos factores en conjunto o individualmente generan cambios tanto en las características fisicoquímicas (degradación de macromoléculas) como en las organolépticas (sabor, color, textura), cuyo resultado global es el deterioro en la calidad del alimento.

Mediante la aplicación de atmosferas modificadas (AM) la concentración normal del aire (20.94 % oxígeno, 78 % nitrógeno, 0.03 % de dióxido de carbono y el resto otros gases) se ve modificada, lo cual reduce la concentración de oxígeno y aumenta la del dióxido de carbono, nitrógeno u otros gases (óxido nitroso y nítrico, monóxido de carbono, dióxido de azufre, etanol, cloro gaseoso), proporcionando que la vida de anaquel de productos se extienda de manera significativa (Guevara Arauza, 2010).



Figura 4. Composición de la atmosfera.

En México, al igual que en estados Unidos, la adopción de las atmosferas modificadas con la finalidad de extender la vida útil de productos perecederos no ha sido distribuida ampliamente, tanto por razones geográficas como comerciales. En México la comercialización de productos hortofrutícolas no está mediada solo por la relación empacador-consumidor, existe una serie de intermediarios que incrementan tanto los tiempos de distribución como el costo del producto. Por su parte, en el mercado europeo la comercialización se da directamente del productor a las tiendas minoristas y de ahí al consumidor (Guevara Arauza, 2010).

2.4 Atributos fisicoquímicos de calidad.

2.4.1 Contenido de humedad y actividad de agua de los alimentos.

En la deshidratación, proceso basado en la eliminación del agua, es fundamental el conocimiento del contenido de agua de un alimento, pero igual de importante es la relación entre este contenido y el estado en el que se encuentra el agua en dicho alimento. Dos conceptos son, por tanto, de suma importancia: el contenido de humedad del alimento (W) y su actividad de agua (a_w).

El contenido de humedad de un alimento es la cantidad de agua total que contiene.

El termino actividad de agua (a_w) determina el grado de interacción del agua con los demás constituyentes de un alimento y es una medida indirecta del agua disponible para realizar las diferentes reacciones químicas y bioquímicas que pueden suscitarse en dicho alimento. En otras palabras, es una medida del agua libre de dicho alimento (Colina Irezabal, 2014).

2.4.2 Color

El color corresponde a una percepción e interpretación subjetiva. Dos personas mirando un mismo objeto pueden usar puntos de referencia distintos y expresar el mismo color con una gran variedad de palabras diferentes, llevando a confusión y falta de comunicación internamente o a través de la cadena de

abastecimiento. Para evitar esto y asegurar que una muestra cumpla con el estándar, el color debe ser expresado en términos numéricos y objetivos.

Cuando se clasifican los colores, se los puede expresar en términos de matiz (color), luminosidad (brillo) y saturación (vividez). Al crear escalas para estos atributos, podemos expresar en forma precisa el color.

El espacio de color $L^*a^*b^*$ fue modelado en base a una teoría de color oponente que establece que dos colores no pueden ser rojo y verde al mismo tiempo o amarillo y azul al mismo tiempo. Los valores correspondientes a L^* , a^* , b^* , los cuales son los ejes de un plano tridimensional de color basado en un arreglo visual lógico del color (Figura 4), en el cual L^* indica la luminosidad, a^* los componentes verde-rojo siendo $-a^*$ correspondiente al verde y $+a^*$ al rojo, b^* a los componentes azul-amarillo donde $-b^*$ indica el azul y $+b^*$ al amarillo (capilla y col.,2002).

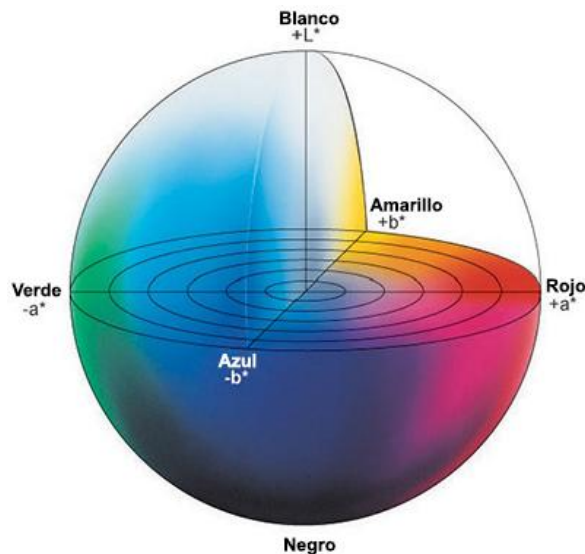


Figura 5. Esquema del sistema L^* , a^* , b^* .

Los instrumentos de medición de color, incluyendo espectrofotómetros y colorímetros, pueden cuantificar éstos atributos de color fácilmente. Ellos determinan el color de un objeto dentro del espacio de color y muestran los valores para cada coordenada L^* , a^* , y b^* .

Diferencias de Color

Aún si dos colores parecen los mismos a una persona, se pueden encontrar diferencias ínfimas cuando son evaluados con un instrumento de medición de color. Si el color de una muestra no cumple con el estándar, la satisfacción del consumidor se ve comprometida y la cantidad de trabajo y costos aumenta. Es por ello, que identificar diferencias de color entre una muestra y el estándar antes de la producción masiva es muy importante.

La diferencia de color es definida como la comparación numérica de una muestra con el estándar. Indica las diferencias en coordenadas absolutas de color y se la conoce como Delta (Δ). Deltas por L^* (ΔL^*), a^* (Δa^*) y b^* (Δb^*) pueden ser positivas (+) o negativas (-). La diferencia total, Delta E (ΔE^*), sin embargo, siempre es positiva. Éstas son expresadas como:

ΔL^* = diferencia en luz y oscuridad (+ = más luminoso, - = más oscuro)

Δa^* = diferencia en rojo y verde (+ = más rojo, - = más verde)

Δb^* = diferencia en amarillo y azul (+ = más amarillo, - = más azul)

ΔE^* = diferencia total de color

Para determinar la diferencia total de color entre las tres coordenadas, se debe usar la siguiente fórmula: **$\Delta E^* = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2}$** .

Es importante destacar que Delta E sólo indica la magnitud de la diferencia total de color pero no indica cuán correcta es (<http://www.colormine.org/>).

2.4.3 Polifenoles Totales.

Los polifenoles se consideran agentes reductores que junto con otros agentes como las vitaminas C, E y carotenoides protegen los tejidos del cuerpo contra el estrés oxidativo. Como antioxidantes pueden prevenir varias enfermedades asociadas a este estrés como cáncer, enfermedades cardiovasculares, inflamación, entre otras (Scalbert y Williamson, 2000). Los polifenoles junto con otros están asociados con el reforzamiento de la pared celular y los mecanismos de defensa (Osboum, 1999; Mo Rant y col., 2008).

Una desventaja de los polifenoles es que le confieren al plátano inmaduro un sabor astringente, además de oscurecer el fruto cuando este es deshidratado (Kanazawa y Sakakibara, 2000).

Los polifenoles son compuestos bioactivos con capacidad antioxidante que han despertado un gran interés desde el punto de vista nutricional, por sus acciones no solo en estado de salud, sino en la prevención de las alteraciones funcionales y estructurales de diversas enfermedades. En los últimos años, se les han atribuido efectos beneficiosos frente al desarrollo de diversas enfermedades (cáncer, enfermedades cardiovasculares y enfermedades neurodegenerativas) asociadas a un aumento de los procesos e oxidación celular, conocidos como estrés oxidativo.

El estudio de antioxidantes naturales ha cobrado un papel importante como resultado de su relación directa con la disminución del riesgo a sufrir enfermedades coronarias y cáncer, entre otras. Compuestos presentes en frutas y hortalizas como tocoferoles, ácidos fenólicos, flavonoides, vitamina C y carotenoides han sido vinculados a efectos positivos en la salud por su acción antioxidante.

3. JUSTIFICACIÓN

Durante el secado convectivo los materiales sufren cambios indeseables debido al O₂ que se encuentra en la atmosfera del secador, por lo que es importante mejorar esta tecnología de secado que permita ser más eficiente, y a su vez que los frutos a deshidratar NO pierdan sus compuestos de interés, ni el oscurecimiento por oxidación.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general.

Generar un proceso de deshidratado eficiente para evitar el oscurecimiento por oxidación del banano.

4.2 Objetivos específicos

- Generar una técnica de deshidratado que permita obtener los mejores resultados en el secado del banano.
- Diseñar un dispositivo con atmosfera modificada empleando gas nitrógeno para desplazar al oxígeno.
- Identificar las condiciones óptimas de secado como temperatura, flujo de aire, tamaño del material, humedad relativa, tiempo de secado.

5. HIPÓTESIS

Modificando la atmosfera durante el secado convectivo, existe una disminución en la degradación de compuestos de interés y en el oscurecimiento por oxidación del banano y otros frutos.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en la planta piloto de procesos agroindustriales del Instituto Tecnológico de Tlajomulco, específicamente en un secador de charolas marca Polinox con una capacidad por lote de 20 kg.

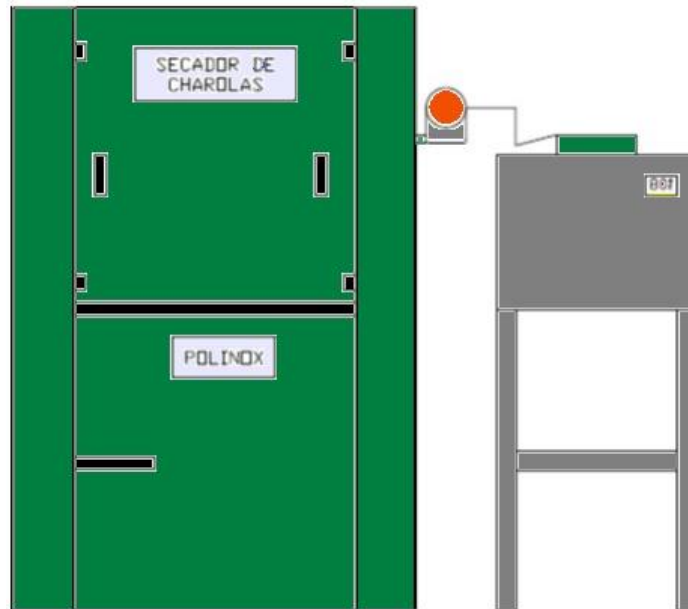


Figura 6. Secador de charolas, marca POLINOX con una capacidad por lote de 20 Kg.

6.1 Material biológico

Se utilizó solo una variedad de banano: ***Musa AAA. Subgrupo Cavendish.*** Comúnmente llamado como: plátano (**Chiapas, Enano Gigante, Tabasco, Valery**).

El fruto se clasificó en una escala de 1 a 8, la cual relaciona el estado de madurez con el color de la cáscara, de acuerdo al criterio siguiente: Verde (1), verde con ligero tono amarillo (2), amarillo con ligeros tonos en las puntas verdes (3), completamente amarillo (4), amarillo con pequeñas marcas color marrón (5), amarillo con pequeñas manchas marrones (6), amarillo con marcadas manchas de color marrón (7), amarillo manchado (8) (Chávez- Rodríguez, 2012).

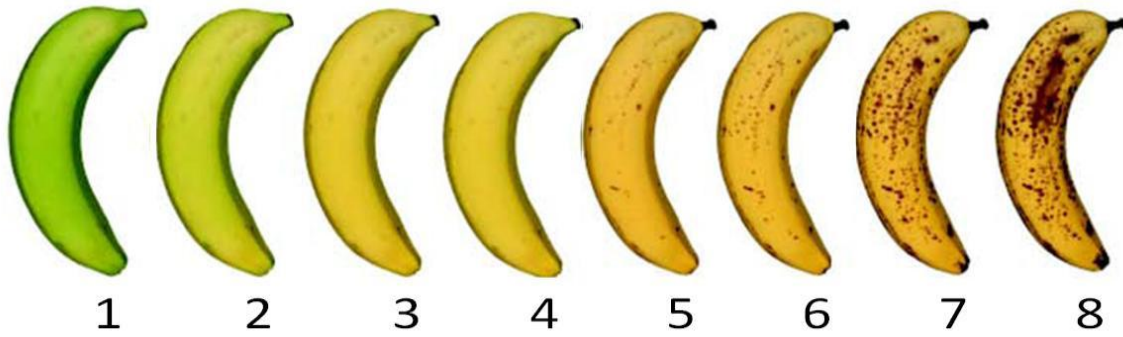


Figura 7 Cambios de color en la cascara en las diferentes etapas de maduración del banano.

De acuerdo a la clasificación anterior, el banano que utilizamos para nuestro experimento fue de color completamente amarillo (4), en un rango de 18-22 % de °Bx, 75 – 76 % de humedad y una actividad de agua (A_w) de 0.9.

6.2 Preparación de la muestra

Las muestras de banano a deshidratar fueron cortadas en rebanadas de 3 mm y 5 mm de grosor, la deshidratación se realizó a 3 diferentes temperaturas (60°C, 70°C y 80°C).

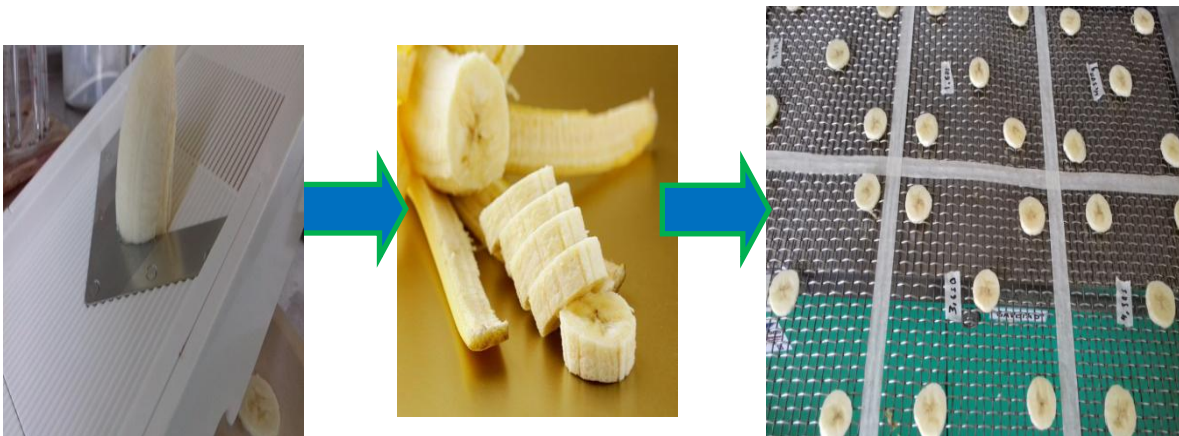


Figura 8. Preparación de la muestra.

6.3 Perfil de temperatura

Mediante el equipo termopares digital con sonda para solidos (DIGI-SENSE ®, modelo 92000-00), el secador fue muestreado para determinar si la temperatura se desplaza uniformemente en toda la cámara de secado, y si no es así, conocer la zona optima de secado, evitando perdida de calor.

6.4 Cinéticas de secado

Se realizaron las cinéticas de secado para dos grosores de banano (3mm y 5mm), en tres diferentes temperaturas (60°C, 70°C y 80°C), esto para determinar el tiempo óptimo de secado para cada tratamiento.

6.5 Secado Convectivo

Como se mencionó anteriormente, para el proceso de deshidratación se utilizó un secador de charolas marca Polinox con una capacidad por lote de 20 kg. Las condiciones operativas del secador fueron: Temperatura del aire (60°C, 70°C, 80°C); Velocidad del flujo de 0.1 m/s y una humedad relativa entre 7-18%. Las rebanadas deshidratadas de banano fueron almacenadas en bolsas ziploc dentro de un desecador con silica gel, para su posterior análisis.

Tabla 3 Diseño Experimental.

NO. EXP	GROSOR	TEMPERATURA	METODO DE SECADO
1	3 mm	60°C	NORMAL (Control)
2	3 mm	70°C	NORMAL (Control)
3	3 mm	80°C	NORMAL (Control)
4	5 mm	60°C	NORMAL (Control)
5	5 mm	70°C	NORMAL (Control)
6	5 mm	80°C	NORMAL (Control)

7	3 mm	60°C	GAS N ₂ GENERAL
8	3 mm	70°C	GAS N ₂ GENERAL
9	3 mm	80°C	GAS N ₂ GENERAL
10	5 mm	60°C	GAS N ₂ GENERAL
11	5 mm	70°C	GAS N ₂ GENERAL
12	5 mm	80°C	GAS N ₂ GENERAL
13	3 mm	60°C	GAS N ₂ LOCALIZADO
14	3 mm	70°C	GAS N ₂ LOCALIZADO
15	3 mm	80°C	GAS N ₂ LOCALIZADO
16	5 mm	60°C	GAS N ₂ LOCALIZADO
17	5 mm	70°C	GAS N ₂ LOCALIZADO
18	5 mm	80°C	GAS N ₂ LOCALIZADO

En la tabla 3, se muestran cada uno de los experimentos realizados: los experimentos del 1-6 son mi control, del 7-12 se modificó la atmosfera del secador inyectando gas nitrógeno (N₂) en la parte superior donde se encuentra el ventilador y las resistencias, por último del 13-18 también se inyectó gas N₂ solo que de forma localizada (directo a la muestra a deshidratar). Se midió el contenido de humedad, actividad de agua y el color, antes y después de deshidratar cada tratamiento.

6.6 Contenido de humedad y actividad de agua

El contenido de humedad se determinó basado en el método de la AOAC (AOAC, 1990). Las muestras de banano se pesaron (1g) en charolas de aluminio y se colocaron en una balanza de humedad (PRECISA ®, modelo HA 300-310, Suiza) para la determinación de humedad. La medición de la actividad de agua (Aw), se llevó a cabo con un medidor de actividad de agua (ROTRONIC, modelo HYGROLAB C1, EE.UU.). Todas las pruebas anteriores se realizaron por triplicado tanto en fruta fresca y deshidratada.



Figura 9A. Balanza de humedad, Figura 10B. Medidor de actividad de agua.

6.7 Color

La determinación de color se realizó con un Colorímetro X-rite, modelo SP62 Grandville, MI, EE.UU. Se realizaron las mediciones por triplicado en cada muestra tanto en fruta fresca como deshidratada, obteniendo los valores correspondientes a L^* , a^* , b^* .



Figura 11. Colorímetro X-rite.

Posteriormente se calculó la diferencia de color total entre las coordenadas, mediante la siguiente fórmula: $\Delta E^* = [\Delta L^*2 + \Delta a^*2 + \Delta b^*2]^{1/2}$.

6.8 Cuantificación de fenólicos totales

La concentración de fenólicos totales se midió por el método de FOLIN-CIOCALTEU. Como primer paso se prepara una solución patrón de ácido gálico

utilizando como estándar de 0,1 g/L., para lo cual se pesan 0.025 g de ácido gálico, se coloca en un matraz aforado de 25 ml y se lleva a volumen con agua destilada, enseguida se prepara una dilución 1:10 con agua destilada (siempre se utiliza una solución recién preparada).

De la misma manera se prepara una disolución de carbonato de sodio al 20%, pesando 5 g de carbonato de sodio en un matraz aforado de 25 ml, inicialmente se disolvió en 15 ml de agua grado HPLC.

Por otro lado, se preparó una disolución del reactivo de Folin-Ciocalteu, por medio de una dilución 1:1 del reactivo comercial en agua destilada, el reactivo se protegió de la luz y se colocó en refrigeración hasta su uso.

A partir de la disolución patrón de ácido gálico, en tubos protegidos de la luz, se hacen las diluciones necesarias con agua destilada para obtener concentraciones de 0, 4, 6, 8, 10 y 12 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$, para la preparación de la curva de calibración. Esta se realiza tomando respectivamente 40, 60, 80, 100 y 120 μL de la disolución patrón de ácido gálico de 0,1 g/L, en tubos protegidos de la luz de 4ml, posteriormente se les adiciona 500 μL del reactivo se agita en un vortex y se deja reposar 5min, después se les adiciona 500 μL de la solución de carbonato de sodio al 20%, se vuelve a agitar en un vortex y se deja reposar otros 5 min, posteriormente se lleva a volumen de 4 ml con agua destilada y se deja reposar por 2 h a temperatura ambiente. También se prepara un blanco con todos los componentes excepto la disolución de ácido gálico. Finalmente se lee la absorbancia a 760 nm en el espectrómetro de luz ultravioleta-visible.

Para la determinación de fenólicos totales de la muestra se toma 1 ml y se diluye si su antecedente es que contiene muchos compuestos fenólicos. De las diluciones se toma 1 ml, se les adiciona 1.5 ml de la solución del reactivo Folin-Ciocalteu, se agita en el vortex dejando en reposo a temperatura ambiente por 5 min, después se agregan 1.5 ml de carbonato de sodio al 20%. Se agita fuertemente para luego, dejar reposar durante 90 min a temperatura ambiente.

Después de este tiempo se mide la absorbancia a 760 nm. Reportándose los fenólicos totales como, $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ de ácido gálico (Farias-Cervantes, 2016).

6.9 Análisis estadístico

Todos los experimentos se realizaron por triplicado. Para analizar los resultados de humedad, Actividad de agua, color, fenólicos totales, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y cuando se encontraron diferencias estadísticas entre las muestras se utilizó una prueba de comparación de medias (Tukey), con una significativa de ($p < 0,05$), usando el software Minitab ® 17.2.1 (© 2013, 2015 Minitab, Inc. All rights reserved.).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Perfil de temperatura

Una vez que se realizó la medición de temperatura dentro de la cámara de secado mediante el equipo termopares digital con sonda para sólidos (DIGI-SENSE ®, modelo 92000-00), podemos determinar que la temperatura no se desplaza uniformemente en toda la cámara, ya que solo en las charolas del centro se concentra la temperatura más alta, con una diferencia de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto a las primeras y últimas tres charolas.

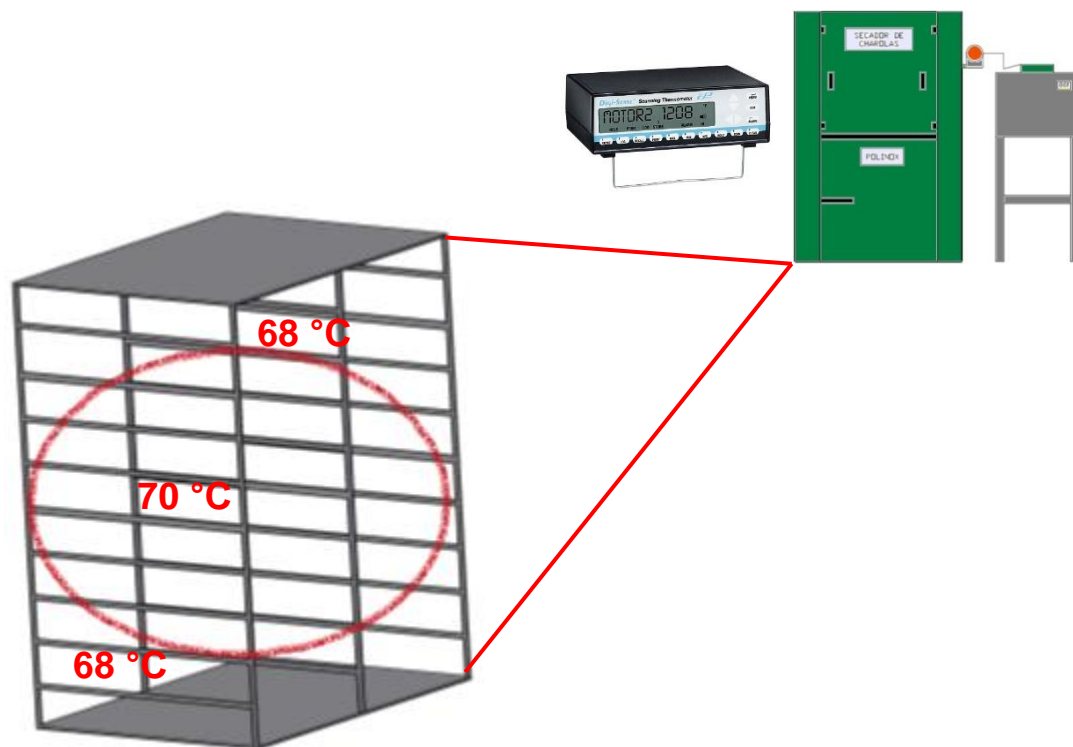


Figura 12. Medición de la temperatura dentro de la cámara de secado.

7.2 Cinéticas de secado

El deshidratado termina cuando el peso del producto tiende a alcanzar las condiciones de equilibrio en el tiempo, es decir, cuando la variación del peso del sólido es casi nula, tendiendo a un peso constante (Colina Irezabal, 2012). Para ello obtuvimos las siguientes cinéticas de secado para los grosores de 3mm y 5mm. (Véase en las figuras 12 y 13).

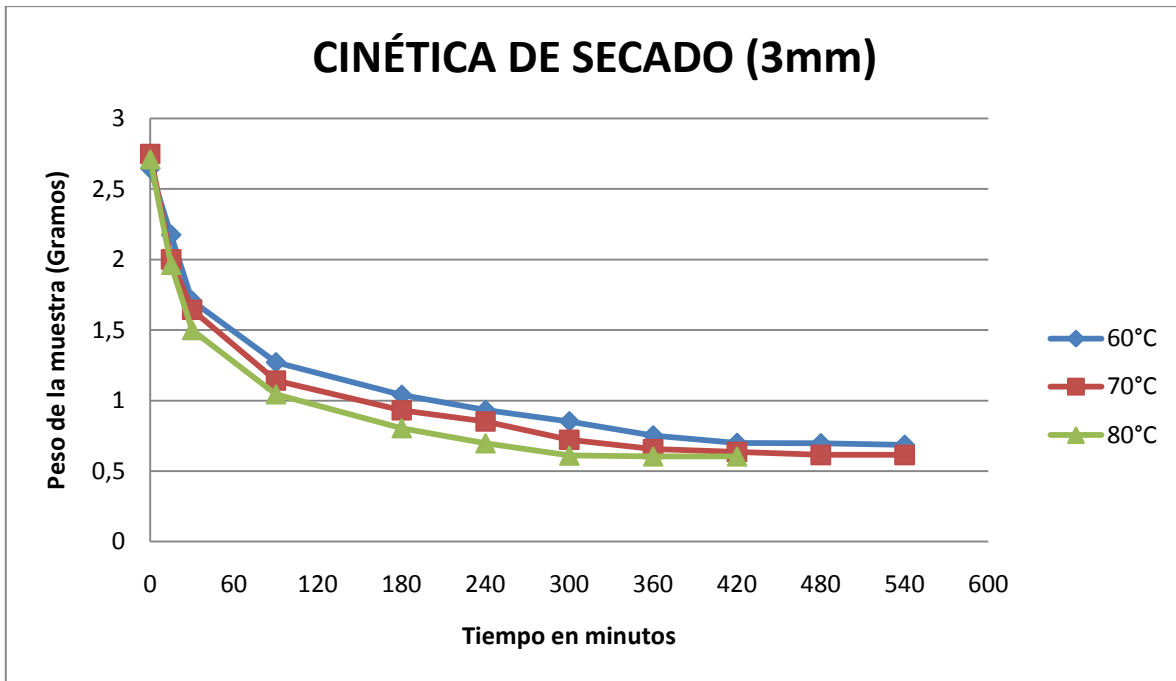


Figura 13. Cinética de secado para un grosor de 3mm.

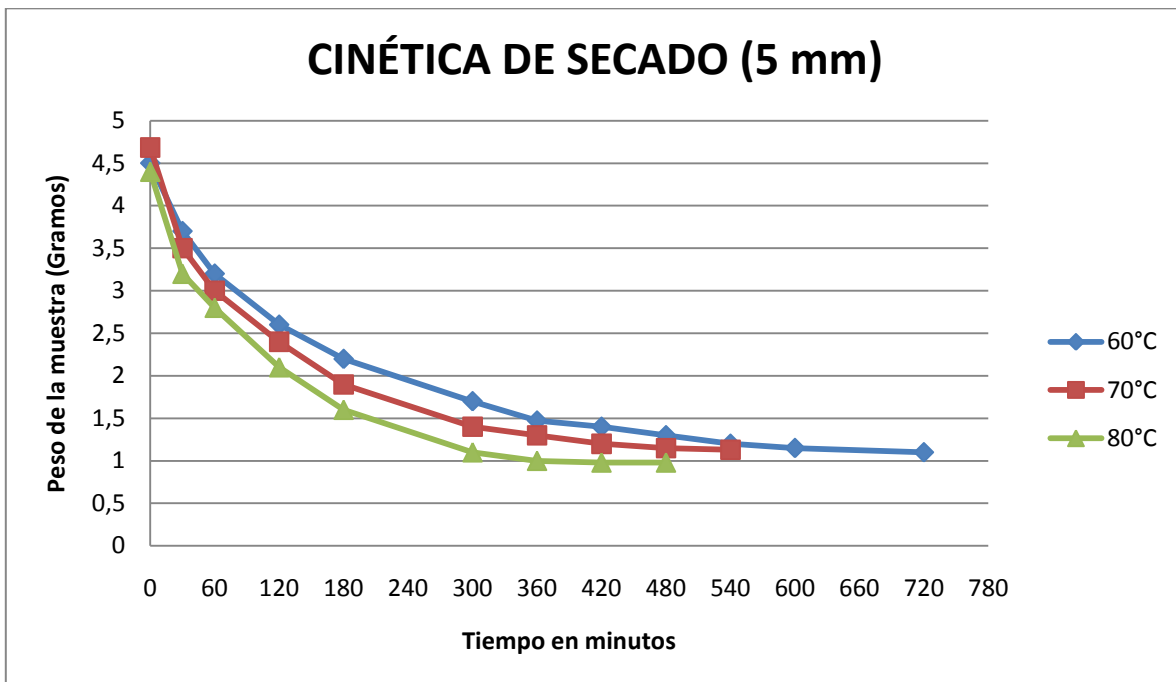


Figura 14. Cinética de secado para un grosor de 5mm.

En la figura 12, nos muestra la cinética de secado para el grosor de 3mm, en la cual podemos observar que entre más alta sea la temperatura del secador, la eliminación del agua presente en el alimento es más rápida y viceversa entre más baja sea la temperatura a deshidratar, el tiempo necesario se incrementa.

En la figura 13, nos muestra la cinética de secado para el grosor de 5mm, en la cual podemos observar que tiene el mismo comportamiento que la gráfica 3, solamente que los tiempos requeridos de secado para cada temperatura son mayores en comparación con la cinética para un grosor de 3mm.

De acuerdo a las cinéticas realizadas podemos determinar los siguientes tiempos de secado para cada tratamiento, los cuales se muestran la figura 14.

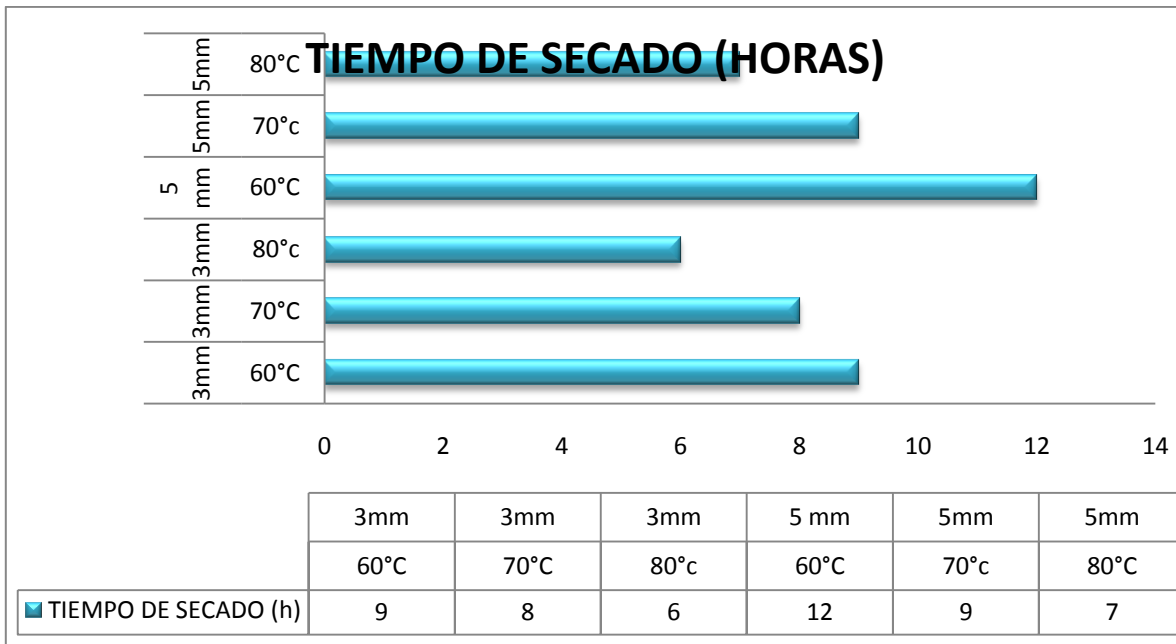


Figura 15. Tiempos de secado para cada tratamiento.

En la figura anterior nos muestra los tiempos de secado que se necesitan para cada tratamiento, los cuales son específicos y van de las 6 a 12 horas, dependiendo del grosor y temperatura a deshidratar.

7.3 Contenido de humedad y actividad de agua

El contenido de humedad de las muestras de banano deshidratado en los dos grosores (3 mm y 5 mm) y en las 3 diferentes temperaturas (60°C, 70°C y 80°C), no mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$), ya que las mediciones nos arrojaron valores entre el 6-7 % de humedad. (Véase en la tabla 4).

Tabla 4 Porcentaje de contenido de humedad.

TRATAMIENTOS	METODO DE SECADO		
	NORMAL (Control)	GAS N ₂ GENERAL	GAS N ₂ LOCALIZADO
3mm 60°C	7.05 ± 0.32 ^a	7.35 ± 1.21 ^a	7.06 ± 0.26 ^a
3mm 70°C	6.58 ± 0.47 ^a	6.36 ± 0.42 ^a	6.54 ± 0.26 ^a
3mm 80°C	6.34 ± 0.17 ^a	7.13 ± 0.67 ^a	6.17 ± 0.44 ^a
5mm 60°C	7.13 ± 0.42 ^a	6.32 ± 0.12 ^a	6.76 ± 0.31 ^a
5mm 70°C	6.89 ± 0.32 ^a	5.77 ± 0.57 ^a	7.16 ± 1.05 ^a
5mm 80°C	6.7 ± 0.41 ^a	6.64 ± 0.56 ^a	6.52 ± 0.52 ^a

En el cuadro se presentan las medias con la desviación estándar. Diferentes letras en una misma fila, denotan diferencia significativa ($P < 0.05$, Prueba de Tukey)

La modificación de la atmosfera (GAS N₂ GENERAL, GAS N₂ LOCALIZADO) del secador, no muestran diferencias significativas ($p < 0.05$), en comparación con el control. Por lo cual podemos determinar que el N₂ inyectado no influye en el porcentaje de humedad, ni en el tiempo de secado. En las siguientes figuras (15, 16, 17, 18, 19, 20) se muestran los análisis de varianza (ANOVA) realizados para cada tratamiento.

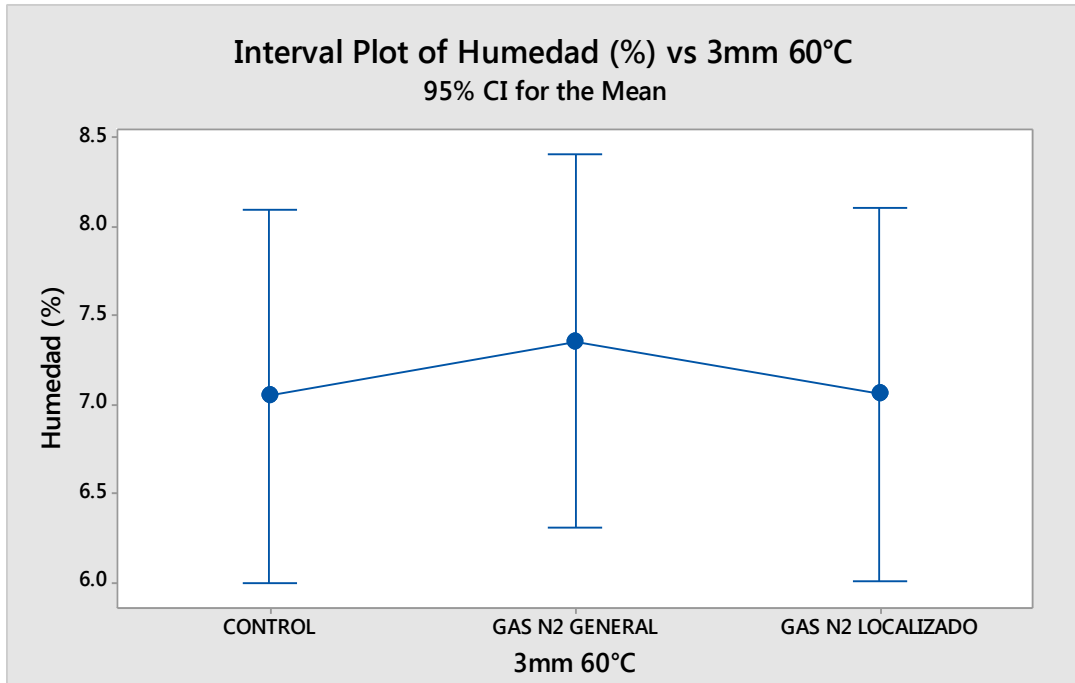


Figura 17. ANOVA 3mm 60 °C.

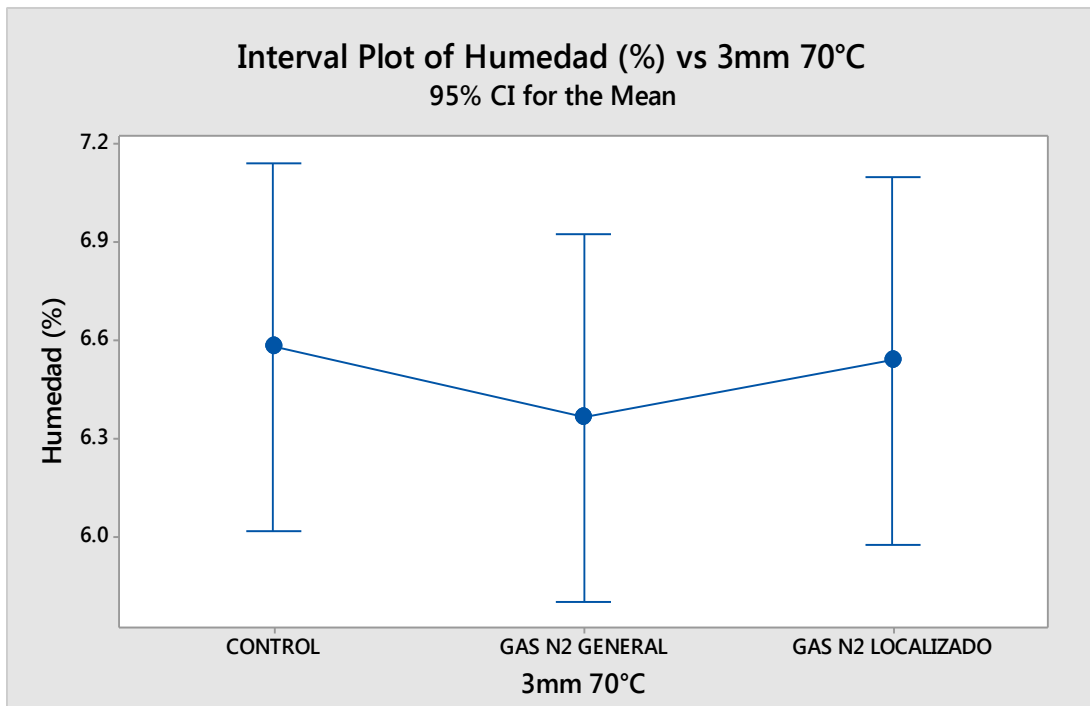


Figura 16. ANOVA 3mm 70 °C.

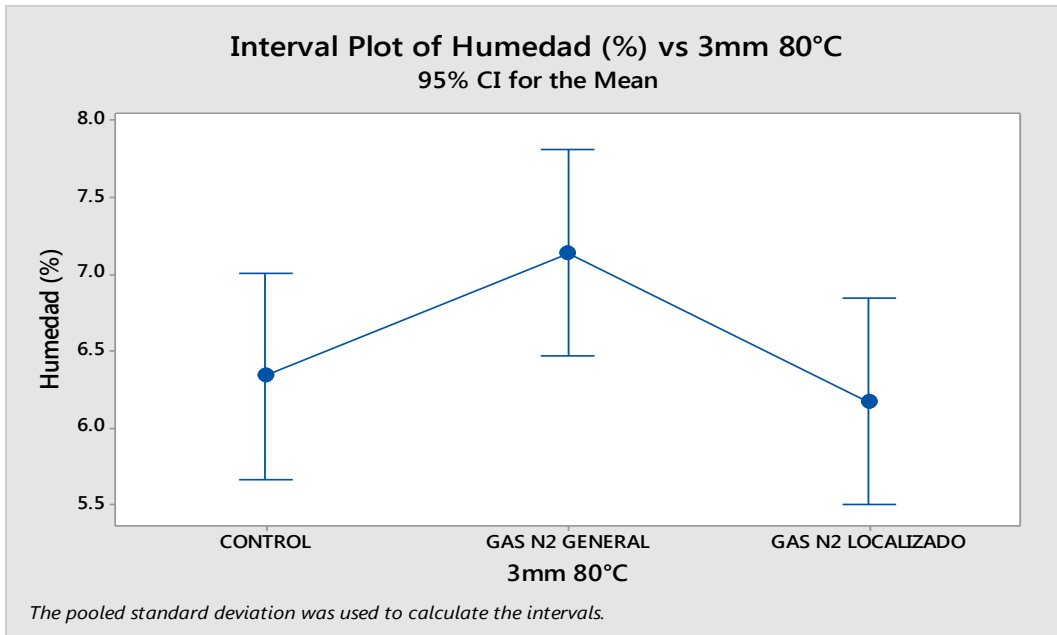


Figura 18. ANOVA 3mm 80 °C.

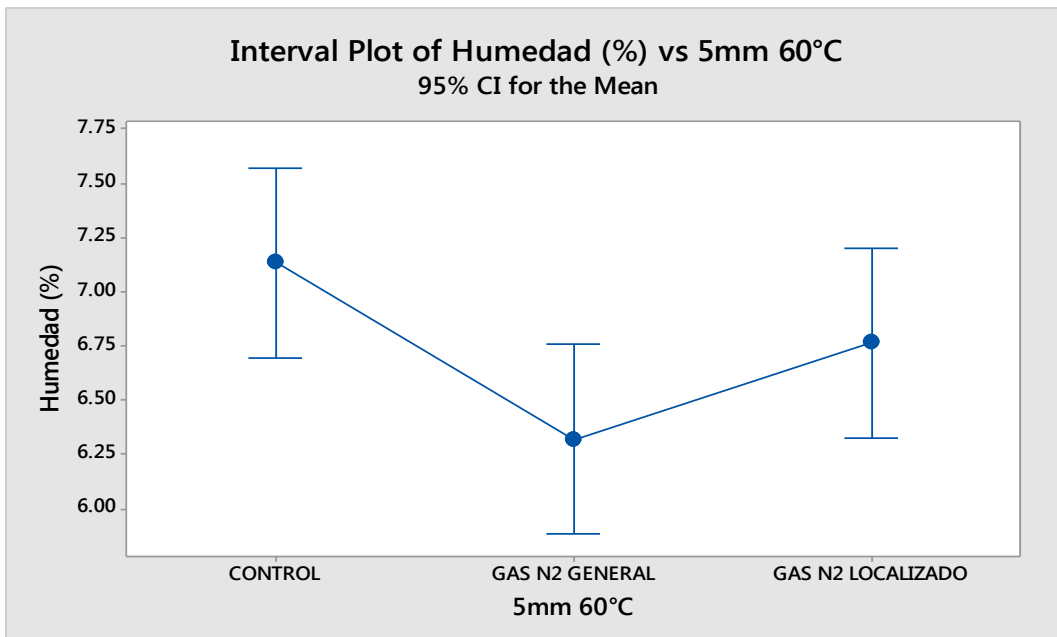


Figura 19. ANOVA 5mm 60 °C.

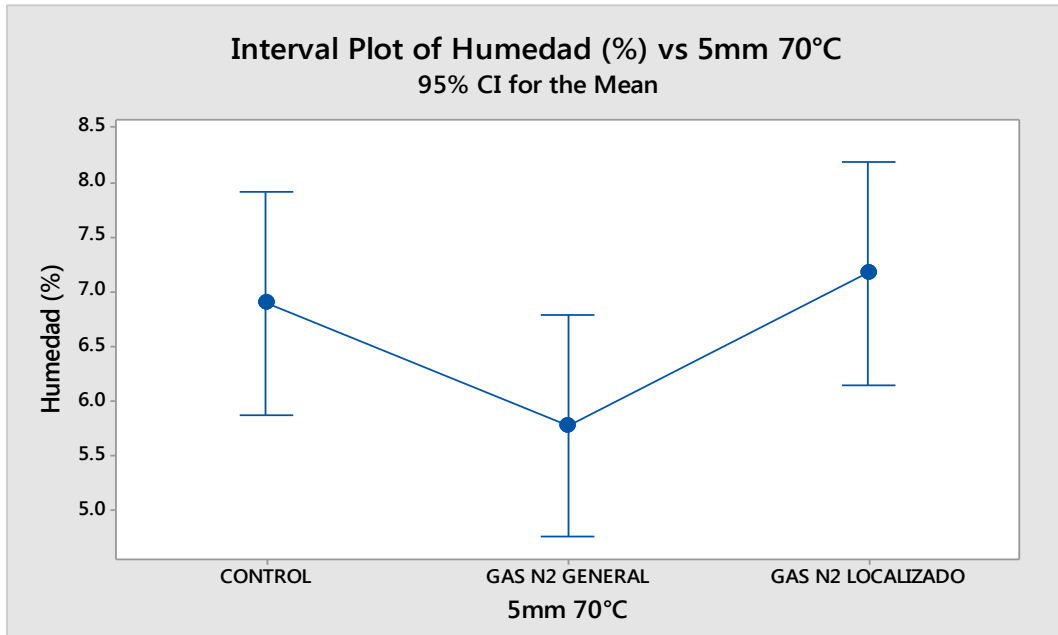


Figura 21. ANOVA 5mm 70 °C.

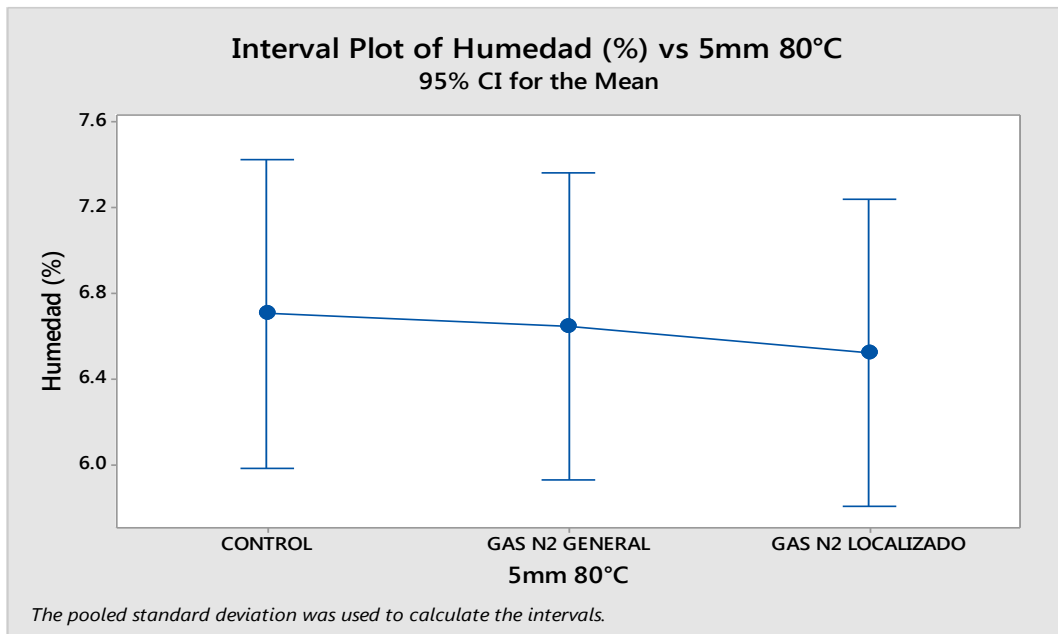


Figura 20. ANOVA 5mm 80 °C.

Respecto al contenido de actividad de agua (A_w) los valores oscilaron en un rango de 0.39 a 0.42, estos datos representan el promedio de tres mediciones. En la tabla 5 podemos observar cada tratamiento con su respectivo valor.

Tabla 5 Contenido de actividad de agua (A_w).

TRATAMIENTOS	METODO DE SECADO		
	NORMAL (Control)	GAS N ₂ GENERAL	GAS N ₂ LOCALIZADO
3mm 60°C	0.408 ± 0.014 ^a	0.423 ± 0.023 ^a	0.429 ± 0.014 ^a
3mm 70°C	0.414 ± 0.008 ^a	0.403 ± 0.003 ^a	0.415 ± 0.027 ^a
3mm 80°C	0.385 ± 0.017 ^a	0.390 ± 0.023 ^a	0.412 ± 0.017 ^a
5mm 60°C	0.41 ± 0.014 ^a	0.416 ± 0.020 ^a	0.420 ± 0.027 ^a
5mm 70°C	0.406 ± 0.013 ^a	0.417 ± 0.009 ^a	0.429 ± 0.017 ^a
5mm 80°C	0.394 ± 0.01 ^a	0.401 ± 0.006 ^a	0.409 ± 0.012 ^a

Media de 3 repeticiones ± DE, Base seca

Valores con diferente letra en una misma fila, son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$, Prueba de Tukey)

En las siguientes figuras (21, 22, 23, 24, 25, 26) se muestran los análisis de varianza (ANOVA) realizados. De los cuales podemos determinar que no existe diferencia significativa ($p < 0.05$) en ningún tratamiento.

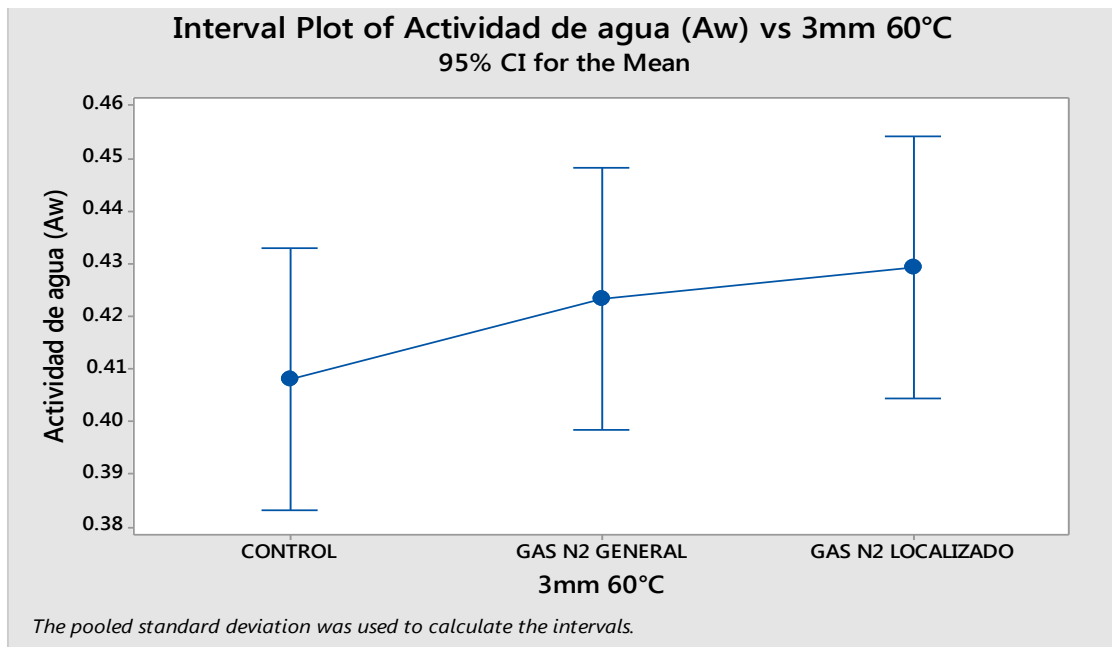


Figura 22. ANOVA de A_w , 3mm 60 °C.

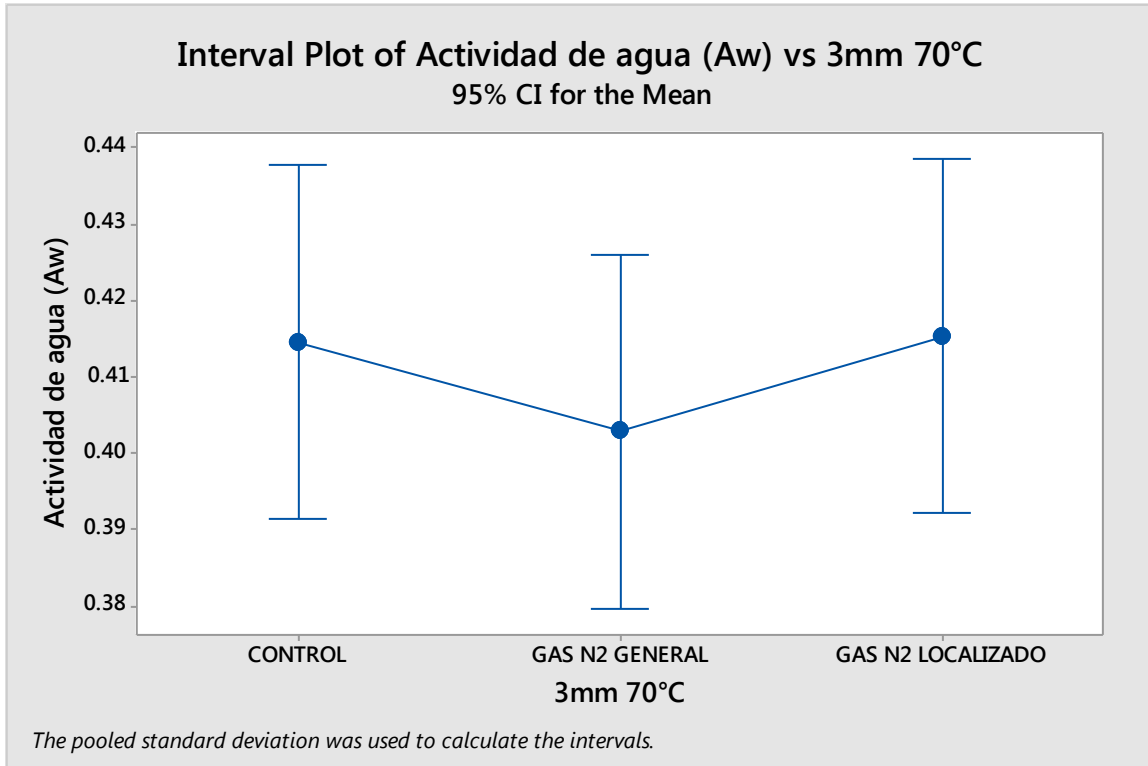


Figura 23. ANOVA de A_w , 3mm 70 °C.

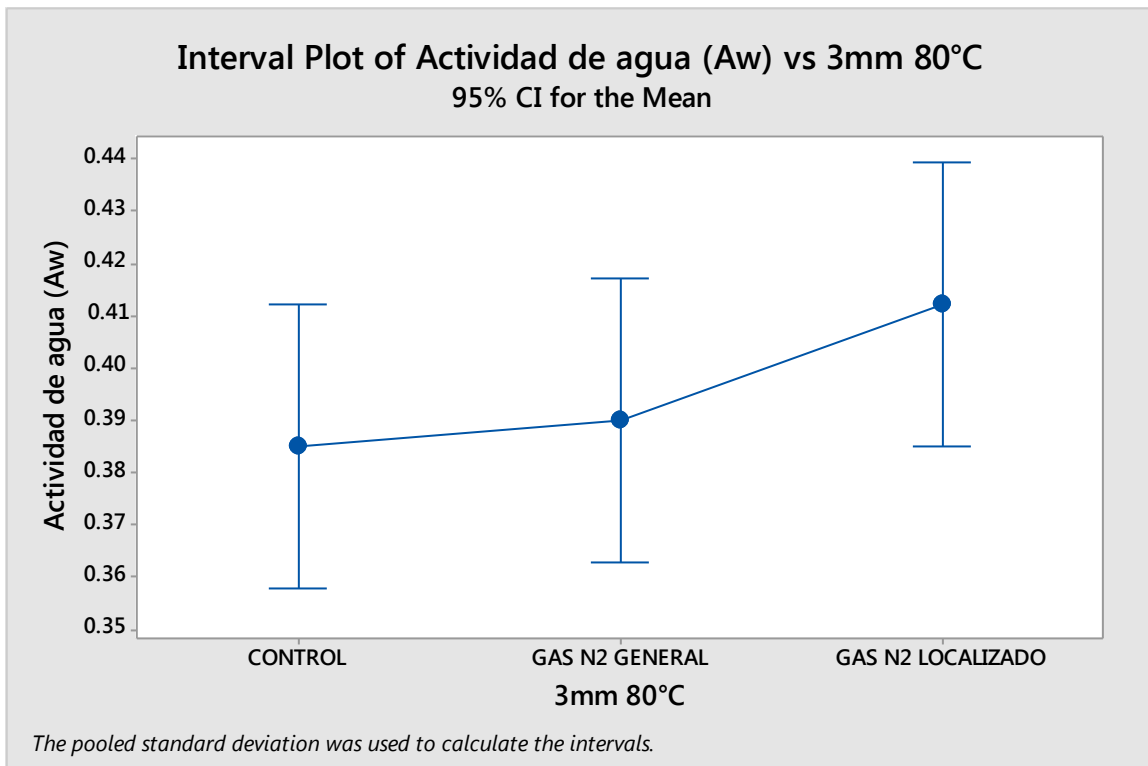


Figura 24. ANOVA de A_w , 3mm 80 °C.

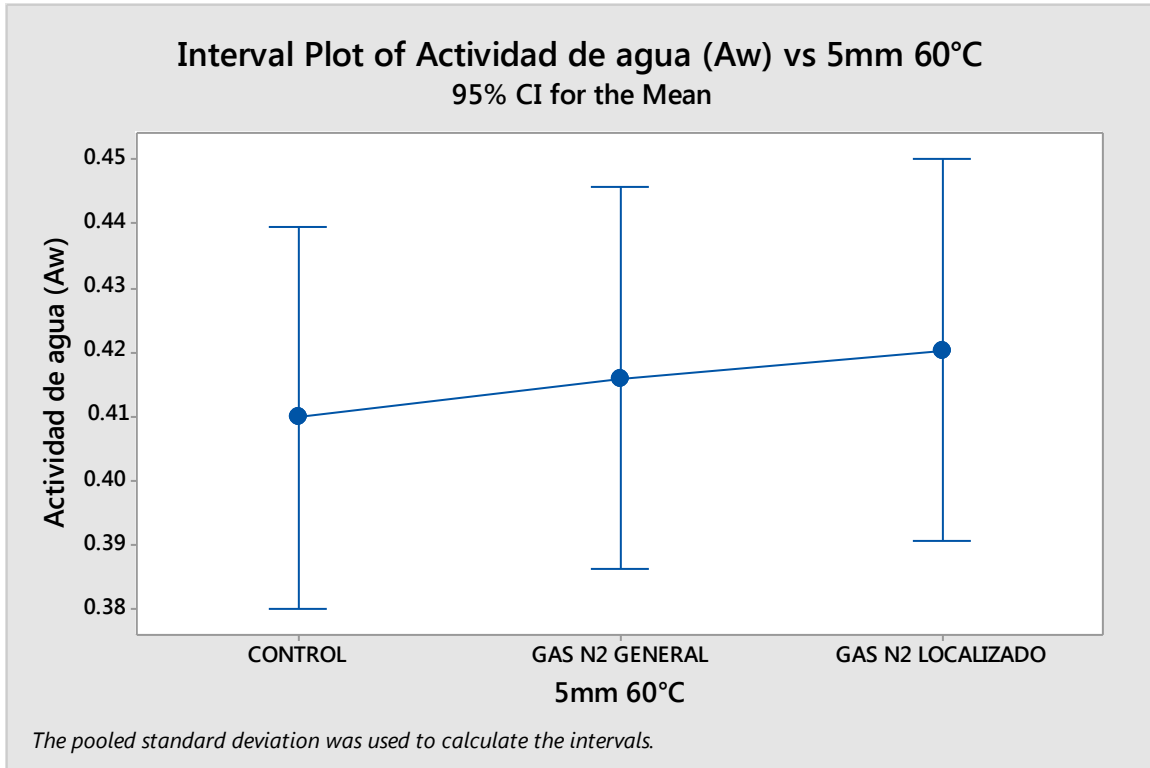


Figura 25. ANOVA de A_w , 5mm 60 °C.

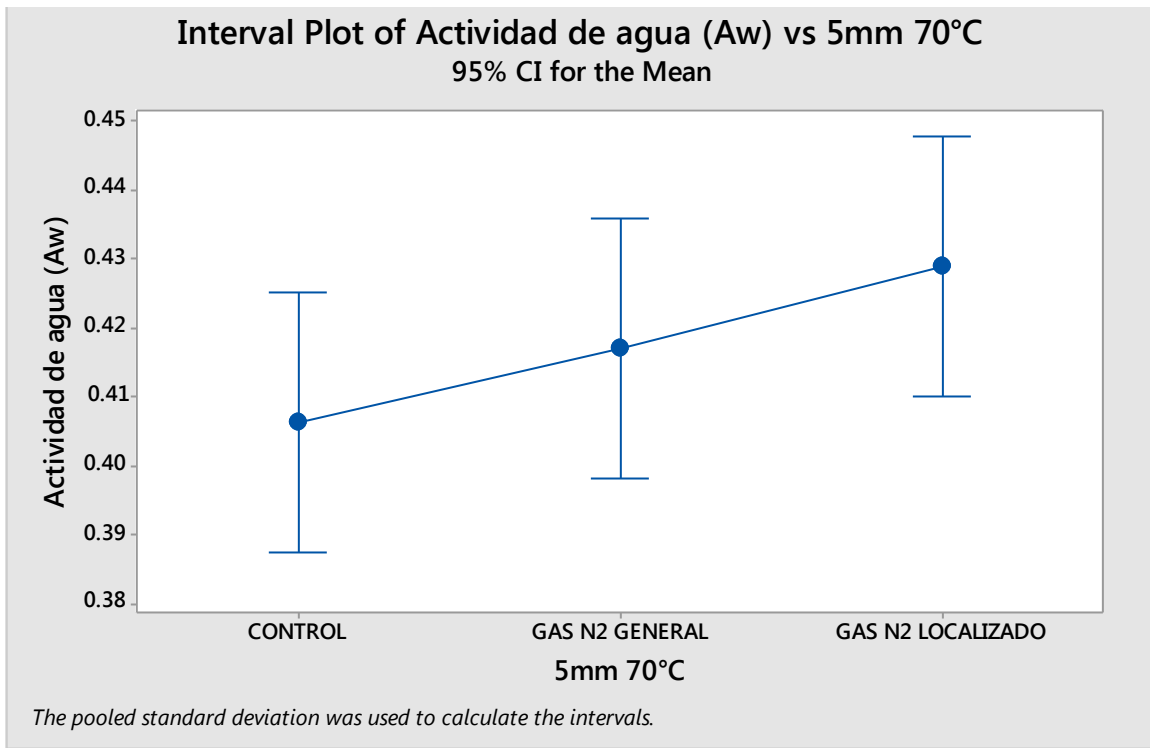


Figura 26. ANOVA de A_w , 5mm 70 °C.

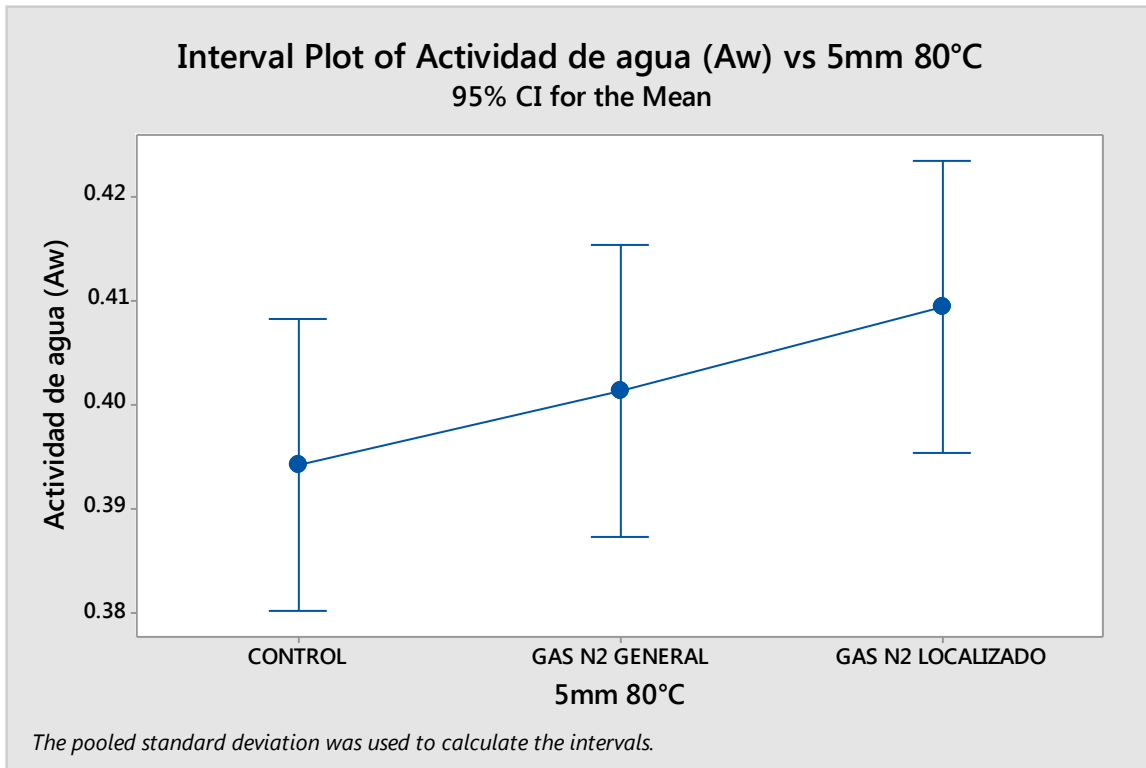


Figura 27. ANOVA de A_w , 5mm 80 °C.

Sin embargo podemos observar una ligera correlación entre la A_w y la temperatura, ya que al deshidratar con la temperatura más alta (80 °C), su actividad de agua es más baja.

7.4 Color

Los valores de color L^* , a^* , b^* obtenidos de cada tratamiento, se presentan en la tabla 6. Todos los tratamientos presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en el valor L^* , el mayor valor corresponde al experimento 14 (3mm 70°C, GAS N₂ LOCALIZADO) con un valor de L^* 72.84, seguido del experimento 15 (3mm 80°C, GAS N₂ LOCALIZADO) con un valor de L^* 69.54 y finalmente con el experimento 4 (5mm 60°C, CONTROL) con L^* 50.64. Estos valores indican que el experimento 14 presenta un color más claro que todos los demás, siendo el experimento 4 el más oscuro (mayor oxidación).

Tabla 6 Valores de color L*, a*, b*.

TRATAMIENTOS	L*, a*, b*.	METODO DE SECADO		
		NORMAL (Control)	GAS N ₂ GENERAL	GAS N ₂ LOCALIZADO
3mm 60°C	L*	55.12 ± 1.41	60.73 ± 2.09	65.97 ± 0.26
	a*	3.28 ± 0.51	6.39 ± 0.32	2.17 ± 0.47
	b*	28.59 ± 1.47	29.87 ± 0.48	20.83 ± 1.41
3mm 70°C	L*	58.97 ± 1.30	67.79 ± 2.77	72.84 ± 1.15
	a*	3.65 ± 0.89	4.98 ± 0.52	1.9 ± 0.12
	b*	32.06 ± 1.52	28.24 ± 1.97	28.93 ± 1.77
3mm 80°C	L*	64.95 ± 2.66	66.19 ± 0.15	69.54 ± 0.52
	a*	5.84 ± 0.49	2.02 ± 0.74	1.03 ± 0.12
	b*	28.27 ± 2.2	30 ± 1.18	30.11 ± 1.79
5mm 60°C	L*	50.64 ± 1.17	57.05 ± 1.17	64.9 ± 1.37
	a*	5.47 ± 0.72	6.1 ± 1.3	2.81 ± 0.32
	b*	29.04 ± 1.98	22.11 ± 5.38	25.84 ± 3.27
5mm 70°C	L*	59.49 ± 1.12	63.82 ± 2.06	64.52 ± 0.48
	a*	3.51 ± 0.46	6.54 ± 0.3	3.45 ± 0.53
	b*	22.15 ± 3.83	30.67 ± 2.78	29.59 ± 3.36
5mm 80°C	L*	60.29 ± 3.26	61.86 ± 2.62	63.94 ± 4
	a*	3.59 ± 0.84	5.75 ± 0.49	3.48 ± 0.26
	b*	32.5 ± 1.44	26.24 ± 0.98	29.3 ± 2.69

Media de 3 repeticiones ± DE, Base seca.

Después de haber expresado el color en términos numéricos y objetivos. Se calculó la diferencia de color total (ΔE) de cada tratamiento. (Véase en tabla 7 y figura 27).

Tabla 7 Diferencia de color total (ΔE).

TRATAMIENTOS	DIFERENCIA DE COLOR TOTAL (ΔE)		
	NORMAL (Control)	GAS N ₂ GENERAL	GAS N ₂ LOCALIZADO
3mm 60°C	24.84	21.61	17.39
3mm 70°C	17.4	14.15	11.32
3mm 80°C	18.37	17.69	14.73
5mm 60°C	34.04	22.89	20.86
5mm 70°C	24.72	21.21	17.87
5mm 80°C	25.34	20.69	18.21

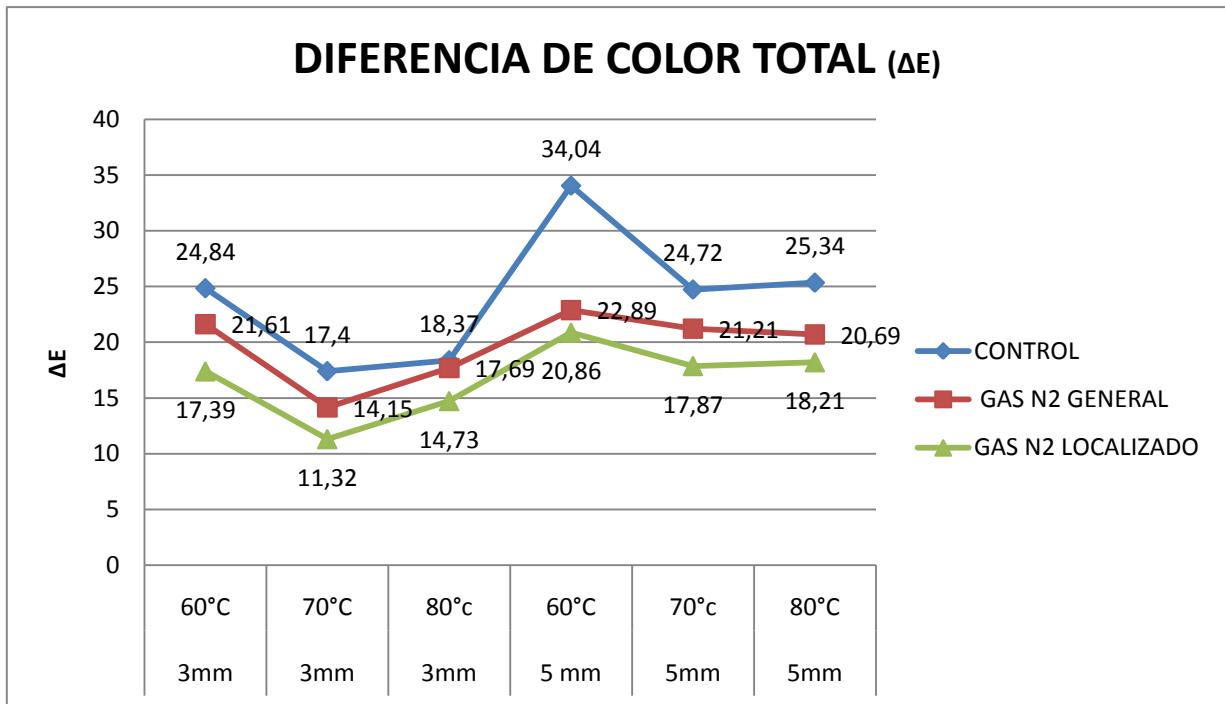


Figura 28. Diferencia de color total (ΔE).

En la figura 27 podemos observar que al inyectar gas N_2 de forma directa (localizado), logramos disminuir la diferencia de color total (ΔE) del banano deshidratado, en comparación con inyectar gas N_2 de manera general y sobretodo del control, que es el que tiene mayor diferencia de color (ΔE).

Por lo tanto podemos determinar que el mejor tratamiento es el experimento 14 (3mm 70°C, GAS N_2 LOCALIZADO), el cual es el que tiene la menor diferencia de color total $\Delta E = 11.32$ de la muestra deshidratada. A si mismo podemos reafirmar que durante el secado convectivo normal (control), los materiales sufren cambios de color indeseables debido al O_2 que se encuentra en la atmosfera del secador. Así mismo el tratamiento que mostro mayor diferencia, fue el experimento 4 (5mm 60°C, CONTROL) con $\Delta E = 34.04$. (Véase en la figura 28 y 29).

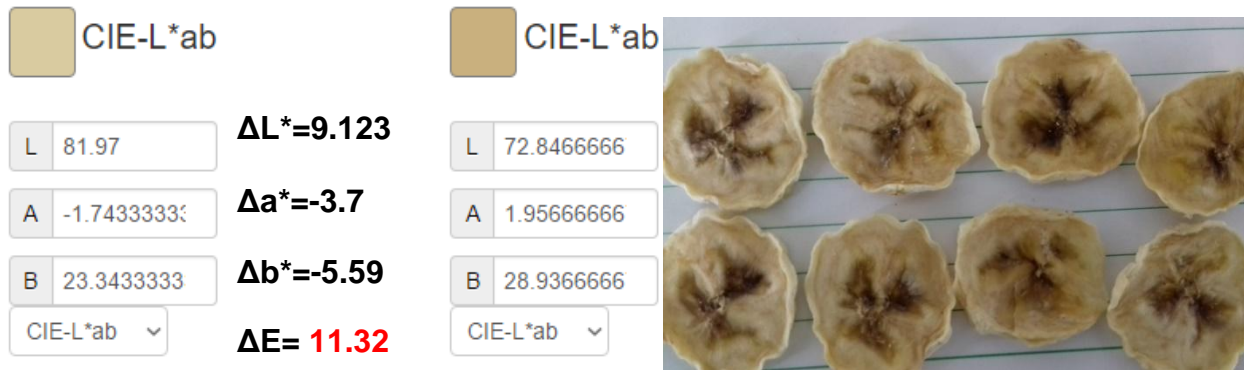


Figura 29. Diferencia de color total (ΔE) del experimento 14.

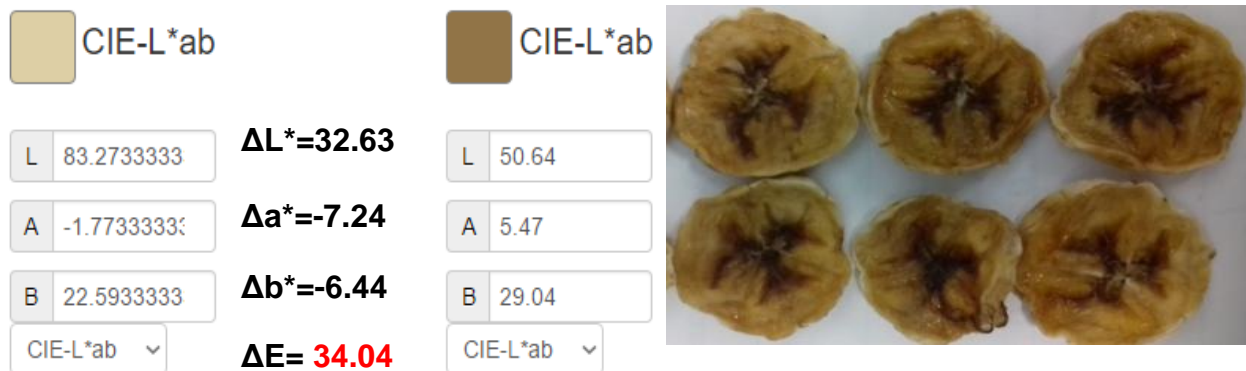


Figura 30. Diferencia de color total (ΔE) del experimento 4.

En la figura 28, se muestra de forma visual el experimento que tuvo menor diferencia de color total con $\Delta E= 11.32$ y así mismo en la figura 29 la que obtuvo mayor diferencia de color total con $\Delta E= 34.04$. En la primera columna de cada figura se muestran los valores de color CIE-L*ab del banano cuando se encontraba como fruto fresco (antes de secar), mientras que en la última columna encontramos los valores de color CIE-L*ab del banano ya deshidratado. Para representar los valores de CIE-L*ab arrojados por el colorímetro en un solo color, podemos ingresarlos en diferentes plataformas de internet, en nuestro caso los ingresamos en la página del siguiente link: <http://colormine.org/delta-e-calculator>.

7.5 Contenido de polifenoles totales.

En la tabla 8, se muestra el contenido de polifenoles totales de cada uno de los experimentos realizados, el experimento 13 (3mm 60°C, GAS N₂ LOCALIZADO) se caracteriza por presentar el mayor contenido de polifenoles con **44.05 mg EAG/gr**, seguido del experimento 14 (3mm 70°C, GAS N₂ LOCALIZADO) con **43.88 mg EAG/gr**, y así sucesivamente hasta llegar al experimento 6 (5mm 80°C, CONTROL) que fue el que tuvo el menor contenido con **30.22 mg EAG/gr**.

Tabla 8 Contenido de Polifenoles totales (EAG) de los tratamientos.

TRATAMIENTOS	COMPUESTOS FENÓLICOS TOTALES mg EAG/gr			
	NORMAL (Control)	GAS N ₂ GENERAL	GAS N ₂ LOCALIZADO	BANANO EN FRESCO
3mm 60°C	42.30 ± 0.38 b, b	42.00 ± 0.834 b, b	44.05 ± 1.92 b, b	55.62 ± 2.59 a
3mm 70°C	35.84 ± 0.76 c, c	41.56 ± 2 b, bc	43.88 ± 0.73 b, b	
3mm 80°C	31.21 ± 0.33 c, de	37.50 ± 2.27 b, bc	41.48 ± 1.07 b, b	
5mm 60°C	34.28 ± 1.89 c, cd	40.58 ± 3.03 b, bc	41.39 ± 1.12 b, b	
5mm 70°C	33.99 ± 0.92 c, cde	37.75 ± 1.02 b, bc	39.88 ± 0.66 b, b	
5mm 80°C	30.22 ± 0.92 c, e	36.19 ± 1.13 b, c	39.29 ± 1.93 b, b	

Media de 3 repeticiones ± DE, Base seca.

Valores con diferente letra en una misma fila, son estadísticamente diferentes (p < 0.05, Prueba de Tukey)

EAG, Equivalente de ácido gálico.

En las siguientes figuras (30, 31, 32, 33, 34, 35) se muestran los ANOVA realizados para cada tratamiento de su contenido de polifenoles totales. De los cuales podemos determinar que existe una diferencia significativa (p<0.05) de todos los experimentos realizados con respecto al banano en fresco.

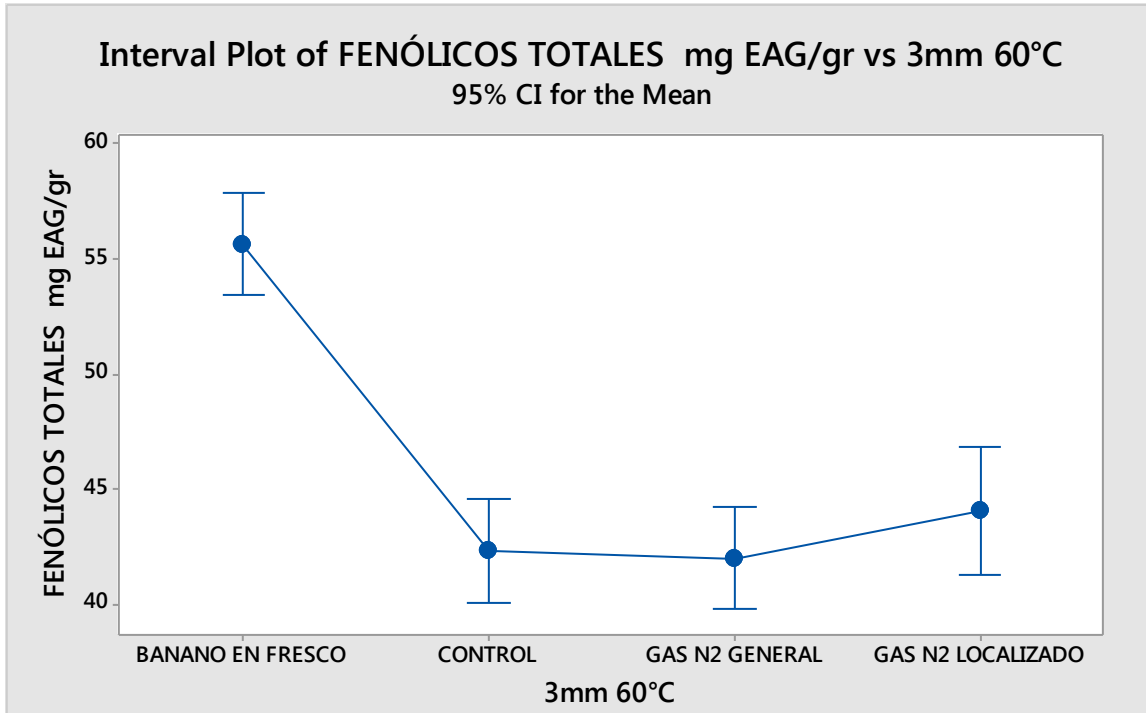


Figura 31 ANOVA mg EAG/gr, 3mm 60°C.

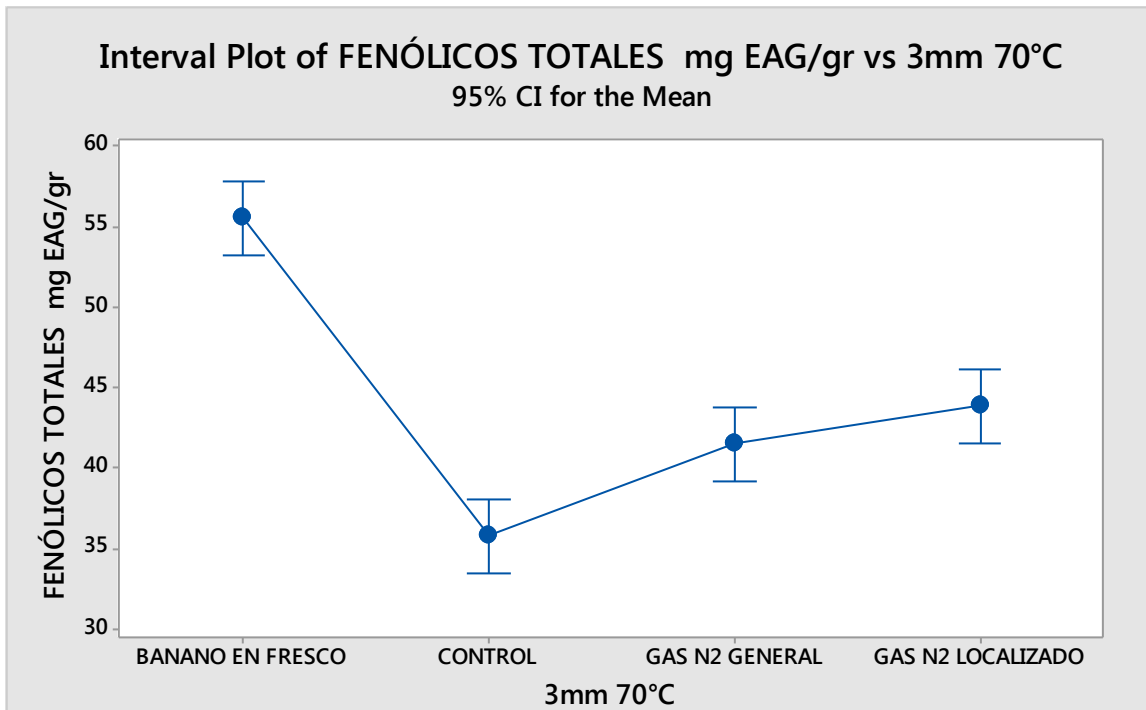


Figura 32 ANOVA mg EAG/gr, 3mm 70°C.

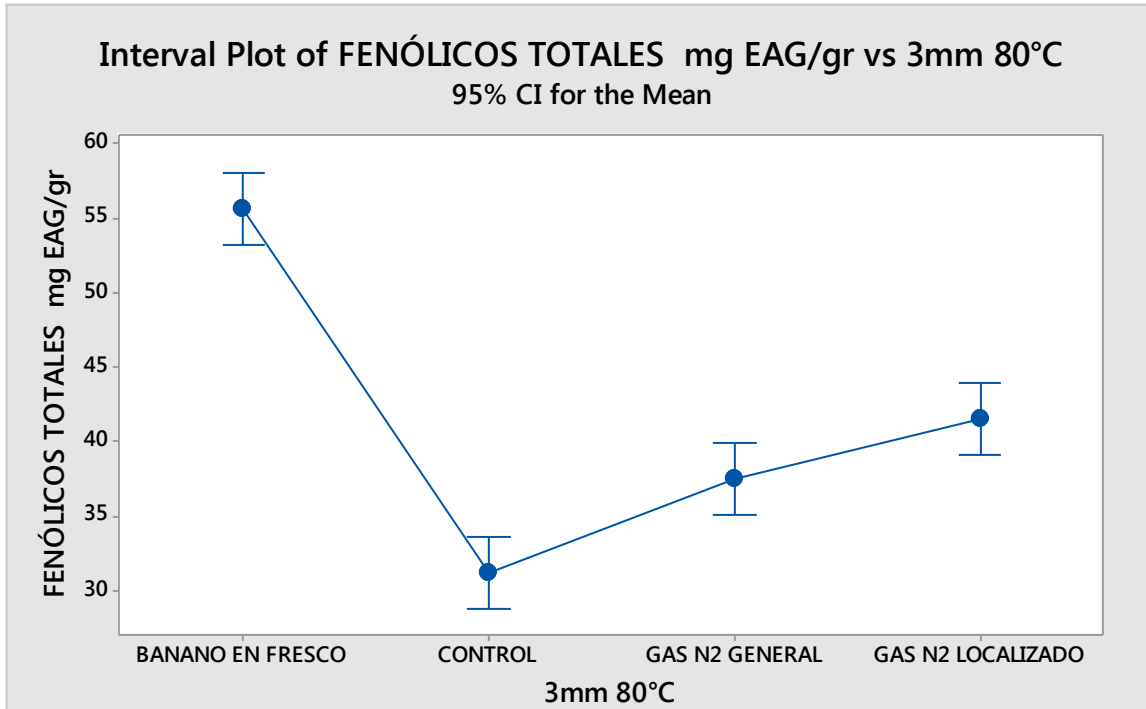


Figura 33 ANOVA mg EAG/gr, 3mm 80°C.

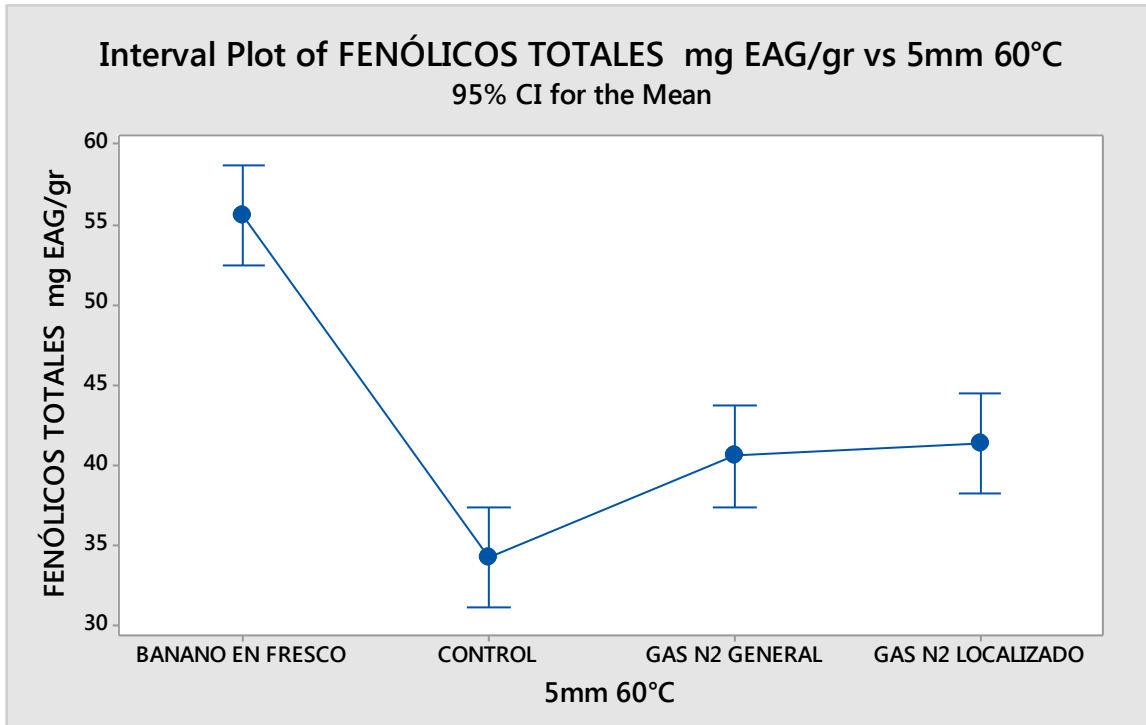


Figura 34 ANOVA mg EAG/gr, 5mm 60°C.

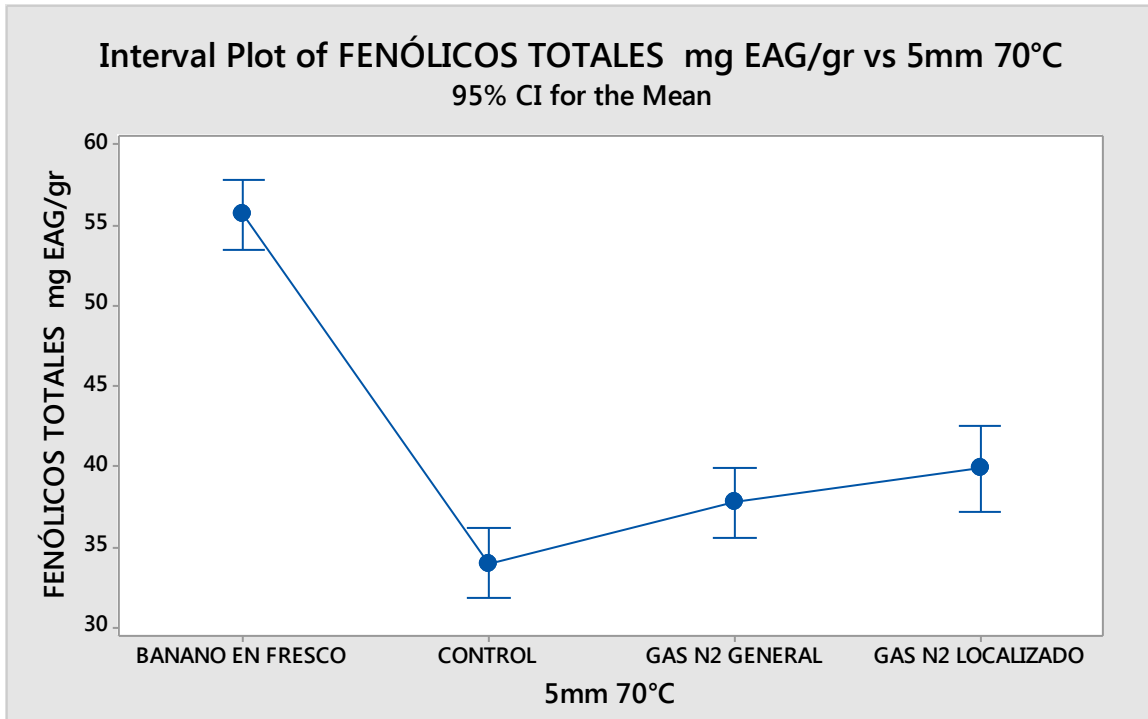


Figura 35 ANOVA mg EAG/gr, 5mm 70°C.

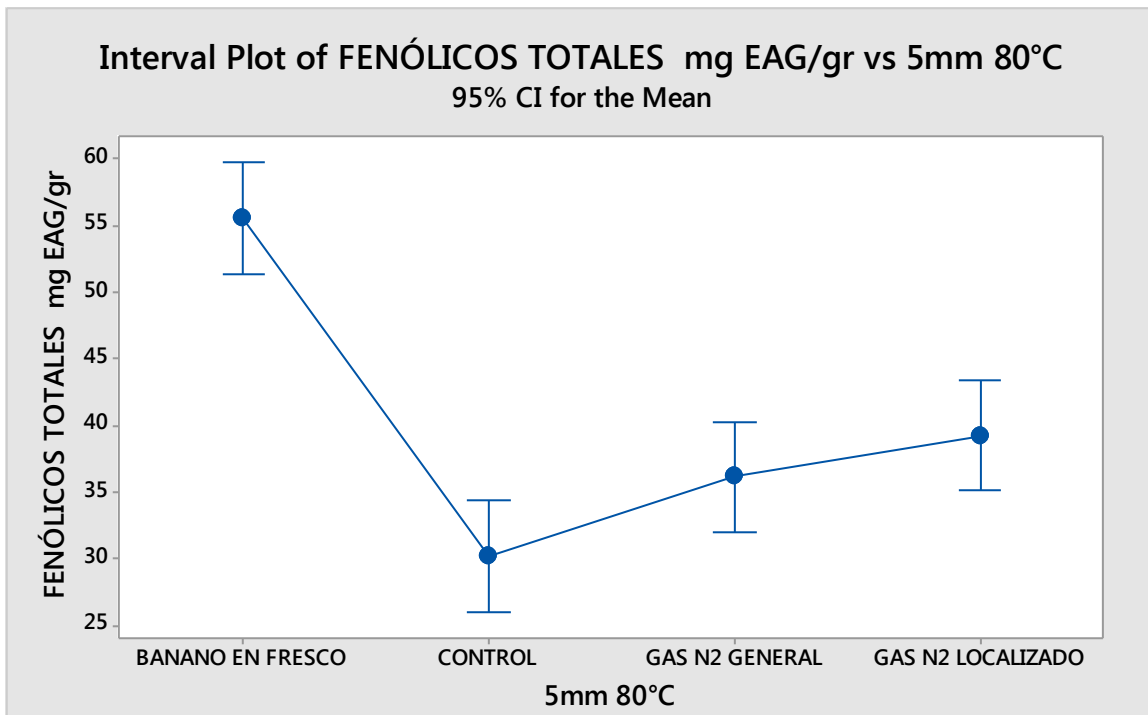


Figura 36 ANOVA mg EAG/gr, 5mm 80°C.

Analizando cada tratamiento con respecto al método de deshidratado podemos observar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el método de secado normal (control) y el de inyectando gas N₂ de una forma localizada, siendo los tratamientos 3mm 80°C y 5mm 80°C los que muestran mayor diferencia, a excepción del tratamiento 3mm 60 °C ya que es el único que **NO** presenta diferencia significativa, los valores de este tratamiento oscilaron en un rango de **42.30–44.05 mg EAG/gr**, estos resultados se pueden asemejar a que este tratamiento es el que usa la temperatura más baja para su deshidratación con 60 °C.

Posteriormente se analizó el método de secado con respecto a cada tratamiento, en las siguientes figuras (36, 38, 40) nos muestran los ANOVA realizados para cada método, enseguida de sus correspondientes pruebas de tukey (figuras 37, 39, 41).

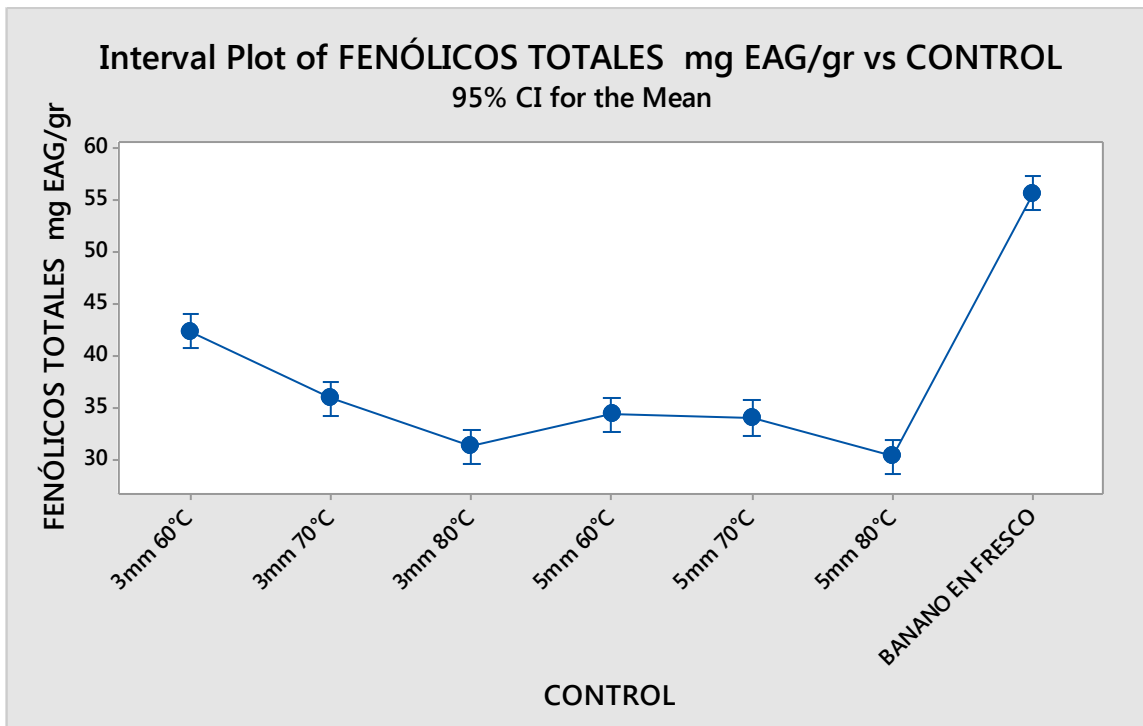


Figura 37 ANOVA mg EAG/gr, CONTROL.

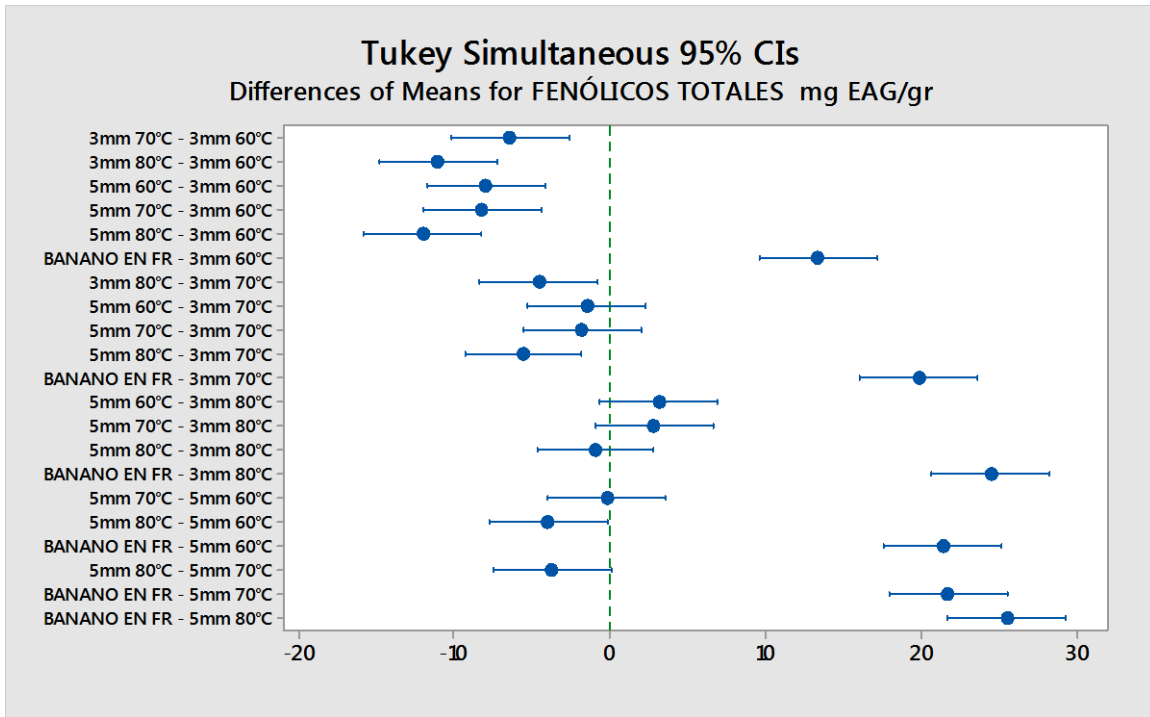


Figura 38 Prueba de tukey, CONTROL.

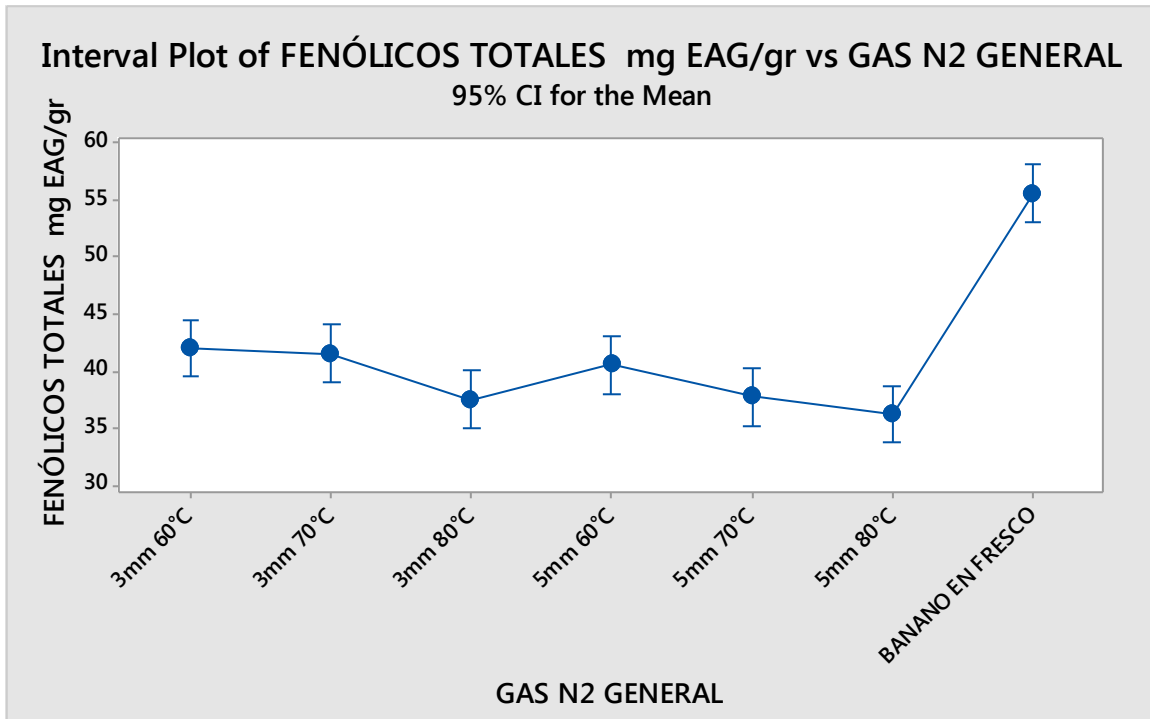


Figura 39 ANOVA mg EAG/gr, GAS N2 GENERAL.

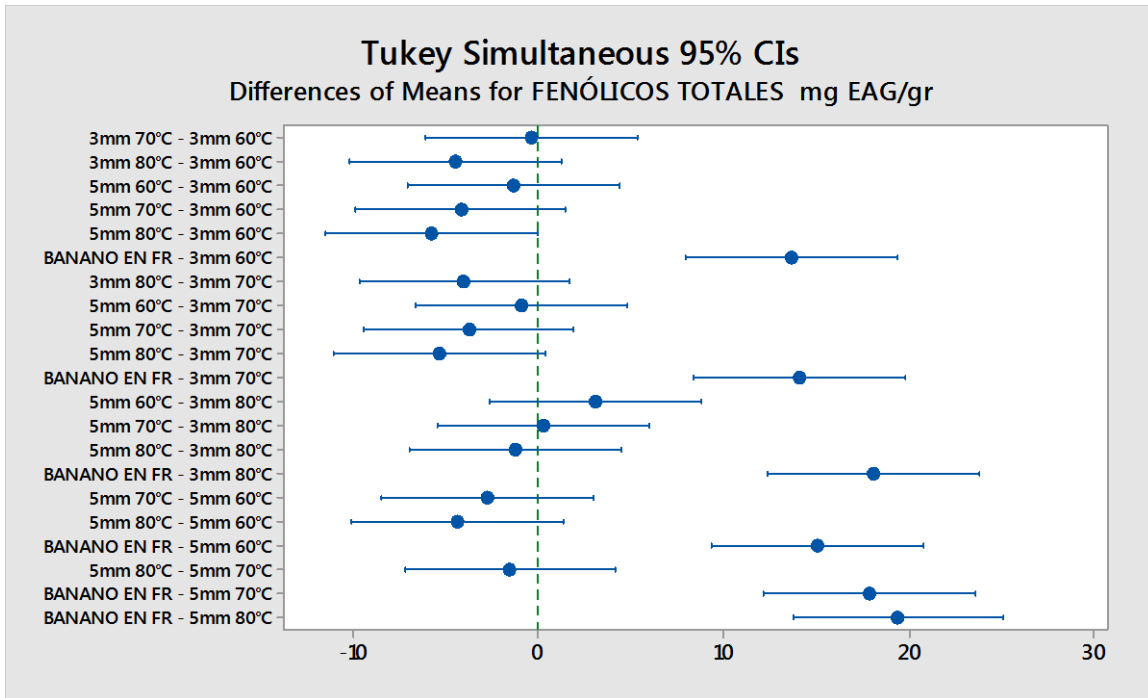


Figura 40 Prueba de tukey, GAS N2 GENERAL.

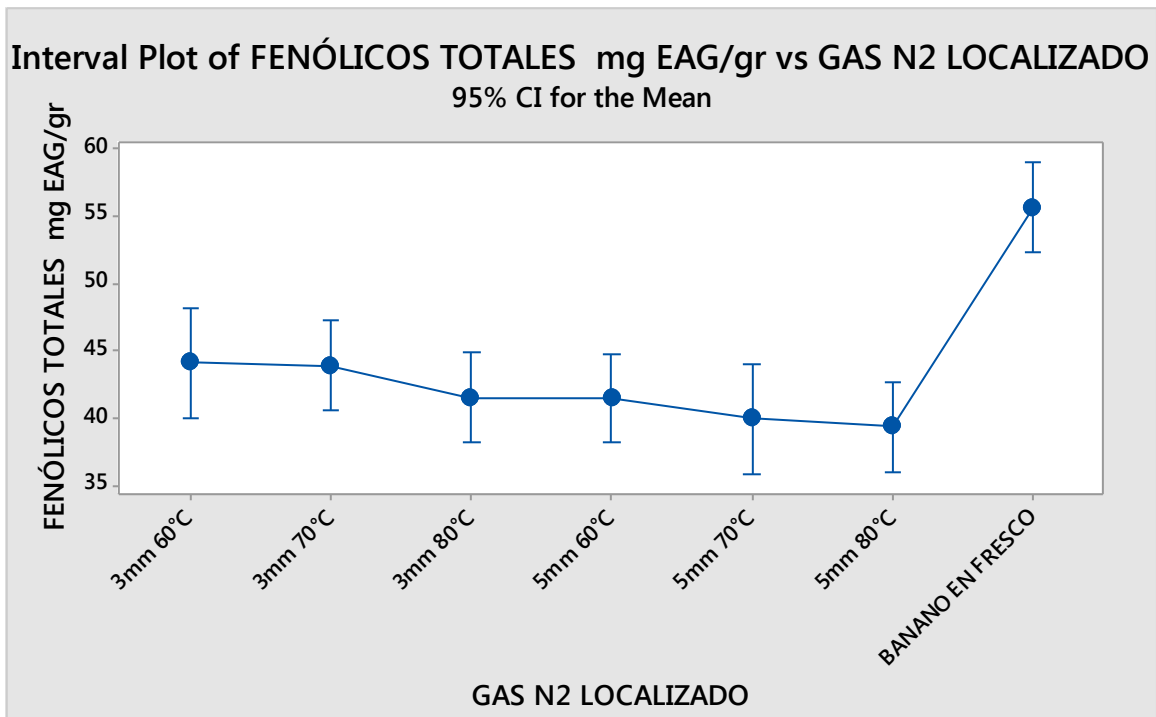


Figura 41 ANOVA mg EAG/gr, GAS N2 LOCALIZADO.

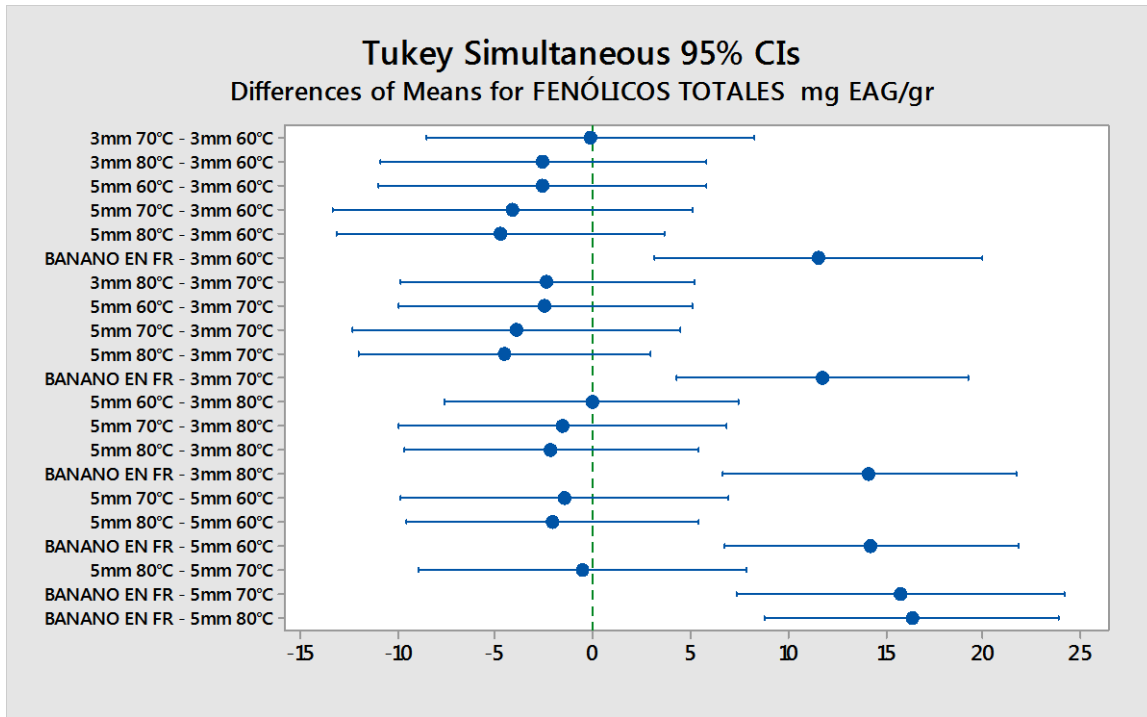


Figura 42 Prueba de tukey, GAS N2 LOCALIZADO.

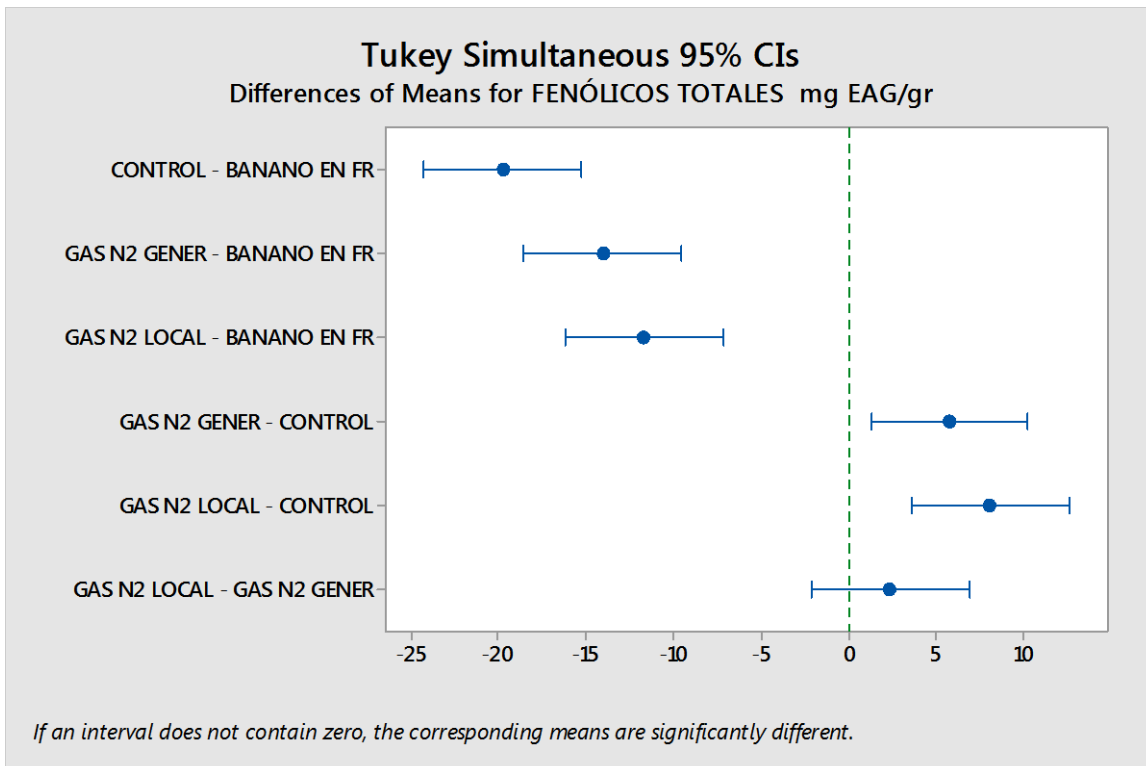
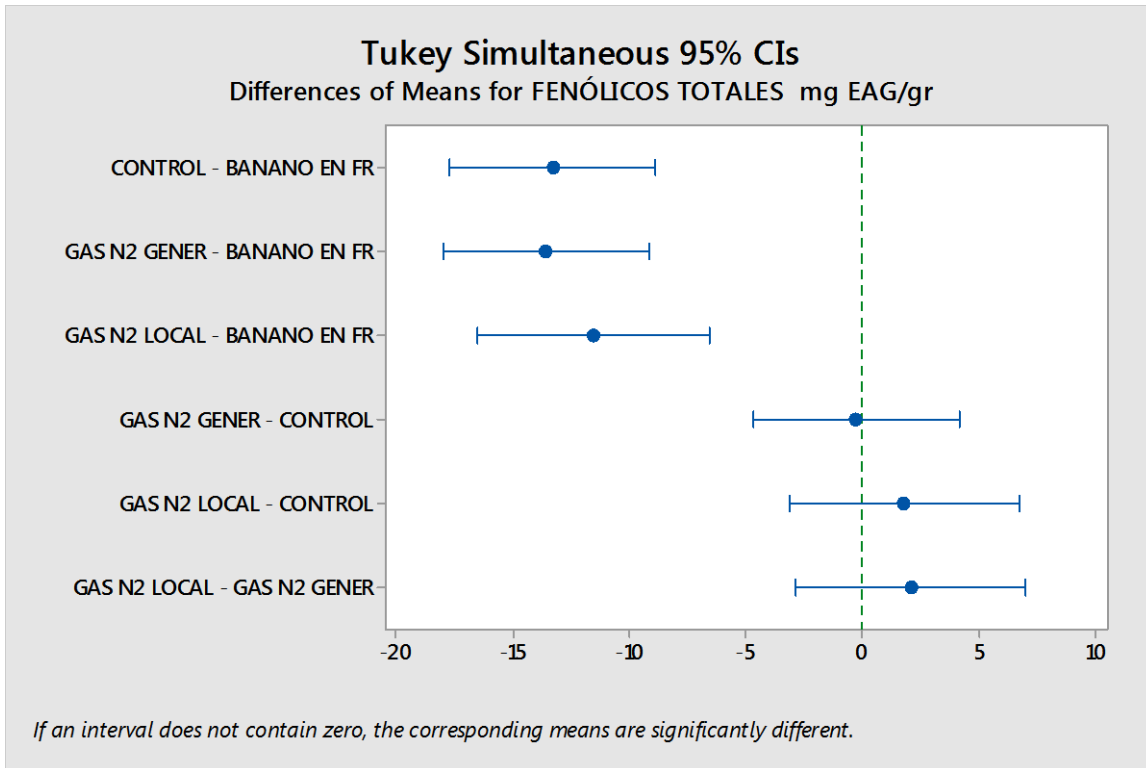
Analizando los ANOVA de cada método de secado observamos que el CONTROL es el que tiene mayor diferencia significativa entre cada tratamiento. El contenido de polifenoles es menor conforme se aumenta la temperatura y el grosor de la muestra a deshidratar, por lo cual el tratamiento 5mm 80°C es el que presenta menor contenido con **30.22 mg EAG/gr**. Así mismo los métodos de GAS N₂ GENERAL y GAS N₂ LOCALIZADO tienen un comportamiento similar siendo este último el que **NO** presenta diferencia significativa sus valores oscilaron en un rango de **44.05–39.29 mg EAG/gr**.

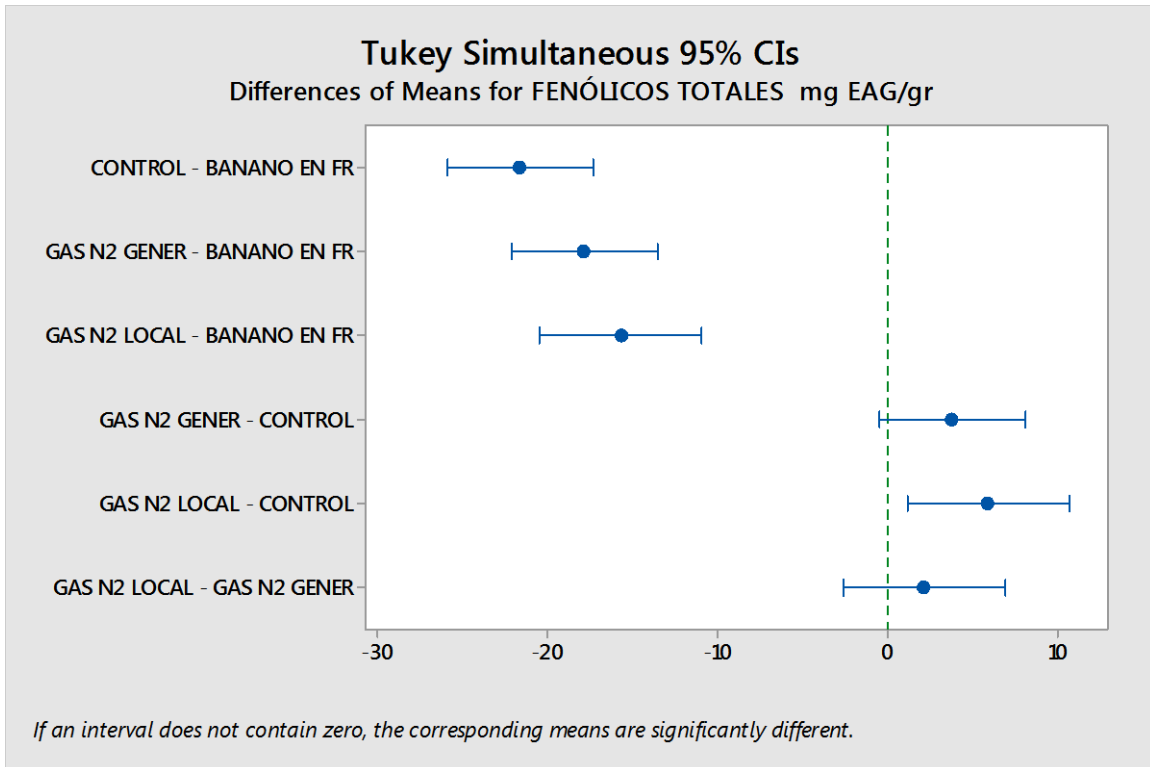
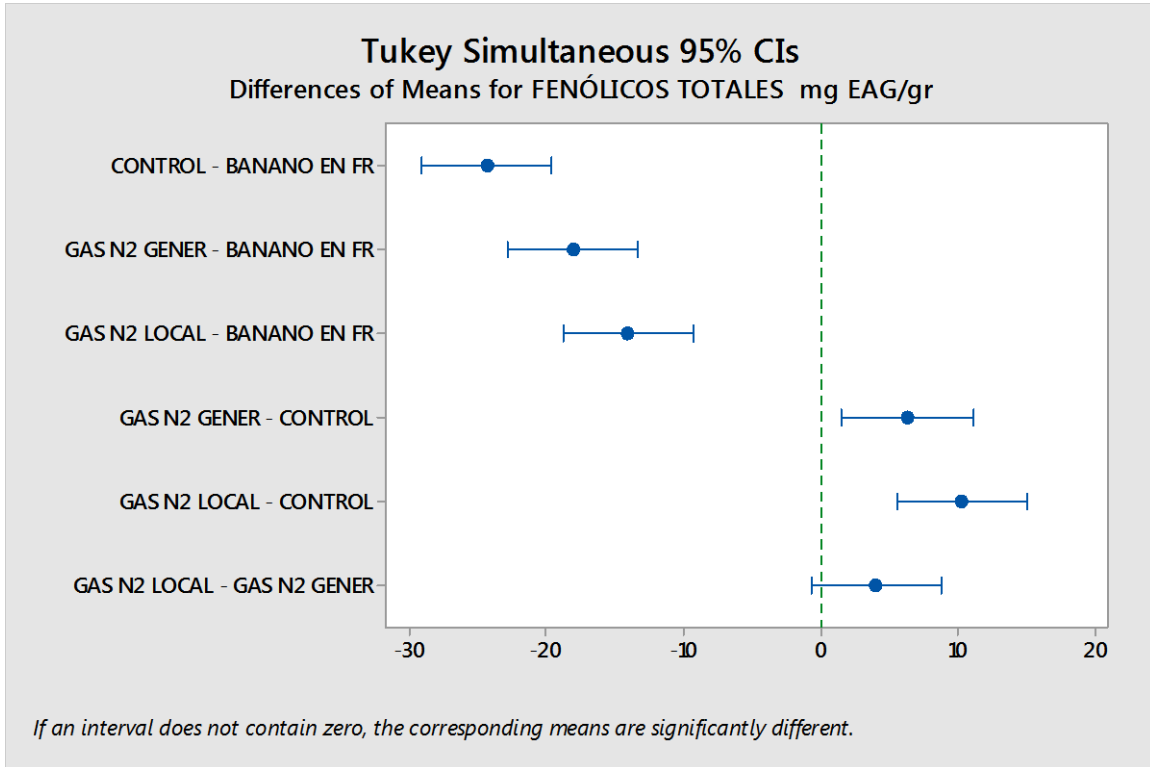
8. CONCLUSIONES

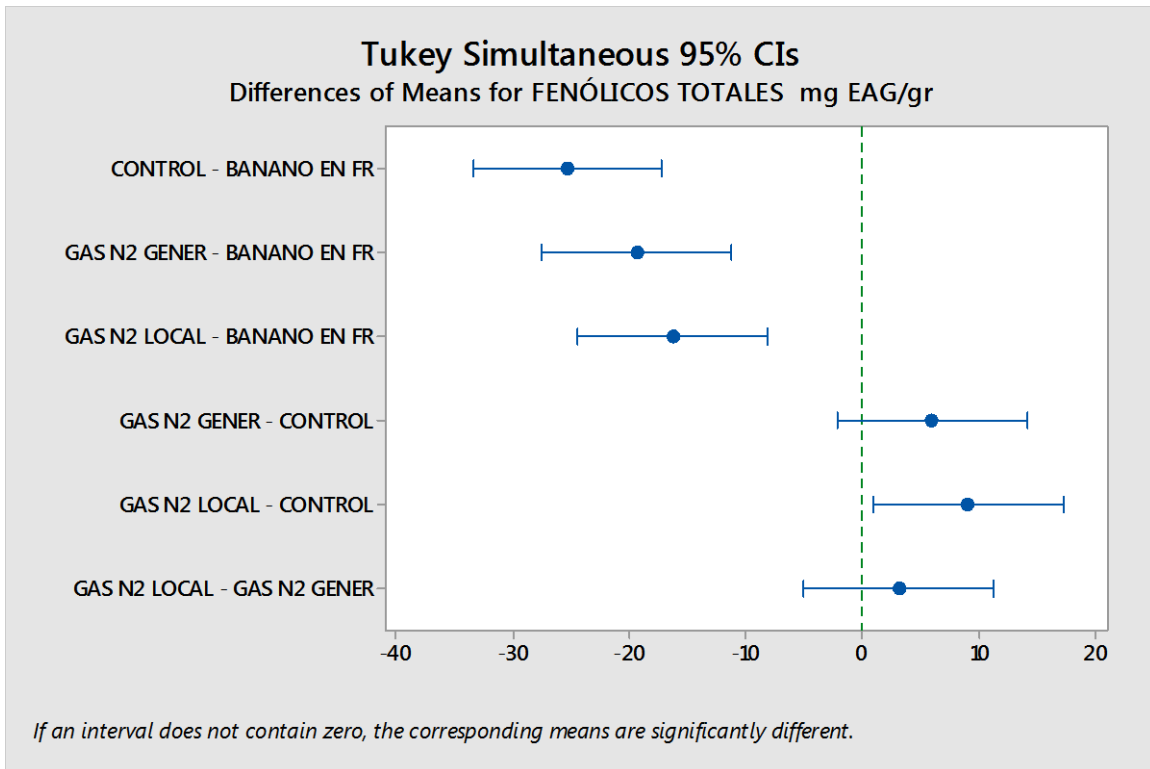
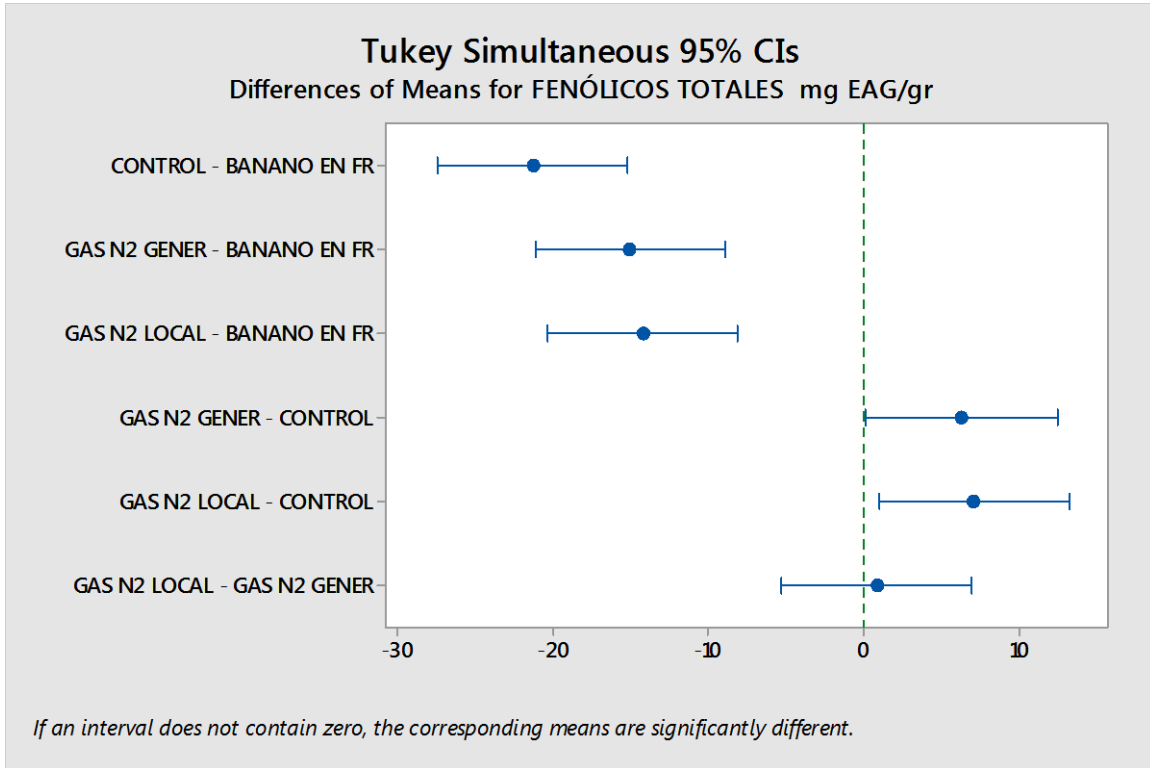
- La temperatura dentro de la cámara del secador no se desplaza uniformemente, ya que solo en las charolas del centro se concentra la temperatura más alta, con una diferencia de 2 °C con respecto a las primeras y últimas tres charolas. Por lo tanto, podemos determinar que la zona optima de secado se encuentra entre la charola 4-7.
- Cada tratamiento necesita un tiempo de secado específico, los cuales son los siguientes: 3mm 60°C con 9 horas, 3mm 70°C con 8 horas, 3mm 80°C con 6 horas, 5mm 60°C con 12 horas, 5mm 70°C con 9 horas, 5mm 80°C con 7 horas.
- A mayor sea el grosor del material a deshidratar, el tiempo requerido también es mayor, debido a que el grosor actúa como resistencia a la difusión del aire caliente.
- La modificación de la atmósfera del secador (inyección de gas N₂) no influye en el porcentaje de la humedad final de las muestras de banano, ni en el tiempo requerido para su deshidratación. Obteniendo valores entre el 6-7 % de humedad para todos los experimentos.
- Respecto al contenido de actividad de agua (A_w) podemos observar una ligera correlación con la temperatura, ya que al deshidratar con la temperatura más alta (80 °C), su A_w es más baja. Los valores oscilaron en un rango de 0.39 a 0.42 de A_w.
- El color final de todos los tratamientos deshidratados presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Por lo cual podemos afirmar que durante el secado convectivo normal, los materiales sufren cambios de color indeseables (pardeamiento/oxidación) debido al O₂ que se encuentra en la atmósfera del secador. Así mismo podemos concluir que al modificar la atmósfera (inyectar gas N₂), podemos reducir esos cambios de color.

- Con el método de secado que se obtuvieron menores cambios de color, fue el de inyectando gas N₂ de una forma directa a la muestra a secar. Resultando como el mejor tratamiento el de 3 mm de grosor a 70°C durante 8 horas (experimento 14), el cual es el que tiene la menor diferencia de color total $\Delta E=11.32$ con respecto a la muestra de banano en fresco.
- En todos los experimentos deshidratados existe una pérdida significativa de polifenoles con respecto al banano en fresco.
- Casi todos los tratamientos presentan una diferencia estadísticamente significativa ($p<0.05$) con respecto al método de secado, siendo el CONTROL y el de GAS N₂ LOCALIZADO los métodos que presentan mayor diferencia entre ellos, los tratamientos 3mm 80°C y 5mm 80°C son los que presentan mayor diferencia con respecto a dichos métodos de secado. El tratamiento 3mm 60 °C es el único que **NO** presenta diferencia significativa, los valores de este tratamiento oscilaron en un rango de **42.30–44.05 mg EAG/gr**, estos resultados se pueden asemejar a que este tratamiento es el que usa la temperatura más baja para su deshidratación con 60 °C.
- En el secado NORMAL Conforme aumenta la temperatura a deshidratar y el grosor de la muestra de banano, el contenido de polifenoles disminuye, por lo cual el tratamiento 5mm 80°C es el que presenta menor contenido con **30.22 mg EAG/gr**.
- Finalmente este estudio nos muestra que si aplicamos N₂ de forma localizada a la muestra a deshidratar, se mitiga la perdida de polifenoles sin importar el grosor ni la temperatura de secado. Los valores de este método oscilaron en un rango de **44.05–39.29 mg EAG/gr**.

9. ANEXOS







10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC Horowitz W. (ed.). (1990). *Methods of analysis of the association of official analytical chemists*, (14th edition). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Brennan, J. G. (2011). *Evaporation and Dehydration*. In: *Food Processing Handbook*, (J. G. Brennan and A. S. Grandison, eds.), Pp. 281-329. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.
- Chacon, S. A., *Manual de procesamiento de frutas tropicales a escala artesanal, en el salvador*. Santa Tecla, La libertad, El Salvador. 2006.
- Chávez- Rodríguez, L. V. (2012). *Estudio de la extracción y preservación de jugo de banano*. Tesis de Doctorado en Ciencias Químicas. Universidad de Colima. 19-20.
- Farias-Cervantes, V.S, Delgado-Licon, E., Solís-Soto, A., Medrano-Roldan, H., Andrade-González, I. (2016). *Effect of Spray Drying Temperature and Agave Fructans Concentration as Carrier Agent on the Quality Properties of Blackberry Powder*. *International Journal of Food Engineering*, 5(12), 451–459.
- Kanazawa, K. y Sakakibara. H. (2000). *High content of dopamine, a strong antioxidant, in Cavendish banana*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 48: 844-848.
- Morales-Delgado, D.Y., Téllez-Medina, D.I., Rivero-Ramírez, N.L., Arellano-Cárdenas, S., López-Cortez, S. Hernández-Sánchez, H., Gutiérrez-López, G. and Cornejo-Mazón, M. (2014). *Effect of convective drying on total anthocyanin content, antioxidant activity and cell morphometric parameters of strawberry parenchymal tissue (Fragaria x ananassa Dutch)*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 1(13), 179-187.

- Morant, A. V., Jorgensen, K., Jorgesen, C., Paquette, S.M., Sánchez-Pérez, R., Moller, B.L y Bak, S. (2008). B-Glucosidasas as detonators of plant chemical defense. *Phytochemistry*. 69: 1795-1813.
- Osboum, A.E. (1999). Antimicrobial phytoprotectans and fungal pathogens: a commentary. *Fungal Genetics and Biology*. 26: 163-168.
- Ospina Meneses, S. M., & Cartagena Valenzuela, J. R. (2008). La atmósfera modificada: una alternativa para la conservación de los alimentos. *Revista Lasallista de Investigación*, 112-123.
- V. Orsat, V. Raghavan, V. Meda, Microwave technology for food processing: an overview, in: H. Schubert, M. Regier (Eds.), *The Microwave Processing of Foods*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 2005, pp. 105–118.
- J.G. Woodroof, B.S. Luh, *Commercial Fruit Processing*, 2nd ed., AVI Publishing Company, Inc., Westport, Connecticut, 1986.
- Scalbert, A y William son, G. (2000). Dietary intake and bioavailability of polyphenols. *The Journal of nutrition*. 130: 2037S-2085S.
- Carlos, G. A. (2010). *Empacado de alimentos* . México: Trillas.
- Colina Irezabal, M. L. (2012). *Deshidratación de Alimentos*. México: Trillas.

Páginas web

<http://www.colormine.org/>

<http://colormine.org/delta-e-calculator>