

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018,
publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CALIDAD



CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE PLÁTANO VERDE EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ALIMENTOS DESHIDRATADOS

TRABAJO RECEPCIONAL QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CALIDAD

Presenta

ALEJANDRO RAMÍREZ DE LOZA

Asesor

MAESTRO JUAN PABLO ZATARAIN HERNÁNDEZ

Tlaquepaque, Jalisco. 15 de noviembre de 2024.

Contenido

1. Fundamentación del trabajo	9
1.1.Descripción del escenario que se planea intervenir y su contexto	9
1.2.Descripción de la problemática percibida que justifica la intervención	10
1.3.Validación de las condiciones del escenario	11
1.4.Análisis del contexto y del entorno de la organización	12
1.4.1. La fuerza de los proveedores.	12
1.4.2. Las fuerzas de los nuevos entrantes y la competencia.	16
1.4.3. Las fuerzas de los compradores y sustitutos.	16
1.4.4. La tecnología	17
1.4.5. Asuntos normativos	18
1.5.Análisis inicial de la problemática: primera hipótesis.	18
1.6.Objetivos de la intervención	27
1.7.Delimitaciones y área funcional por intervenir	28
1.8.Justificación y pertinencia del trabajo	28
2. Marco conceptual de referencia	29
2.1.Secado y equipos	29
2.2.Mecanismos de transferencia en el secado: masa y calor.	31
2.2.1. Condiciones Externas para el secado.	32
2.2.2. Condiciones Internas para el secado.	34
2.2.3. Morfología y composición de la pulpa del plátano.	37
2.2.1. El producto: Harina de plátano.	39
2.2.2. Determinación de humedades.	41
2.2.2.1. Contenido de humedad.	41
2.2.2.2. Humedad libre a_w .	41
2.3.Estado de la cuestión	42
2.4.Conceptos y enfoques teóricos relacionados	47
3. Marco metodológico de referencia	48
3.1.Definición de la metodología del análisis de la problemática, selección de las herramientas requeridas y el cronograma.	48
Medición	49
3.2.Análisis de referencia	53

3.3. Metas de información	53
3.4. Identificación, descripción y cuantificación de métricas iniciales.	54
3.5. Descripción del análisis: correlación e interpretación de la información obtenida.	57
3.6. Definición de los factores prioritarios a intervenir y/o modificar en la problemática.	63
4. Estrategia de intervención.	65
4.1. Justificación de la estrategia de intervención	65
4.1.1. Consideraciones costo/beneficio de la estrategia	65
4.2. Herramientas e instrumentos	67
4.3. Etapas del proceso de aplicación/intervención	67
4.3.1. Cronograma de trabajo	67
4.3.2. Imprevistos	68
5. Exposición de hallazgos	69
5.1. Sistematización y aplicación de escalas de medición de resultados	69
5.2. Organización de la información obtenida	70
5.3. Impacto de la estrategia en la organización	73
6. Discusión final	74
6.1. Consecuencias de la aplicación de la estrategia	74
6.2. Aspectos de mejora para intervenciones subsecuentes	78
6.3. Relevancia y trascendencia disciplinaria del caso	79
7. Anexos. 81	
7.1. Formato de auditoría interna:	81
7.2. Propuesta de procedimiento de operación de secado:	82
7.3. Determinación del contenido de humedad en producto secado.	83
7.4. Formato de ayuda visual	84
8. Bibliografía	85

Índice de figuras

Figura 1.	Proceso de elaboración de harina de plátano por deshidratación.	10
Figura 2.	Importancia del proceso de secado en las propiedades organolépticas.	10
Figura 3.	Las cinco fuerzas de Porter sobre la organización.	12
Figura 4.	Impacto de la producción bananera por región 2018-2020. FAO.2019.	14
Figura 5.	Historial área sembrada- producción de plátano en México 2020. SIAP, 2021.	14
Figura 6.	Producción por estado (ton) SIAP, 2021	15
Figura 7.	Precio / kg de plátano, mercados de la ZMG.	15
Figura 8.	Tendencia del incremento del precio kg de plátano vs incremento de inflación.	16
Figura 9.	Análisis causa-efecto para etapas que impactan al contenido de humedad.	20
Figura 10.	Matriz de prioridades causa-efecto sobre las propiedades del producto.	20
Figura 11.	Temperaturas de operación dentro del horno.	22
Figura 12.	Humedad relativa dentro de la cámara de secado.	23
Figura 13.	Patrones de carga de fruta al secador.	23
Figura 14.	Humedad relativa en el entorno del secador.	24
Figura 15.	Capacidad de proceso para Rendimiento Neto Previo	25
Figura 16.	Diagrama futuro de proceso de secado.	25
Figura 17.	Project charter.	26
Figura 18.	Formas de operar de secadores adiabáticos	30
Figura 19.	Tipos de secadores adiabáticos	30
Figura 20.	Secadores horizontales continuos, no adiabáticos.	31
Figura 21.	Mecanismos de transferencia calor y masa en el proceso de secado de un sólido.	32
Figura 22.	Carta psicrométrica.	33
Figura 23.	Las cuatro etapas del secado en condiciones constantes.	35
Figura 24.	Condiciones de temperatura y humedad en los alrededores del sólido.	35
Figura 25.	Etapas propuestas de calentamiento y secado de la partícula.	36
Figura 26.	Comportamiento esperado del aire de salida.	37
Figura 27.	Flor hembra del plátano.	38
Figura 28.	Cortes longitudinal, oblicuo y transversal.	38
Figura 29.	Ejemplo de cálculo de a_w por interpolación de humedades en equilibrio.	42

Figura 30.	Curvas de secado de manzana temperaturas y velocidades de aire.	43
Figura 31.	Variables de proceso de secado para este equipo particular.	49
Figura 32.	Análisis impacto-control-mitigación de variables.	50
Figura 33.	Esquema del horno de secado y ubicación de instrumentos.	53
Figura 34.	Valores de respuesta esperados 1ª implementación.	54
Figura 35.	Temperatura del medio de calentamiento (°C), 1ª implementación.	57
Figura 36.	Peso de pulpa cargada al horno (kg), 1ª implementación.	57
Figura 37.	Tiempo de ciclo (h), 1ª implementación.	58
Figura 38.	Rendimiento neto (kg pulpa seca / kg pulpa cargada, %), 1ª implementación.	58
Figura 39.	Temperaturas dentro de cámara, 1ª implementación.	59
Figura 40.	Humedades relativas dentro de cámaras, 1ª implementación.	59
Figura 41.	Relación de temperaturas interiores vs temperatura del medio de calentamiento.	60
Figura 42.	Variables de proceso, 1ª implementación.	61
Figura 43.	Gráfica de cubo para las variables controladas y respuesta.	64
Figura 44.	Temperatura del aire caliente	71
Figura 45.	Pérdida de peso en el tiempo.	71
Figura 46.	Rendimiento neto en el tiempo.	72
Figura 47.	Comparación de condiciones de operación y respuesta previas y actuales.	76
Figura 48.	Comparación de intervalos de confianza de medias y varianzas Actual y Previo.	76
Figura 49.	Capacidad del proceso Previa y Actual al implementar acciones de mejora.	77

Índice de tablas

Tabla 1. Condiciones y compromiso para la intervención.	12
Tabla 2. Producción regional de banano y plátano 2019. FAO,2021.	13
Tabla 3. Producción de banano y plátano en las Américas 2019. FAO.2021.	13
Tabla 4. Comparativo nutrimental de diversas harinas.	17
Tabla 5. Voz del Cliente (VOC) y Críticos Para la Calidad (CTQ's).	19
Tabla 6. SIPOC del proceso de elaboración de harina por deshidratación.	21
Tabla 7. Eficiencia de los ciclos de secado	22
Tabla 8. Clasificación de los equipos de secado	29
Tabla 9. Composición química del plátano de variedades y estados de madurez.	40
Tabla 10. Referencias de parámetros de operación de secadores diversos.	45
Tabla 11. Efectos de los diferentes tipos de secado en la harina de plátano.	46
Tabla 12. Matriz DMAIC de herramientas de calidad.	48
Tabla 13. Listado de instrumento de proceso y equipo de secado	52
Tabla 14. Datos de secado, 1ª implementación	56
Tabla 15. Regresión factorial para las variables de proceso controlables.	62
Tabla 16. Validación del módulo matemático	63
Tabla 17. Valores de variables para un rendimiento neto optimizado	64
Tabla 18. Cronograma de implementación	67

Upi, siempre junto, siempre fuerte, siempre conmigo.

Pichosín, Boyeguito, admiro su audacia, valentía y perseverancia; visionen y persigan, y con esos valores consigan sus sueños.

Mis papás y mis hermanos, familia, semilla de virtudes y sabidurías para acompañar.

Muy agradecido por la paciencia, soporte y orientación de Juan Pablo y Pablos. A los profesores que estuvieron en todo este trayecto, gracias por compartir conocimiento.

Gracias Margarita por permitirme trabajar en tu emprendimiento, con mi expectativa de que este proyecto te sea de gran utilidad.

A todos los que están en mi historia, mi profundo cariño.

Abstract

Se trabaja en una fábrica de alimentos deshidratados y en especial sobre plátano verde para la fabricación de harina, con el objetivo de determinar aquellos parámetros en el secador que puedan controlarse para que en base a estos se obtenga un rango de contenido de humedad en el producto terminado de entre 5 y 10%. Estos parámetros son: temperatura del medio de calentamiento, el más importante, la cantidad de pulpa cargada al horno, y el tiempo de ciclo.

El horno de secado es de manufactura propia construido sin un rigor técnico que facilite la operación y control de las variables de diseño propias de la operación unitaria de secado; consta de dos cámaras con un distribuidor de aire caliente en el centro, la fruta se pela y rebaja en rodajas que se colocan en charolas perforadas y se ingresan sobre guías.

Se analizan datos históricos que sirvan de base de partida y con promedios: temperatura del medio de calentamiento de aire 65°C, carga de pulpa 48.8 kg, tiempo de ciclo 23.8 h, y un contenido de humedad en un rango de 5.37 a 13.5%

De estos se obtiene un criterio de avance en 75°C, 50 kg y 24 h. Se realizan 7 corridas intentando controlar estas variables; no es posible controlar la carga de pulpa por problemas combinados de la demanda y el suministro de la fruta, de manera que la principal variable es la temperatura del medio de calentamiento. Se revisa la operación del secador y se aplica control sobre la válvula de escape de aire y vapor.

La combinación de tres estas acciones arrojan resultados sin valores atípicos en las variables, que muestran un control de temperatura más estrecho a promedio de 73.9°C, y que impacta a favor estabilizando las temperaturas al interior de la cámara en 44.3°C; la carga se hace más uniforme, aunque no necesariamente limitada en un rango 39.7 kg; el principal resultado es la estabilización del rango del contenido de humedad dentro de la especificación marcada de 5 a 10%, siendo de 8.3 a 10%, y el tiempo de ciclo en 26.2 h.

El análisis de comparación de medias y varianzas de las dos poblaciones resultan en que no existe evidencia estadística significativa para suponer que ambas poblaciones son iguales.

Palabras clave: Harina, secado, plátano verde.

CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE PLÁTANO VERDE EN UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ALIMENTOS DESHIDRATADOS

1. Fundamentación del trabajo

1.1. Descripción del escenario que se planea intervenir y su contexto

DMX es una microempresa con una plantilla de 6 personas, iniciada en el 2021 y dedicada a la elaboración y venta de alimentos deshidratados, orientando sus procesos a formas elementales para que en los productos se minimice o elimine el uso de aditivos y conservadores, adicionalmente, la utilización de energías limpias, no solo por costos de operación, sino también como un compromiso de contribuir en su proporción al medio ambiente.

Ahora DMX tiene dos productos de harina de plátano verde, una de fórmula para preparación directa y otra para cocinar. Las personas que operan y las instalaciones siguen en medida suficiente los conceptos de las Buenas Prácticas de Manufactura, que es un conjunto de consideraciones a las metodologías de cada etapa a fin de asegurar la calidad de los productos a través del control de los procesos, dar trazabilidad, y reducir los riesgos de contaminación, y que los productos sean eficaces y seguros. La tecnología de DMX es propia y tiene el atributo de operar su equipo de secado con el calor ganado de la energía solar.

Por otra parte, el concepto de los productos está pensado en dirigirlos a nichos de mercado específicos que tienen interés por la salud personal y de su entorno, ya sea voluntario o por prescripción, formando una cadena de conciencia del cuidado personal y medioambiental a través del consumo de productos fabricados en esa armonía.

También está el plan de desarrollar el mercado de exportación, de hacer llegar productos mexicanos a Estados Unidos, y para esto la conserva por deshidratación es una consideración importante dados los tiempos de trayecto y espera, pero muy posiblemente impliquen otros métodos de fabricación para el mismo fin, con los denominadores comunes para ambos mercados, de ser alimentos sanos, de calidad segura, y con procesos ambientales.

La materia prima, plátano verde, es traído de Colima en condiciones de intemperie y al llegar a planta se descarga para luego dar un tratamiento sanitario y refrigeración hasta su disposición; enseguida se prepara manualmente para el secado, molienda, y envasado, y el acondicionado final (figura 1).

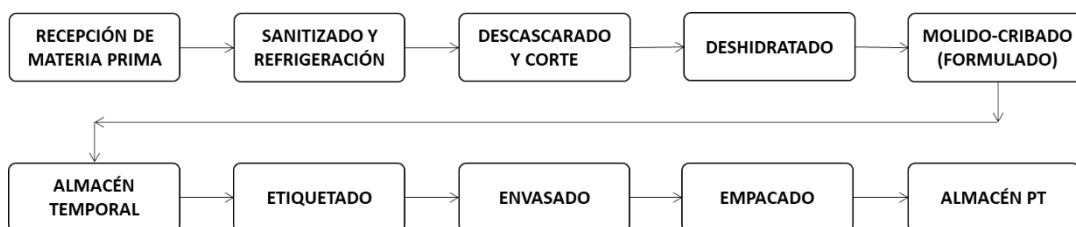


Figura 1. Proceso de elaboración de harina de plátano por deshidratación.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso de secado por deshidratación es una forma de conserva de alimentos que consiste en eliminar la humedad contenida hasta valores donde no sea propicio el crecimiento de microorganismos y retardar a la vez su descomposición. En este contexto, la etapa de secado es la más importante dado que las anteriores y posteriores ayudan a acondicionar la materia prima, y después el material ya secado, para la molienda, envasado y dar presentación.

De la calidad del procesamiento de esta etapa dependen en gran medida la calidad organoléptica y microbiológica del producto; y para que estos sean consistentes es importante determinar los parámetros de operación del equipo de secado, así como las especificaciones del producto en proceso y terminado (Figura 2).

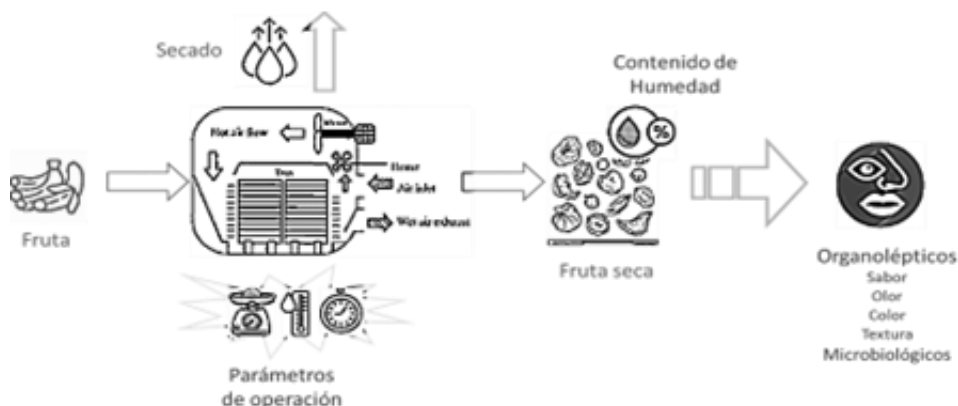


Figura 2. Importancia del proceso de secado en las propiedades organolépticas.
Fuente: Elaboración propia.

1.2. Descripción de la problemática percibida que justifica la intervención

El proceso de secado que se utiliza en DMX es el más común en la industria, un horno de circulación forzada de aire caliente a través de charolas que portan las rebanadas de plátano; la condiciones de operación: temperatura y velocidad del aire, la cantidad total de kilogramos de plátano

a secar, el tamaño de la rebanada, y las condiciones del aire de alimentación, así como algunas consideraciones de construcción y del manejo del equipo, son datos que deben estar definidos para lograr que el producto final tenga un contenido de humedad dentro de un rango en el que no afecte las propiedades organolépticas, principalmente causadas por el crecimiento microbiológico que la humedad libre en el material favorece su crecimiento.

La intención de la intervención es la de participar en la definición de estos parámetros y cambiar o mejorar algunos detalles de construcción y manejo del material, para estandarizar su operación y, en consecuencia, la calidad del producto influenciada por el contenido de humedad.

En este contexto y al tiempo del estudio es que se han procesado tres entregas de plátano verde con un total de 43 ciclos de secado, que han presentado variaciones en el peso de la carga al secador, en las temperaturas de procesamiento, en la humedad relativa dentro de la cámara, y tiempos del ciclo; además de 3 reprocesos (7% de los ciclos totales) y dos cargas completas a la merma que representan el 5% del total fabricado.

Existen algunos parámetros y especificaciones que se han ido implementado y mejorando conforme se han obtenido resultados empíricos, y que, junto con pruebas manuales que se utilizan para toma de decisiones pasa-no pasa, pero estos no aseguran la consistencia en la calidad del producto, así que, al no tener parámetros de operación del secador y especificaciones numéricas y sensoriales para el producto en proceso y terminado, ha impactado en la calidad y en los costos asociados por reprocesos, mermas, y sobreprocesamiento.

Del análisis y mejoras al proceso de secado se espera que regresen beneficios directos por la creación de un proceso de secado estable y repetible que contribuya sustancialmente al aseguramiento y consistencia de la calidad del producto terminado; que se incremente la eficiencia y eficacia de la etapa, facilite la procesabilidad en las etapas siguientes, controle el costo de operación, reduzca los retrabajos, mejore la productividad, y evite los rechazos.

1.3. Validación de las condiciones del escenario

Por los beneficios de las mejoras al proceso, la necesidad de una calidad consistente, y el compromiso de un producto seguro, además de que el proyecto se puede acompañar con el desarrollo de nuevos productos, es del interés de la Dirección de DMX ofrecer la disposición y disponibilidad para recibir y promover las implementaciones que se presenten a lo largo de la ruta, (tabla 1).

Condiciones y compromiso para la intervención					
Apertura al cambio		Avance en procesos	Dificultad de implementación	Instalaciones	Tiempo estimado
Dirección	Personal				
100%	100%	80%	30%	90%	12-18 meses

Tabla 1. Condiciones y compromiso para la intervención. (propia)

El proyecto por su naturaleza implica desde la consulta de normas obligatorias y opcionales sobre las que se desahoguen los requisitos, referencias bibliográficas para ahondar en el conocimiento de la materia prima, el proceso de secado, y del producto; se requerirán corridas de prueba con el equipo, con algunas modificaciones y a los flujos de proceso; todo esto solo para el diseño de los parámetros del secador, la creación de nuevos documentos de control, entrenamiento e implementación. En este panorama ideal habrá que sumar imponderables, de forma tal que el tiempo para este plan se estima alrededor de doce a dieciocho meses.

1.4. Análisis del contexto y del entorno de la organización

En el marco de análisis de las cinco fuerzas de Porter:



*Figura 3. Las cinco fuerzas de Porter sobre la organización.
Fuente: Elaboración propia.*

1.4.1. La fuerza de los proveedores.

La producción de plátano tiene comportamientos predecibles que ofrecen un nivel razonable de certeza en la previsión en el abasto y precio. En la perspectiva de las políticas públicas para el control de la inflación en mayo del 2022, el gobierno llegó a acuerdos con productores y distribuidores para un plazo inicial de seis meses (EL Financiero, 2022) en los que el plátano no está considerado dentro

de los productos de la canasta básica en control, lo que de alguna manera ayuda a tener una visión clara de su comportamiento en el mercado.

El cultivo de plátano es en zonas húmedas y cálidas, se pueden cosechar durante todo el año siempre que haya condiciones de humedad suficientes, con la salvedad de la influencia del clima. De acuerdo con un estudio publicado (Secretaría de agricultura y desarrollo rural, 2020) África, América y Asia son los continentes con mayor producción, pero Europa es el que tiene el mejor rendimiento 35.5 ton/ha, mientras que aquellos tienen valores de 7.7, 18.9, y 28.9 ton/ha respectivamente. El comportamiento de la producción para 2019 es más fuerte en América del sur con el 61.1% del total de las Américas que fue de 38´433,388 ton, pero el mayor rendimiento fue en América central con 36.7 ton/ha. (Figuras 3 y 4).

Región	Superficie cosechada (ha)	%	Volumen producido (ton)	%	Rendimiento (ton/ha)
África	6,297,277	57.9%	48,187,209	30.4%	7.7
Américas	2,089,708	19.2%	39,433,388	24.9%	18.9
Asia	2,363,028	21.7%	68,312,674	43.1%	28.9
Europa	17,980	0.2%	638,270	0.4%	35.5
Oceanía	105,307	1.0%	1,790,139	1.1%	17.0
Total	10,873,300	-	158,361,680	-	14.6

Tabla 1. Producción regional de banano y plátano 2019. FAO, 2021.

Tabla 2. Producción regional de banano y plátano 2019. FAO,2021.

Fuente: (Secretaría de agricultura y desarrollo rural, 2020)

Región	Área cosechada (ha)	%	Producción (ton)	%	Rendimiento (ton/ha)
América central	305,164	14.6%	11,210,746	28.4%	36.7
América del Sur	1,482,477	70.9%	24,082,444	61.1%	16.2
América septentrional	347	0.02%	3,793	0.01%	10.9
El Caribe	301,720	14.4%	4,136,405	10.5%	13.7
Total	2,089,708	-	39,433,388	-	18.9

Tabla 2. Producción de banano y plátano en las Américas 2019. FAO, 2021.

Tabla 3. Producción de banano y plátano en las Américas 2019. FAO.2021.

Fuente: (Secretaría de agricultura y desarrollo rural, 2020)

La proyección mundial para 2028 se observa en crecimiento gradual marginal de 0.6 MM ton/año que son el 0.38%, pero principalmente por la aportación de las Américas que sería de 1.4 MM ton/año equivalente al 3.6%.

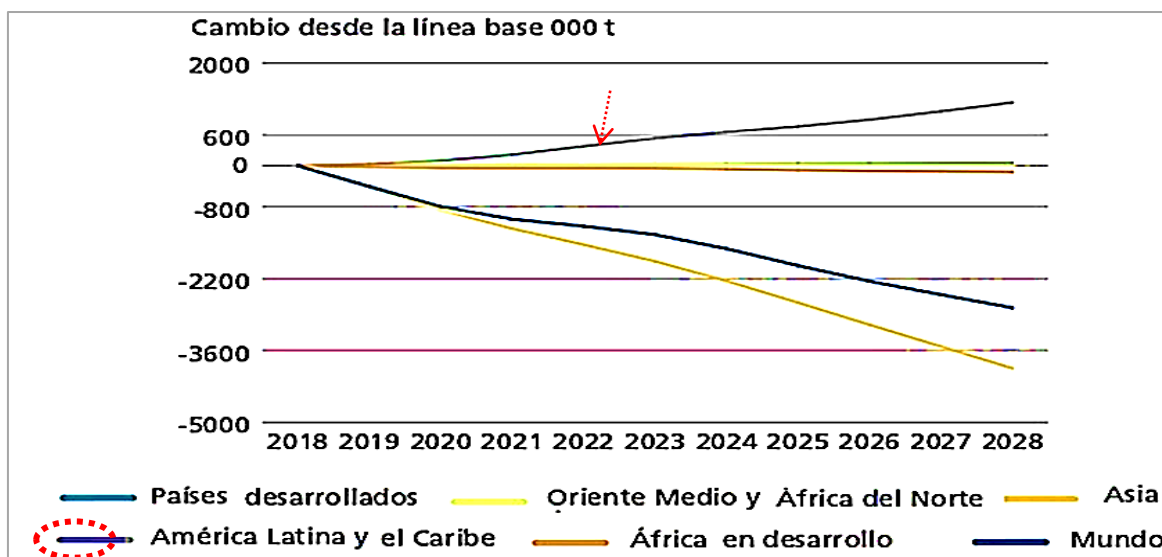


Figura 4. Impacto de la producción bananera por región 2018-2020. FAO, 2019.
Fuente: (Secretaría de agricultura y desarrollo rural, 2020).

Acotando, México ocupa el lugar 20° a nivel mundial de superficie cultivada y el 12 en producción. A nivel nacional la producción se incrementó en 9.6% en los últimos 20 años a partir del 2000 (figura 5).

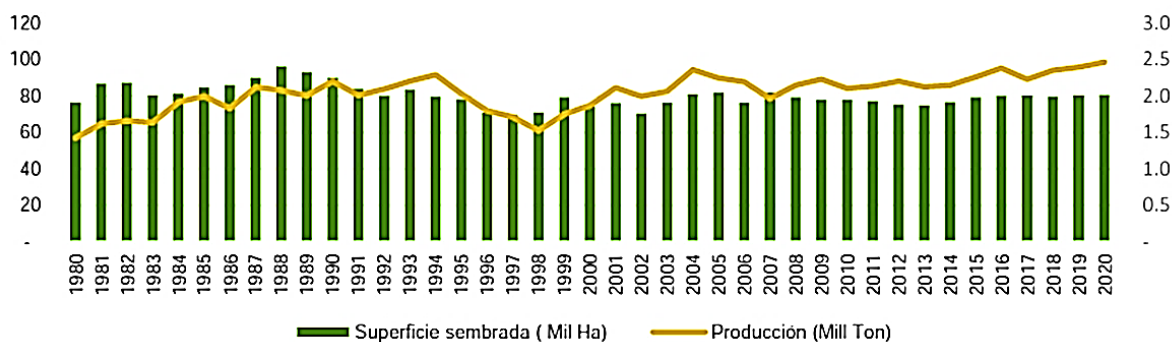


Figura 5. Historial área sembrada- producción de plátano en México 2020. SIAP, 2021.
Fuente: (Secretaría de agricultura y desarrollo rural, 2020)

En la participación por estado (figura 6) Colima y Jalisco tienen una producción similar, pero por la superficie cultivada Jalisco tiene 43% más rendimiento que Colima.

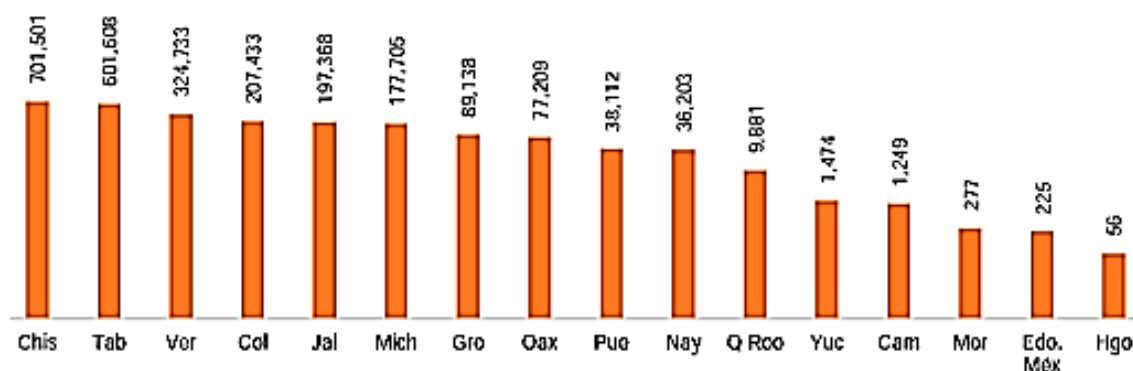


Figura 6. Producción por estado (ton) SIAP, 2021
Fuente: (Secretaría de agricultura y desarrollo rural, 2020).

La Secretaría de economía refiere el desenvolvimiento de los precios del plátano desde el 2013 al 2021 (figura 7) de los datos tabulados (Secretaría de economía, 2022), con un incremento del 149% en ocho años; pero de acuerdo a la calculadora del INEGI (INEGI), la inflación desde enero del 2013 a diciembre del 2021 ha sido del 45.02%, pero el comparativo de los precios contra los niveles de inflación se muestran sustancialmente opuestos (figura 8).

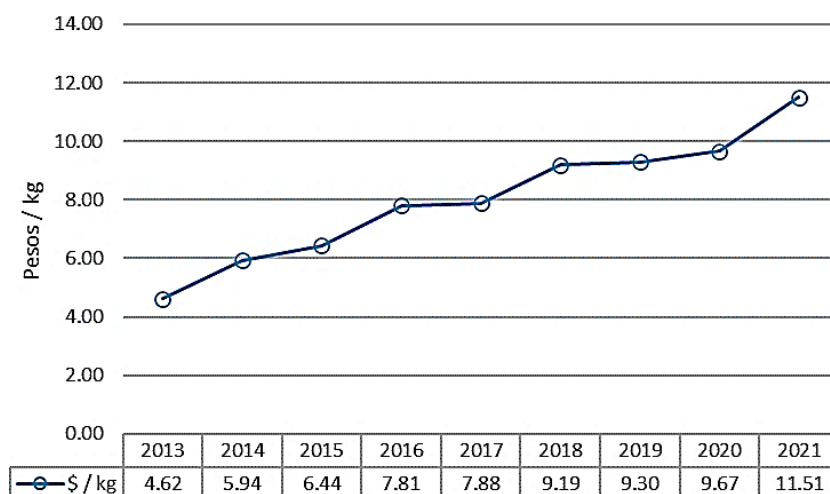


Figura 7. Precio / kg de plátano, mercados de la ZMG.
Fuente: (Secretaría de economía, 2022)

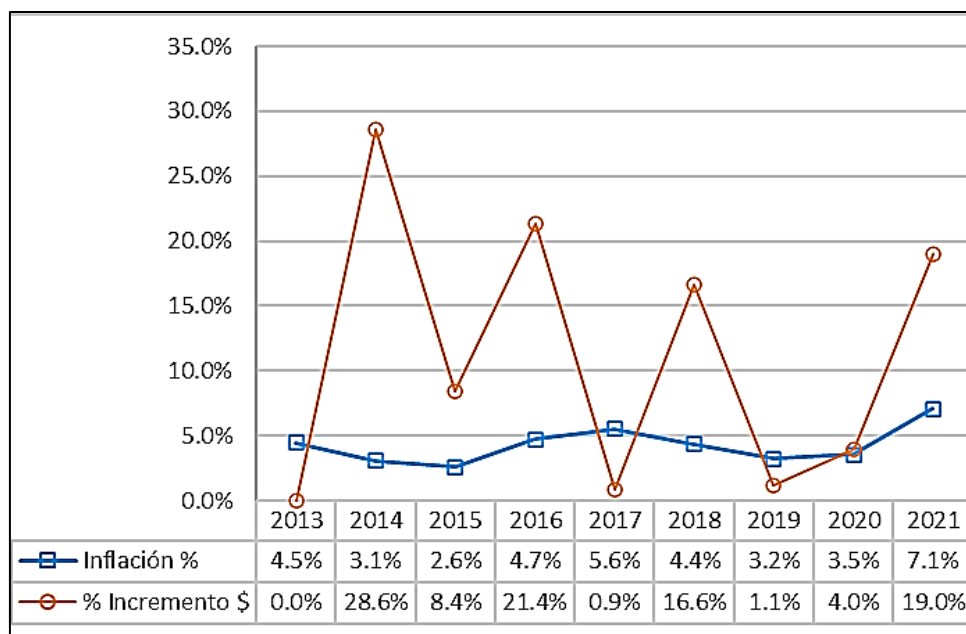


Figura 8. Tendencia del incremento del precio kg de plátano vs incremento de inflación.
Fuente: (INEGI)

1.4.2. Las fuerzas de los nuevos entrantes y la competencia.

De acuerdo con el INEGI (INEGI) en Jalisco existen 25 unidades económicas UE dedicadas a la deshidratación de frutas y verduras (11 UE) y a la elaboración de harinas de otros productos agrícolas (14 UE), de manera que el factor de la oferta es un área de oportunidad que se puede aprovechar dado que en el estado de Jalisco los productores son pocos y la oferta de plátano deshidratado convertido en harina es aún menor, además de que los fabricantes de harinas están principalmente enfocados en maíz y trigo por su alto volumen de consumo, el mayor rendimiento por kilogramo de materia prima, y el precio bajo.

1.4.3. Las fuerzas de los compradores y sustitutos.

La harina de plátano es en realidad un sustituto total o parcial de las tradicionales harinas de maíz y trigo, de manera que los compradores de harina de plátano son nichos de mercado muy específicos relacionados con inclinaciones nutricionales ya sea por interés de tener una dieta más saludable, o por prescripción nutricional donde el contenido de gluten, la condición de obesidad o diabetes son aspectos a controlar, y que por estos consideran las diferencias en los contenidos nutrimentales del producto en comparación de las diversas propuestas (tabla 4).

		HARINAS		
COMPONENTE	unidades	MAÍZ	TRIGO	PLÁTANO
AGUA	g	9.6	6.1	3
ENERGÍA	kcal	344	348	346
PROTEÍNA	g	8.7	9.3	3.89
LÍPIDOS	g	2.7	1.2	1.1
CARBOHIDRATOS	g	76	80	88.3
FIBRA	g	3	3.4	9.9
CALCIO	mg	12	15	22
FERRO	mg	2	1.1	1.15
YODO	mg	80	1	
MAGNESIO	mg	60	28	108
ZINC	mg	1.6	0.8	0.61
SODIO	mg	52	3	3
POTASIO	mg	61	130	1490
Fuente :		1		2

Tabla 4. Comparativo nutrimental de diversas harinas.

Fuentes: 1: (Moreiras, 2003), 2: (Agriculture, 2019)

Al ser el maíz y trigo semillas con un contenido de humedad del orden del 38% (www.agrosintesis.com, 2016) se secan para llegar a humedades hasta el 12%, lo que quiere decir que pierde alrededor del 30% de su peso original con un rendimiento del 70%, mientras que para el plátano verde la humedad de la pulpa oscila entre 58 y 65% (Quiceno, 2020) para llegar a un seco de entre el 5 y el 10%, esto representa un rendimiento del 13% a peso bruto considerando el peso total incluyendo la cáscara que está incluida en el precio de compra de la materia prima. En este sentido las harinas convencionales son las verdaderamente fuertes y llevan consigo el favor de la gran productividad, y por lo tanto, provoca adicional una diferencia sustancial en los precios por unidad de masa, lo que otorga una gran ventaja competitiva a los granos, y es por eso que las harinas derivadas de las frutas, e incluso verduras, que tienen un alto contenido de humedad, van encauzadas a nichos de mercado específicos que tienen el potencial de pagar por el valor agregado de los beneficios nutrimentales que les ofrecen productos distintos.

1.4.4. La tecnología

En la industria del secado existen gran variedad de posibilidades de calentar el aire y de forzar su flujo, con circulación a favor o en contracorriente, para hacer contacto con el material a secar, y se enumeran algunos:

1. Hornos de circulación forzada para fabricación por lotes.
2. Túneles con bandas transportadoras o de carros con charolas para fabricación continua.
3. Secadores continuos verticales u horizontales con alimentación en forma de pasta.
4. Invernaderos con condiciones controladas para secar de forma natural con aprovechamiento directo de la energía solar y la corriente natural del aire.

DMX tiene tecnología híbrida propia, con un horno de charolas y el aprovechamiento de la energía solar combinada con la eléctrica.

Finalmente, la tecnología puede ser una restricción o una ventaja en función de los volúmenes a procesar; razón importante para que los procesos por lotes tengan estipuladas las condiciones en las que deban operar a fin de cumplir los requerimientos de los clientes en calidad, cantidad y tiempo.

1.4.5. Asuntos normativos

En el ambiente de los productos de consumo humano: orales, cutáneos o inyectables, existen normativas en algunos casos obligatorias y en otros voluntarias para mejorar los procesos; en el caso particular de las harinas no existe una normatividad especialmente orientada al procesado de frutas, pero si para la fabricación de harinas a partir de granos (NOM-247-SSA1-2008) (Secretaría de Salud, 2009); pero esta situación no exime que los procesos no deban ejecutarse correctamente para lograr productos seguros, luego entonces se convierte en un apego voluntario a las normas de las Buenas Prácticas de Manufactura de productos y procesos similares, u otras metodologías que incluyan conceptos orientativos para el análisis de riesgos en productos de consumo humano, como HACCP (Análisis de riesgos y control de puntos críticos), ISO22000, o FSSC22000, y tomando como normatividad sanitaria las referencias que vengan de productos similares o de algún otro país que sea específico para productos de este tipo.

1.5. Análisis inicial de la problemática: primera hipótesis.

Mencionada la problemática percibida en el numeral 1.2, se han procesado tres entregas de plátano verde con un total de 43 ciclos de secado, que han presentado variaciones en el peso de la carga total al secador, temperaturas de procesamiento, diferencias de humedad relativa dentro de la cámara, y en tiempos del ciclo, además de tres reprocesos y dos cargas completas a la merma,

que se traduce en inconsistencia de la calidad, pero también en los costos asociados por reprocesos, mermas, y sobreprocesamiento.

Por otro lado, el cliente evalúa de manera sensorial los productos que adquiere, y esta información se debe traducir en especificaciones del producto terminado y a su vez para cada etapa del proceso a fin de que cada una agregue el valor que el cliente está dispuesto a pagar.

Tratándose de productos alimenticios de consumo humano, los requisitos básicos se derivan de la *Voz del Cliente (VOC)* convertidos estos a los procesos internos como los *Críticos Para la Calidad (CTQ's)* se muestran en la Tabla 5.

CARACTERÍSTICAS REQUERIDAS POR LOS CLIENTES ASOCIADAS AL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL PRODUCTO							
CV LA VOZ DEL CLIENTE	ACTUAL	META	BRECHA				
SABOR	VARIABLE	CARACTERÍSTICO	NO DEFINIDO	}	CTQ'S CRÍTICO PARA LA CALIDAD	ACTUAL	META
COLOR	VARIABLE	CARACTERÍSTICO	SIN ESTÁNDAR				BRECHA
OLOR	VARIABLE	CARACTERÍSTICO	SIN ESTÁNDAR		% HUMEDAD	12%	5 - 10 %
TEXTURA	NO DEFINIDO	delta pa/< reposo	SIN ESTÁNDAR				2 - 7 %
SEGURO	S.E. MB	ESTABLECER	NO DEFINIDO				

Tabla 5. *Voz del Cliente (VOC) y Críticos Para la Calidad (CTQ's). (propia).*

A partir de esta información se realiza un análisis ponderado de causa-efecto (figura 9), para identificar a lo largo del proceso las etapas que influyen en el contenido de humedad del producto.

La problemática percibida se asocia a las etapas que impactan a la calidad y en esta ponderación se identifica al *secado* como la etapa más importante, pero sería conveniente considerar otras etapas resaltadas que implicaran alguna probable contribución.

Si bien la materia prima contribuye a la humedad, es una variable que no se puede controlar por ser un producto natural, pero que tiene un rango de conocido sobre el que se pueden diseñar los parámetros de la operación.

Se hace una revisión de los puntos importantes en la etapa de secado y se pondera la importancia de temas relativos en una Matriz Causa-Efecto, proceso-calidad, (figura 10), relacionados a los VOC's, que orienta las prioridades a atacar en función del impacto en la calidad requerida por los clientes.

Se complementa el análisis con un cuadro SIPOC (tabla 6) para la identificación de necesidades por etapa, observando el flujo de materiales y documentos a todo lo largo de la cadena, con este estudio se identifica la falta de especificaciones y pruebas que permitan evaluar el cumplimiento de cada etapa.

CONTRIBUCIÓN POR ETAPAS AL CONTENIDO DE HUMEDAD AL PRODUCTO TERMINADO

S	P	D	RECEPCIÓN	W	S	P	D	REFRIGERACIÓN Y SANITIZADO	W	S	P	D	DESCASCARADO Y CORTE	W	S	P	D	DESHIDRATADO	W	S	P	D	MOLINO Y CRIBADO	W
5	5	5	PLÁTANO VERDE CON 50-75% HUMEDAD VARIABLE NO CONTROLADA	125	0	0	0	NO APORTA HUMEDAD A LA PULPA	0	5	4	2	EL TAMAÑO DEL CORTE HACE QUE TENGA MÁS O MENOS MASA PARA SECAR	40	5	5	4	CARGA, TEMPERATURAS, DISTRIBUCIÓN DEL AIRE ENTRE CHAROLAS, TIEMPO DE CICLO, TAMAÑO DE PARTÍCULA	100	2	4	2	TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL AMBIENTE	16
										1	1	1	EL PLÁTANO ESTÁ EN UNA TINA CON AGUA Y PUEDE ARRASTRAR AGUA A LA CHAROLA	1										
4	4	2	TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL AMBIENTE	32	0	0	0	ETIQUETADO EN VACÍO, NO APORTA	0	2	4	2	TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL AMBIENTE	16	0	0	0	PRODUCTO SELLADO, NO APORTA	0	0	0	0	PRODUCTO SELLADO, NO APORTA	0
4	4	2	EMPAQUE TEMPORAL MAL SELLADO	32																				
S	P	D	ALMACÉN TEMPORAL	W	S	P	D	ETIQUETADO	W	S	P	D	ENVASADO	W	S	P	D	EMPAcADO	W	S	P	D	ALMACÉN PT	W

CRITERIOS

S- SEVERIDAD

P- PROBABILIDAD

D- DETECTABILIDAD

PONDERACIONES

1245

NRP 1-2532-6480-125

RIESGO BAJO MEDIO ALTO

CONTRIBUCIÓN AL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL PRODUCTO TERMINADO

Figura 9. Análisis causa-efecto para etapas que impactan al contenido de humedad.
Fuente: Elaboración propia.

Matriz X-Y causa-efecto en la ETAPA DE SECADO					
(X) PONDERAR 1-4-7-9					
EL TAMAÑO DEL CORTE DE MATERIAL ESTÁ MEDIANAMENTE DEFINIDO	CONTENIDO HUMEDAD	SABOR	COLOR	OLOR	TEXTURA
NO ESTÁN ESTABLECIDOS PARÁMETROS DE TEMPERATURA, %HR, TIEMPO, MASA A SECAR, ACOMODO DEL MATERIAL.	7	1	1	7	9
NO SE TIENEN DEFINIDAS LAS ETAPAS DEL SECADO Y CÓMO OPERAR VÁLVULAS EN CADA UNA DE ELLAS.	9	7	9	7	9
LA TEMPERATURA DEL MEDIO DE CALENTAMIENTO ES UNIFORME PARA Y DURANTE LAS ETAPAS DEL SECADO	9	7	9	7	4
NO EXISTE UNA ESPECIFICACIÓN NUMÉRICA PARA EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL PRODUCTO SECADO	7	7	9	7	7
LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN PARA TEMPERATURA Y %HR NO SON SUFICIENTES	9	7	7	7	7
LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN PARA TEMPERATURA Y %HR NO ESTÁN CALIBRADOS	7	4	4	4	4
DISEÑO NO PERMITE UNA ADECUADA DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO DEL AIRE CALIENTE EN TODOS LOS NIVELES	7	4	4	4	4
SE REGISTRAN PARÁMETROS DURANTE LA CORRIDA DE SECADO	9	4	7	4	4
LAS PERSONAS CONOCEN EL EQUIPO	1	1	1	1	1
SABEN OPERAR EL EQUIPO EN LAS CONDICIONES EN QUE ESTÁ	1	1	7	1	1
PRIORIDAD POR CALIDAD	67	44	59	50	51

Figura 10. Matriz de prioridades causa-efecto sobre las propiedades del producto.
Fuente: Elaboración propia.

PROVEEDORES (S)	ENTRADAS (I)		PROCESOS (P)	SALIDAS (O)		CLIENTES (C)
PROVEEDOR EXTERNO DE FRUTA	FRUTA EN RACIMOS	ESPECIFICACIONES FQ DE FRUTA - CANTIDAD DE FRUTA SURTIDA - AYUDA VISUAL ACOMODO Y PESO POR CAJA. ESPCIFICACIONES DE TEMPERATURA, HUMEDAD, IDENTIFICACIÓN DE ENTRADA Y SEGREGACIÓN. REGISTRO FECHAS DE ENTRADA Y SALIDA -	RECEPCIÓN DE LA FRUTA	FRUTA ACOMODADA EN CAJAS	DETERMINACIÓN DE CARGA MB.	ALMACENISTA
ALMACENISTA	FRUTA EN CAJAS	IDENTIFICACIÓN DE ENTRADA Y SEGREGACIÓN. REGISTRO FECHAS DE ENTRADA Y SALIDA -	REFRIGERACIÓN Y SANITIZADO	FRUTA REFRIGERADA Y SANITIZADA EN CAJAS	ACTUALIZACIÓN DE INVENTARIOS.	DESCASCARADO Y CORTE
ALMACENISTA	FRUTA REFRIGERADA Y SANITIZADA	ESPECIFICACIONES FQ DE FRUTA REFRIGERADA. ORDEN DE PRODUCCIÓN RUTEADA. PARTIDA DE IDENTIFICACIÓN DE ENTRADA. SALIDA-ACTUALIZACIÓN DE INVENTARIOS. ESPECIFICACIÓN DE TAMAÑO DE RECORTE. AYUDA VISUAL PARA ACOMODO EN CHAROLAS Y HORNO DE SECADO.	DESCASCARADO Y CORTE	PULPA LIMPIA Y RECORTADA EN CHAROLAS. CÁSCARAS, RECORTES Y MERMA	PESOS DE PULPA LIMPIA Y CÁSCARAS	CLIENTES PARA CÁSCARA DE PLÁTANO
DESCASCARADO Y CORTE	PULPA RECORTADA Y ACOMODADA EN CHAROLAS	PARÁMETROS DE CARGA Y OPERACIÓN DEL HORNO SECADOR. ESPECIFICACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD ORDEN DE PRODUCCIÓN RUTEADA.	SECADO	PULPA SECA EN CHAROLAS	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD ORDEN DE SECADO.	MOLINO-CRIBADO (FORMULACIÓN)
SECADO	PULPA SECA EN CHAROLAS. INGREDIENTES ADICIONALES PARA FÓRMULA	ESPECIFICACIONES CONTENIDO DE HUMEDAD SIN/CON FÓRMULA. ESPECIFICACIONES DE CONDICIONES DE OPERACIÓN. ORDEN DE PRODUCCIÓN RUTEADA.	MOLINO - CRIBADO - (FORMULADO)	HARINA DE PLÁTANO SIN / CON FORMULACIÓN	DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD PARA HARINA SIN/CON FÓRMULA.	ALMACÉN TEMPORAL
ALMACÉN TEMPORAL	HARINA CON/SIN FÓRMULA A	ESPECIFICACIONES DE CONDICIONES DE ALMACENAJE A GRANEL ACTUALIZACIÓN DE INVENTARIOS.	ALMACÉN TEMPORAL	HARINA DE PLÁTANO SIN / CON FORMULACIÓN	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD. ACTUALIZACIÓN DE	ENVASADO
PROVEEDOR EXTERNO DE INSUMOS	ETIQUETA	ESPECIFICACIONES DE MATERIALES EMPAQUE E INSUMOS DIVERSOS ACTUALIZACIÓN DE INVENTARIOS AYUDA VISUAL DEL ETIQUETADO.	ETIQUETADO	BOLSA ETIQUETADA		ENVASADO
ALMACÉN TEMPORAL	HARINA DE PLÁTANO SIN / CON FORMULACIÓN	ESPECIFICACIONES DE PRODUCTO Y CONDICIONES DE ENVASADO ORDEN DE PRODUCCIÓN RUTEADA. ACTUALIZACIÓN DE INVENTARIOS.	ENVASADO	HARINA EN BOLSA SELLADA Y ETIQUETADA	DETERMINACIONES FQ Y MB DE HARINA SIN/CON FÓRMULA	EMPACADO
PROVEEDOR EXTERNO DE INSUMOS	MATERIALES DE EMPAQUE	ESPECIFICACIONES DE CAJA, CINTA, Y ETIQUETA DE IDENTIFICACIÓN. ESPECIFICACIONES DE PRODUCTO TERMINADO. ORDEN DE PRODUCCIÓN RUTEADA. ACTUALIZACIÓN DE INVENTARIOS.	EMPACADO	PRODUCTO EMPACADO EN CAJA E IDENTIFICADO	CIERRE DE ORDEN DE PRODUCCIÓN RUTEADA. ACTUALIZACIÓN DE INVENTARIOS.	ALMACÉN DE PRODUCTO TERMINADO
ALMACÉN DE PRODUCTO TERMINADO	PRODUCTO EMPACADO EN CAJA E IDENTIFICADO	ORDEN DE COMPRA Y FACTURA	ALMACÉN PT	PRODUCTO TERMINADO	REGISTRO DE SALIDA DE PRODUCTO. ACTUALIZACIÓN DE INVENTARIOS. ACUSE DE RECIBO	CONSUMIDORES A MENUDEO- DISTRIBUIDORES- CLIENTES POR REDES SOCIALES

Tabla 6. SIPOC del proceso de elaboración de harina por deshidratación. (propia).

El comportamiento actual tomado de una muestra de datos arroja una eficiencia baja en los ciclos totales procesados (tabla 7), además de variaciones en los parámetros de operación durante y en entre ciclos: masa cargada, temperatura del agua caliente de alimentación; temperaturas y humedad relativa en dos ubicaciones dentro de la cámara de secado.

TOTAL DE CICLOS	BUENOS A LA 1°	REPROCESO	MERMA
43	38	3	2
	88%	7%	5%

Tabla 7. Eficiencia de los ciclos de secado. (propia)

Un factor adicional a considerar, es la condición del entorno al secador, puesto que es de donde se toma el aire que circulará dentro de la cámara y por lo tanto sus condiciones podrían ser relevantes.

Se muestran adelante gráficas de comportamiento de las variables de proceso mencionadas.

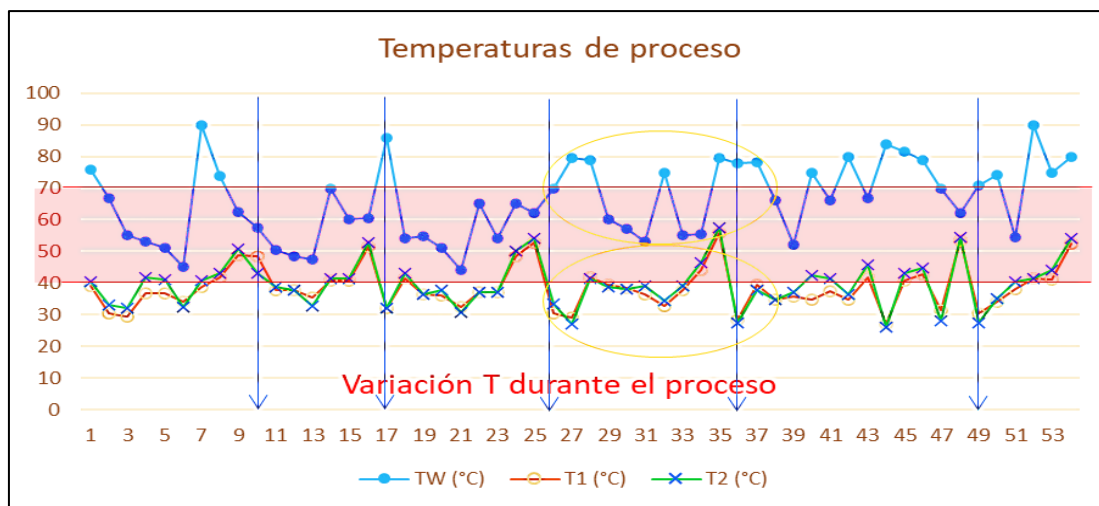


Figura 11. Temperaturas de operación dentro del horno.
Fuente: Elaboración propia.

TW es la temperatura del agua de alimentación (figura 11) que entrega calor al aire de secado (T1, T2), las flechas indican cada ciclo; se observan diferencias a lo largo y entre ciclos los 3-4-5-6, tienen valores diferentes en el rango de alimentación. Las T1 y T2 responden al comportamiento de TW de manera más suave por el efecto de la transferencia de calor, su comportamiento de secado

debe trabajar en una temperatura aproximada a los 70°C (Khetarpaul, 2013) y la cámara está por debajo del rango propuesto.

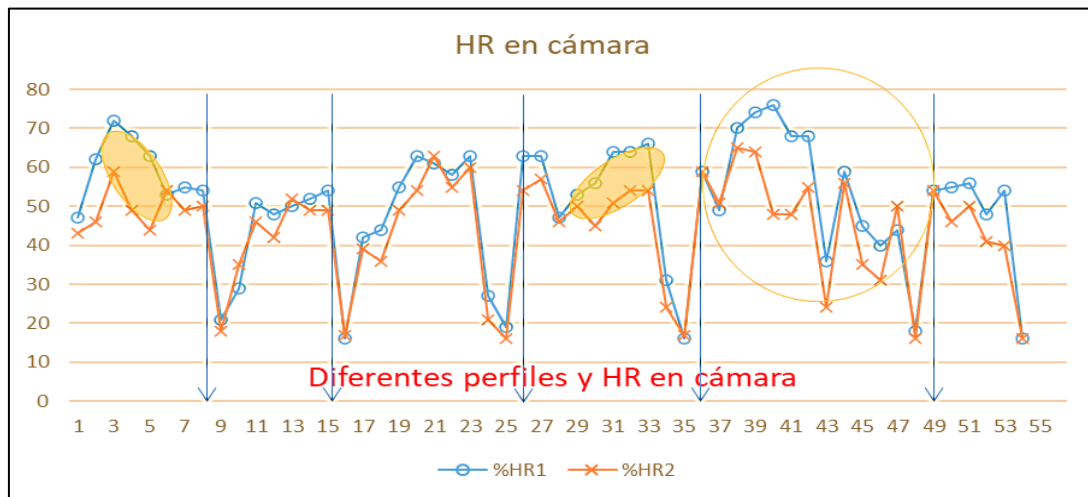


Figura 12. Humedad relativa dentro de la cámara de secado.
Fuente: Elaboración propia.

Las humedades dentro de la cámara (figura 12) son diferentes entre sí, es decir, la acción de secado no está siendo uniforme dentro de la cámara, esto causa producto seco mientras en la otra zona debe seguir y retrasa el tiempo de ciclo; además, aunque hay similitud entre las curvas de HR, no siguen un patrón igual.

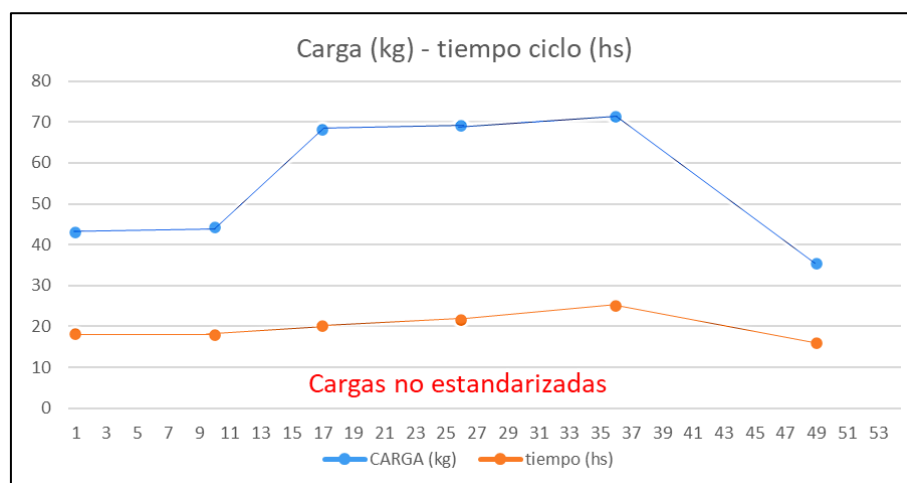


Figura 13. Patrones de carga de fruta al secador.
Fuente: Elaboración propia.

Las cantidades cargadas no son estandarizadas (figura 13), esto causa variaciones directamente proporcionales en los tiempos del secado.

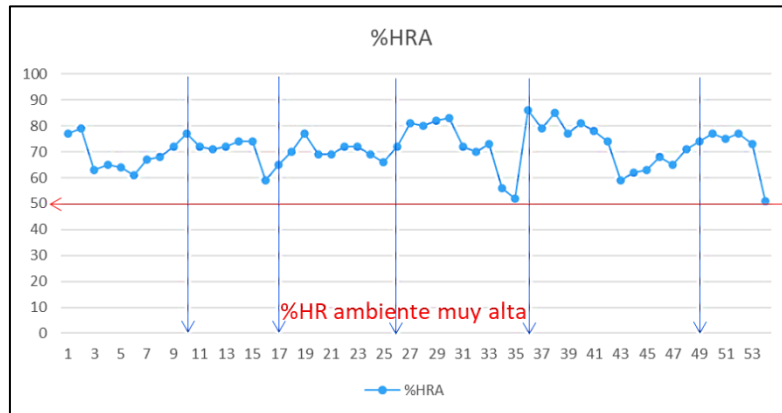


Figura 14. Humedad relativa en el entorno del secador.
Fuente: Elaboración propia.

Siendo el aire tomado del entorno cercano al secador, la humedad de éste (figura 14) es un componente importante para el secado, porque lleva un porcentaje alto de agua en fase vapor, entre el 50 y el 90%, que reduce su capacidad de absorción y por lo tanto el material a secar no puede entregar fácilmente el agua contenida en su estructura.

Las lecturas iniciales de datos de Rendimiento Neto (kg pulpa seca/kg pulpa húmeda) muestran una dispersión muy alta, con una desviación estándar del 1.32745 % y una media muy cerca del límite superior de lo especificado de 26.70%, que en las VOC's que es el equivalente al 10% de contenido de humedad en el producto secado, como se muestra en la figura 15 como capacidad de proceso; la capacidad del proceso a largo plazo es muy baja, 0.38 y lejana del límite inferior con una capacidad del 0.77 y un Ppk empujado más allá del límite superior con -0.01.

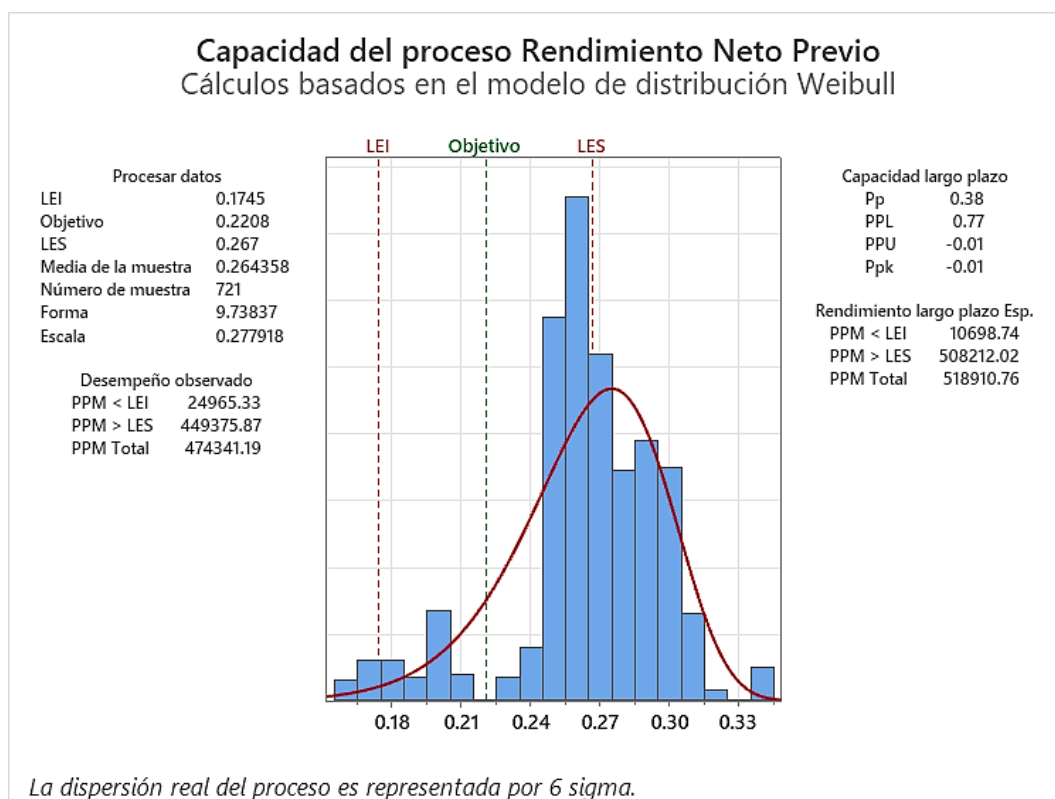


Figura 15. Capacidad de proceso para Rendimiento Neto Previo
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, con esta información se espera un diagrama futuro modificado de proceso e identificando las etapas que contribuyen al contenido de humedad en (figura 16).

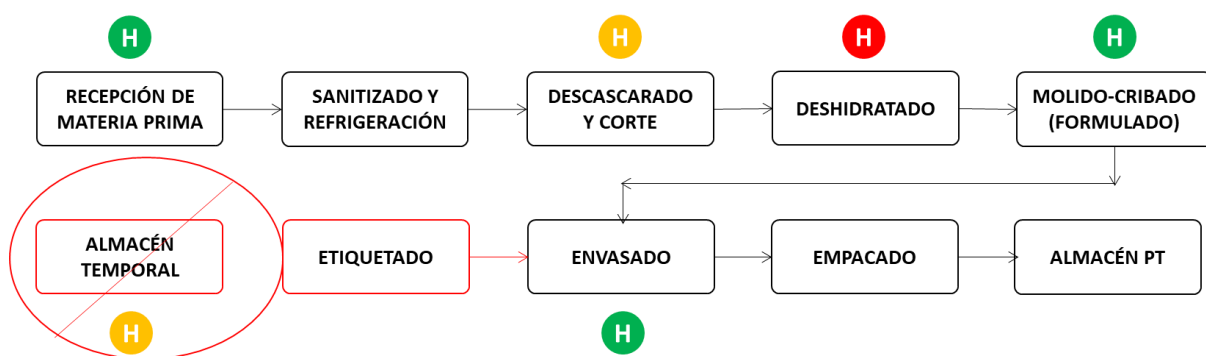


Figura 16. Diagrama futuro de proceso de secado.
Fuente: Elaboración propia.

La etapa de definición cierra con un resumen ejecutivo que muestra objetivos, plazos, beneficios, y responsables en un esquema de Project charter presentado en la figura 17.

Project Charter					
General Project Information					
Project Name		Optimización del proceso de secado de plátano verde para la elaboración de harina.		IMPORTANT REMINDER A narrative written charter must be circulated and signed by the project sponsors. You can attach a completed version of this template to your narrative written charter in an effort to keep it short and concise. Please make sure you meet with the project team and sponsors before completing this template. Much of the information required will need to come from a discussion with team members and sponsors.	
Project Sponsor		Margarita Hernández			
Project Manager		Alejandro Ramírez De Loza			
Email Address		ardeloza@iteso.mx			
Phone Number		33 1829 1429			
Organizational Unit		Planta de deshidratación de alimentos			
Process Impacted		Secado			
Expected Start Date		10 de mayo del 2022			
Expected Completion Date		Mayo del 2023			
Expected Savings					
Estimated Costs					
Green Belts Assigned		Margarita Hernández			
Black Belts Assigned		Alejandro Ramírez De Loza			
Describe the Problem or Issue, Goals, Objectives, and Deliverables of this Project					
Problem or Issue		Se han producido 3 partidas de entre 12 y 16 corridas de secado, total 43. Con variaciones en Peso de carga, Temperaturas de procesamiento, Tiempo total del ciclo. Con impactos en 3 reprocesos, y 1 corrida Desperdiciada.			
Purpose of Project		Hacer que la etapa de secado sea eficiente y eficaz estableciendo técnicamente los parámetros de proceso (Temperaturas, carga, tiempos, condiciones de %HR, y contenido de humedad en el producto)			
Business Case		La etapa de secado es la más importante porque es la que elimina y determina en gran medida las características de calidad del producto. Su control es imprescindible para la calidad, eficacia, eficiencia, y control del costo.			
Goals / Metrics		Contenido de humedad en producto secado entre 5 - 10% p/p. Establecer: Tiempo de ciclo (hs), carga (kg), Temperaturas de operación, HR dentro de cámara.			
Expected Deliverables		Parámetros de operación del secador: Temperaturas, HR, Contenido de humedad del producto secado, carga de fruta a secar, tamaño y/o forma de la fruta cortada, Tiempo de ciclo.			
Define the Project Scope and Schedule					
Within Scope		El alcance se acota a la etapa de secado, pudiendo intervenir en etapas anteriores y posteriores para contribuir al control de la humedad del producto terminado.			
Outside of Scope		Todas las etapas diferentes al secado; El control microbiológico del producto secado.			
Tentative Schedule		Key Milestone		Start	Complete
		Definición		Ago-2022	Dic-2022
		Medición y Análisis		Ene.-2023	Mayo-2023
		Incremento		Mayo-2023	Jun-2023
		Control		Mayo-2023	Jun-2023

Figura 17. Project charter.
Fuente: Elaboración propia.

Project Team	Margarita Hernández, Alejandro Ramírez		
Support Resources	Ingresos por ventas, y financiamiento con crédito		
Special Needs	Gastos por: Cambios en el diseño del secador, implementación de prueba de humedad, pruebas, análisis por un tercero, accesorios varios para equipos de proceso.		
Define the Project Benefits and Customers			
Process Owner	Margarita Hernández		
Key Stakeholders	Margarita Hernández		
Final Customer	Personas que procuran su nutrición por voluntad o prescripción.		
Expected Benefits	Determinar parámetros de operación Estandarizar características de sabor, olor, color, y textura. Contribuir al Control microbiológico. Eficiencia y eficacia del secado. Control del costo de operación. Incremento de la rentabilidad.		
Type of Benefit	Describe Basis of Estimate	Est Benefit	
Specific Cost Savings	Energía utilizada en el secador		
Enhanced Revenues			
Higher Productivity (Soft)	Incremento en la eficiencia del secado y otras etapas		
Improved Compliance	Eliminación de reprocesos y rechazos		
Better Decision Making	Certeza en las etapas y decisiones en base a datos		
Less Maintenance			
Other Costs Avoided	Devoluciones, análisis externos		
			\$0
Describe Project Risks, Constraints, and Assumptions			
Risks	No se aprecian		
Constraints	Modificaciones mayores al equipo de secado. Control del microambiente en torno al secador.		
Assumptions	Al no tener datos numéricos del producto, se aume por apariencia y pruebas organolépticas que es de buena calidad .		
Prepared by:	Alejandro Ramírez De Loza	Date:	03 de mayo 2022

Project charter. (continuación)
Fuente: Elaboración propia.

1.6. Objetivos de la intervención

El objetivo principal es el de *Establecer los parámetros de operación de la etapa de secado de plátano verde* para la elaboración de harina. Lateralmente pueden cumplirse otros propósitos que

contribuyan al control del contenido de humedad en el producto terminado y que se refieren a las etapas resaltadas en verde y naranja de la figura 16.

Se espera ver reflejos en otros indicadores como la consistencia en el contenido de humedad en la harina, la reducción del costo de operación, eliminar los retrabajos relacionados con el secado, y evitar rechazos.

1.7. Delimitaciones y área funcional por intervenir

El alcance del proyecto se acota a la etapa de secado, pudiendo influir en otras etapas del proceso completo y que ayuden a lograr el objetivo principal que es el control de la cantidad de humedad en el producto terminado. No se considera explícitamente el control microbiológico del producto, aunque se verá impactada como un colateral de la calidad del secado. Por otra parte, el enfoque principal se limita a esta etapa puesto que cada una de ellas tiene propósitos distintos al control de la humedad en el polvo específicamente.

El estudio sobre el secador requerirá de la ejecución de corridas experimentales y con producto a fin de conocer su comportamiento y con esa información tomar acciones para obtener mejoras, para esto se estima un tiempo aproximado de doce a dieciocho meses, que involucrarán corridas de prueba, análisis de datos, posiblemente modificaciones al equipo y algunas etapas unitarias para llegar a una meta de contenido de humedad en el producto terminado de entre el 5 y 10% p/p.

1.8. Justificación y pertinencia del trabajo

Al ser este un proyecto de intervención, la empresa obtendrá beneficios por la elaboración del estudio por la aplicación de conocimientos enfocados en su etapa crítica, y que a cambio le regresará la certeza técnica y documentada del comportamiento del equipo y la definición de sus parámetros de operación, así como en la estandarización de calidad del producto con un impacto que llegaría hasta la vida de anaquel; finalmente, se establece una metodología de análisis de procesos que podría extenderse a nuevos proyectos de mejora.

Por otra parte y en lo global, este estudio me ofrece herramientas de aplicación universal en el ejercicio profesional ya que implica la exploración y aplicación de conocimientos y herramientas como Seis sigma esbelto, Estadística aplicada, Diseño de experimentos, Análisis de Regresión, además de consultas para el conocimiento de la operación unitaria del secado; el diseño, construcción y funcionamiento del equipo, el comportamiento de la fruta y del producto en esa

etapa, que es particular para cada tipo de material a secar, y finalmente las normatividades aplicables voluntarias u obligatorias.

2. Marco conceptual de referencia

2.1. Secado y equipos

El secado es la remoción de humedad, ya sea de agua u otros componentes volátiles, de sólidos, lechadas, y pastas para dar productos sólidos. En la alimentación al secador, la humedad puede estar embebida en un sólido húmedo, un líquido en la superficie del sólido, o una solución en la que el sólido esté disuelto.

De acuerdo con (J.D.Seader, Henley, & Roper, 2011) p.726, el secado implica la vaporización de la humedad se debe transferir calor al material a secar, y los métodos más comunes son:

- Convección, cuando un gas caliente está en contacto directo con el material.
- Conducción, el material está en contacto con una superficie caliente.
- Radiación desde un gas o superficie caliente, pero sin estar en contacto directo.
- Por calor generado por radiofrecuencia o microondas.

En la evaporación se eliminan grandes cantidades de agua o líquido a la temperatura de ebullición, mientras que en el secado la eliminación de la humedad es de cantidades muy pequeñas y se va en forma de vapor arrastrado por la corriente de aire. Además, en los alimentos el secado es una forma de preservación considerando que al reducir el contenido de agua a niveles de 5 a 10 % se inhibe la actividad de los microorganismos y de las enzimas, y a su vez se conservan el sabor y valor nutritivo. (Geankoplis, 1998) p.579.

De manera genérica se consideran diferentes clasificaciones (tabla 8):

MOVIMIENTO	TRANSFERENCIA DE CALOR	ALIMENTACIÓN	PROPIEDADES DEL MATERIAL	PRODUCTO FINAL
Continuo Discontinuo Agitados No agitados	Expuestos al medio de calentamiento (adiabático) Calentamiento indirecto (No adiabático) Mixto Radiación	Escamas Polvos Cristales Suspensión Solución Láminas Gránulos	Termosensibles A vacío Tolerantes a la temperatura	Conservar propiedades Minimizar pérdida de solventes Eliminar volátiles no deseados

Tabla 8. Clasificación de los equipos de secado.
Fuente: (McCabe, Unit Operation in Chemical Engineering, 1993).

Enseguida se muestran esquemáticamente las formas de operar de los secadores adiabáticos (figura 18) y algunos tipos de secadores adiabáticos (figura 19-20), tomados de (McCabe, Unit Operation in Chemical Engineering, 1993).

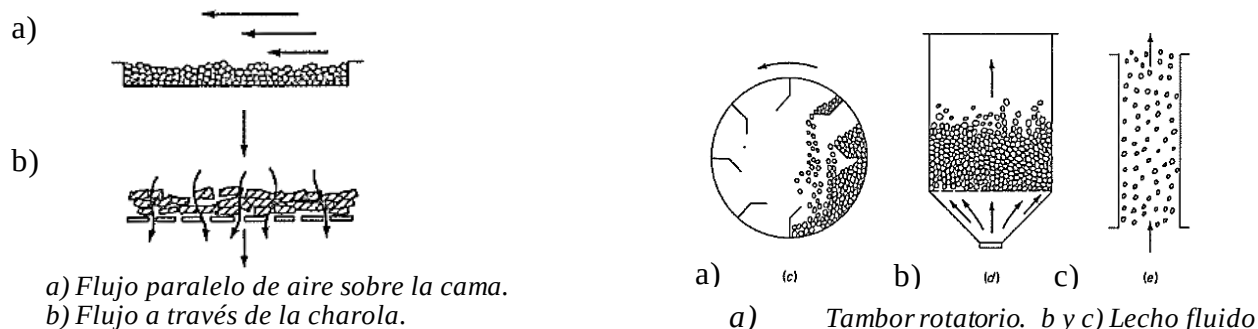


Figura 18. Formas de operar de secadores adiabáticos
Fuente: (McCabe, Unit Operation in Chemical Engineering, 1993)

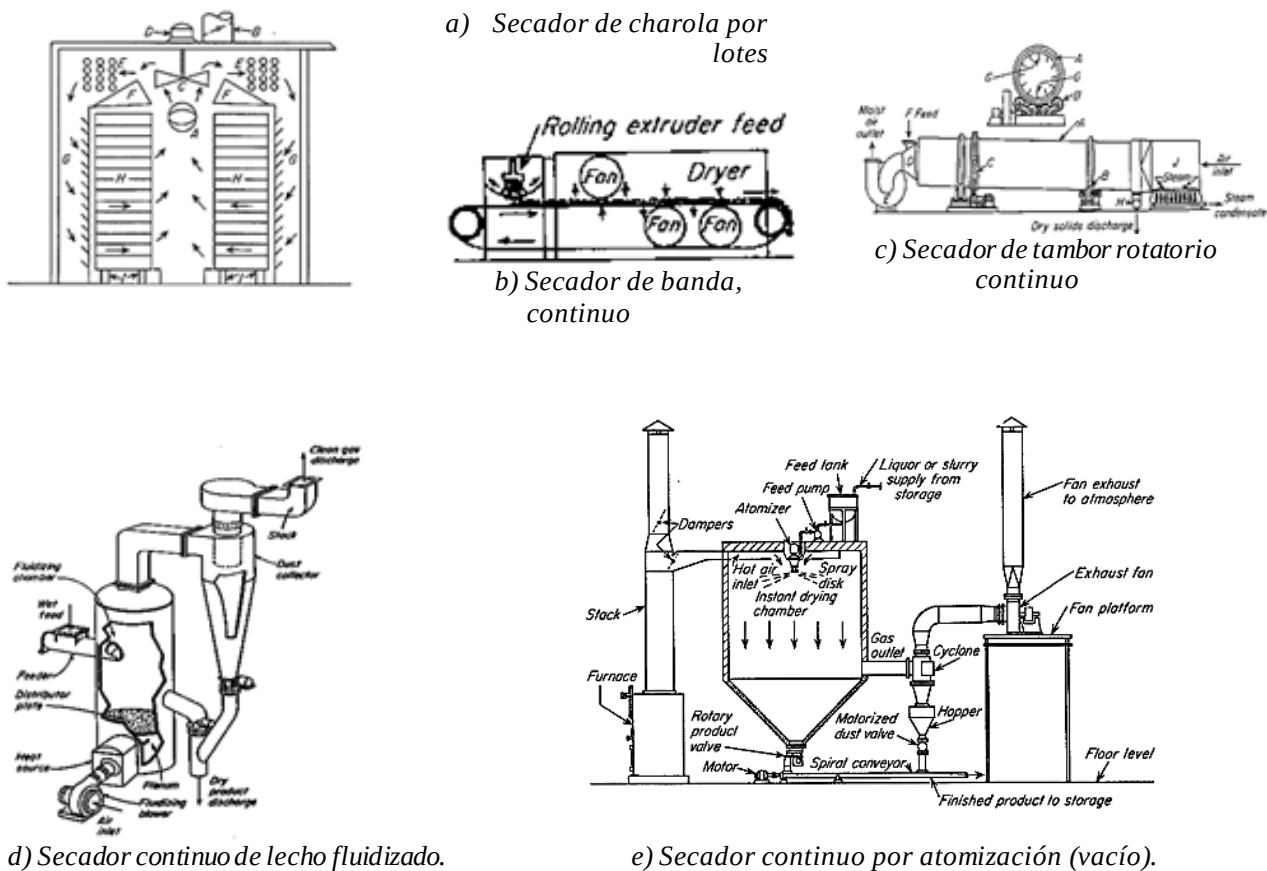
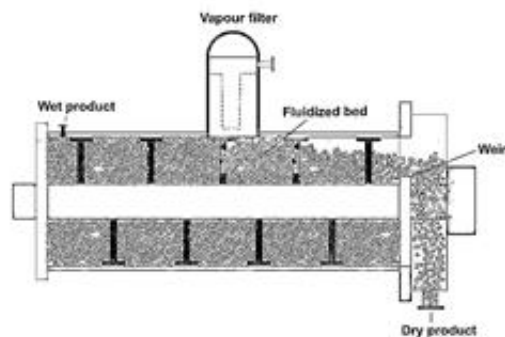
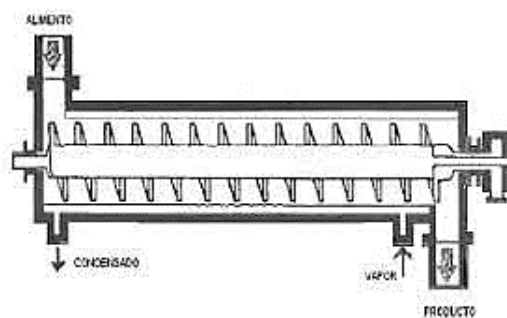


Figura 19. Tipos de secadores adiabáticos
Fuente: (McCabe, Unit Operation in Chemical Engineering, 1993).



a) Aspas



b) Tornillo

Figura 20. Secadores horizontales continuos, no adiabáticos.
Fuente: (McCabe, Unit Operation in Chemical Engineering, 1993).

2.2. Mecanismos de transferencia en el secado: masa y calor.

De acuerdo con (Mujumdar, 2006) p.23-24, el proceso de secado involucra dos fenómenos de transferencia simultáneos:

- a) La transferencia de energía como calor desde el ambiente que rodea al sólido, para evaporar la humedad superficial, y
- b) La transferencia de masa de la humedad interna que se mueve a la superficie debido al calor infringido y su consecuente evaporación.

De manera que la velocidad a la que se completa el secado está gobernada por la velocidad a la que estos dos procesos se suceden. La evaporación de la humedad superficial depende de las condiciones del aire de secado (condiciones Externas): su humedad, velocidad y dirección, temperatura, área de exposición (tamaño y forma), presión, y la forma en que el sólido está soportado en el equipo, así, la transferencia de la humedad superficial a la corriente de gas (aire) por evaporación se lleva a cabo en una delgada capa de contacto entre ambos. En tanto que la velocidad a la que la humedad se desplace se relaciona con la estructura del sólido, la temperatura, y su contenido de humedad (condiciones Internas).

La operación unitaria de secado tiene dos mecanismos, la *transferencia de masa*, que es movimiento del agua líquida superficial y atrapada en la estructura del sólido, hacia una corriente de gas, comúnmente aire, y la *transferencia de calor* gestionada por la temperatura de la corriente de aire caliente, que normalmente tiene un contenido de vapor de agua. Al hacer pasar esta corriente alrededor de las piezas del sólido húmedo, el calor cedido es para calentar la masa

completa (calor sensible) y para evaporar la humedad superficial (calor latente), conforme el sólido incrementa su temperatura provoca que la humedad intrínseca fluya a través de la estructura hacia la superficie haciendo la corriente de aire una doble función: calentar al sólido, y evaporar la humedad que se acerca a la superficie (figura 21).

Para la corriente de aire (secador adiabático), que funciona como medio de calentamiento del sólido húmedo (calor sensible), y para la evaporación de la humedad superficial (calor latente); esto implica que sus condiciones iniciales de temperatura y humedad cambien conforme el proceso a menor y mayor respectivamente, de manera que el contenido de humedad inicial debiera ser lo más bajo posible a fin de tener un gradiente suficientemente amplio para favorecer la capacidad receptora de la humedad evaporada del sólido antes de que llegue a la saturación,

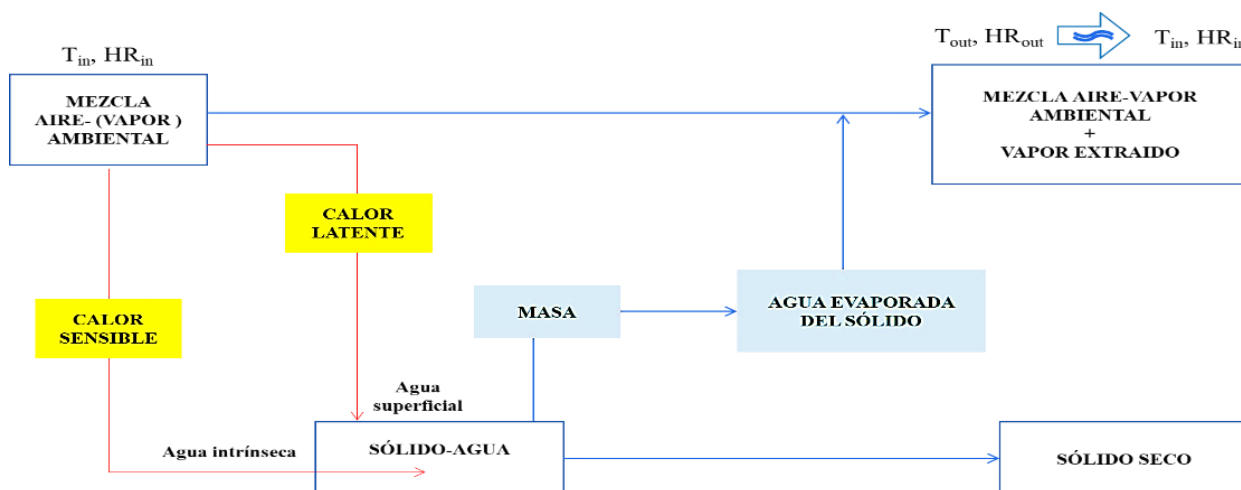


Figura 21. Mecanismos de transferencia calor y masa en el proceso de secado de un sólido.
Fuente: Elaboración propia.

así, la temperatura de salida será menor y la humedad subirá hacia la salida del secador, podrían ser indicadores de proceso para su eficacia, y que al final del proceso por lote darlo por terminado cuando las condiciones del aire de entrada y de salida sean apreciablemente estables.

2.2.1. Condiciones Externas para el secado.

El conocimiento de las condiciones del aire de secado y su comportamiento a lo largo del proceso se puede estimar mediante el uso de la carta psicrométrica (figura 22).

A partir de la temperatura de bulbo seco BS (directamente la temperatura del aire ambiente) y la temperatura de bulbo húmedo BH (del termómetro con fieltro húmedo expuesto a la corriente

de aire) se determina por la línea adiabática la ubicación del punto de muestra P con un contenido de humedad HR y una entalpía H extrapolando hacia la izquierda, por último, el contenido de humedad se extrapola isobáricamente hacia la derecha W. (Mujumdar, 2006) pp.24-33.

En la transferencia de calor y masa durante el ciclo de secado para la corriente de gas se relacionan los conceptos de: presión de vapor, entalpía de vaporización y la capacidad calorífica de la mezcla aire-vapor.

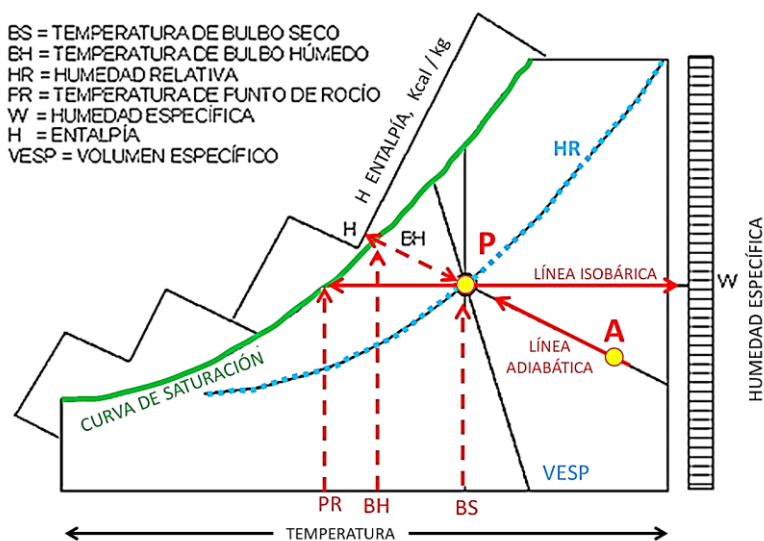


Figura 22. Carta psicrométrica.
 Adaptado de
<https://es.wikipedia.org/wiki/Psicrometr%C3%ADa>

La humedad relativa en una corriente de gas está dada por: (Mujumdar, 2006) p.27.

$$HR = \frac{p_w}{p_w^0} \quad (\text{ecuación 1})$$

HR = Humedad Relativa

p_w = presión parcial de vapor en la mezcla gas-líquido @ T y P

p_w^0 = presión de vapor puro @ T y P

Entonces, la humedad absoluta Y, para la mezcla aire-agua en cualquier punto es:

$$Y = 0,622 \frac{HR p_w^0}{P - HR p_w^0} \quad (\text{ecuación 2})$$

P = Presión total de la mezcla (Presión dentro del sistema o atmosférica)

La importancia de esta condición externa es que debe existir un gradiente de contenido de humedad entre la pieza a secar y el aire de secado, de manera que si el gas tiene una cantidad muy alta de humedad, éste no tendrá la capacidad de absorber o recibir más vapor proveniente del sólido a secar, por lo tanto, la calidad del aire dentro de la cámara como aquel que se alimenta desde el exterior se convierten en variables a considerar de mantener lo más bajo posible para hacer más eficiente el proceso de secado.

Coincidiendo con (Fito Maupoey, 2016) p.105, la acción de recircular el aire de entrada del secador está, entre otros, relacionada con la creación de una turbulencia que incrementa los coeficientes de transferencia de materia, pero en contrapartida aumenta la humedad relativa del aire y desciende la temperatura.

2.2.2. Condiciones Internas para el secado.

De acuerdo con (Mujumdar, 2006) p.33, los sólidos a secar se clasifican en tres:

- a) Medio poroso no higroscópico, cuando la estructura es porosa, la humedad interior es libre, y no se encoge al secado.
- b) Medio poroso e higroscópico, estructura porosa, con alta humedad ligada, y se encoge solo al inicio del secado.
- c) Medio Coloidal, no es poroso, la humedad solo es superficial, y todo el líquido está ligado a la estructura.

El transporte de la humedad dentro del sólido puede deberse a alguno de estos mecanismos:

- a) Difusión del líquido, si el sólido húmedo está a una temperatura menor a la del punto de ebullición del líquido.
- b) Difusión del vapor, si el líquido se vaporiza dentro del sólido.
- c) Diferencias de presión hidrostática, cuando la velocidad de vaporización al interior del sólido es mayor que la de la vaporización superficial.

Luego entonces, puesto que la estructura del sólido cambia conforme avanza el secado, los mecanismos de transferencia de la humedad cambian paralelamente.

El comportamiento del proceso de secado se grafica de dos maneras (figura 23):

- a) El contenido de humedad del sólido en base seca versus el tiempo, y
- b) La velocidad de pérdida de humedad contra el contenido de humedad en el sólido.

Se observan cuatro etapas a lo largo del proceso y están relacionadas con la dificultad del movimiento del líquido en la estructura del sólido, ya sea por difusión o por capilaridad. En la primera etapa A-B la pérdida es rápida porque la humedad es superficial, enseguida hay una zona de velocidad estable B-C en la que el líquido no está ligado a la estructura y le permite desplazarse con facilidad, pero cuando la humedad es más profunda la dificultad para extraerla es grande y la velocidad de pérdida de humedad cae súbitamente C-D; a este punto se le llama *contenido de humedad crítica*. En la etapa D-E ocurre evaporación al interior de la estructura a la temperatura

de bulbo húmedo del sólido y a una presión de vapor es menor que aquella de la temperatura de la corriente de aire de secado, lo que causa que, al ya no haber suficiente líquido para evaporar en la superficie del sólido, la temperatura de éste se incrementa hasta alcanzar la temperatura de la corriente de aire. figura 24. (J.D.Seader, Henley, & Roper, 2011) p.752.

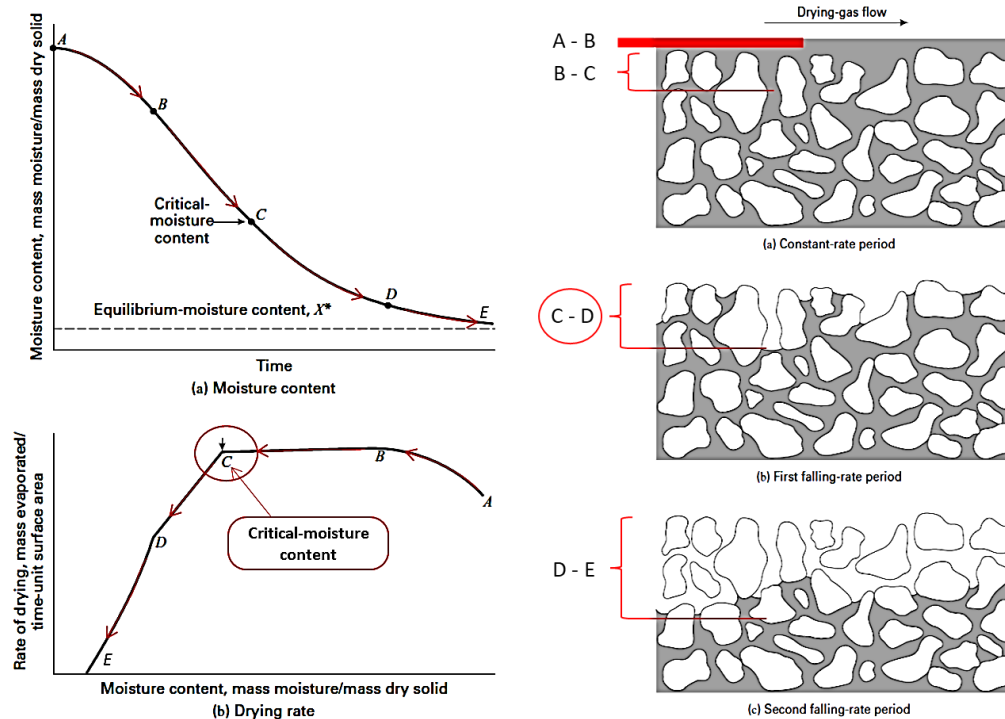


Figura 23. Las cuatro etapas del secado en condiciones constantes.
Adaptado de: (J.D.Seader, Henley, & Roper, 2011)

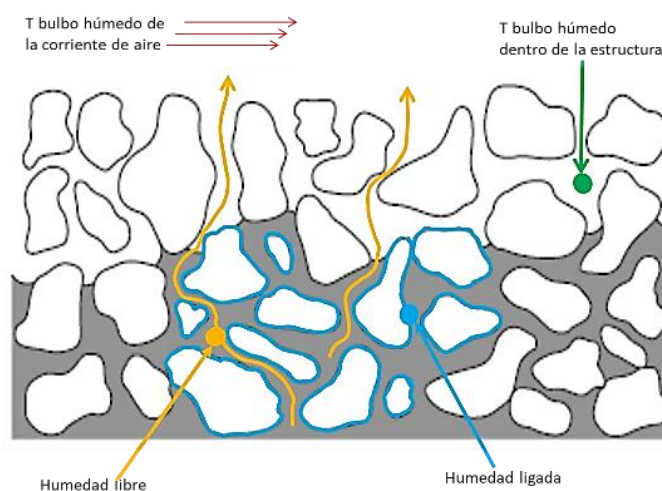


Figura 24. Condiciones de temperatura y humedad en los alrededores del sólido.
Adaptado de: (J.D.Seader, Henley, & Roper, 2011)

El movimiento del líquido dentro de la estructura se convierte en importante cuando el secado debe rebasar el contenido de humedad crítica, que para eso se requieren tiempos de residencia prolongados y temperaturas altas, si es que el producto lo permite, que pueden llevar al encogimiento excesivo, rompimiento de la partícula, o descomposición; en tales casos es conveniente trabajar con corriente de aire con alta humedad relativa para retardar el movimiento interno de la humedad causado por el gradiente de presiones de vapor entre el interior y la superficie. (Mujumdar, 2006) p.33.

Considerando las formas de la humedad dentro del material como libre y ligada, es interesante pensar que el tamaño o espesor de la pieza a secar sea lo suficientemente pequeña, delgada, o tal vez cortando la pieza transversal y longitudinalmente para que el corazón gelatinoso de la pulpa tenga mayor habilidad de evaporación de la humedad libre y sea más eficaz, así se podría asumir que la temperatura de la corriente de aire y la de la pieza serían similares y que las tres variables, tamaño o espesor, masa unitaria, y temperatura del aire, sirvan como parámetros de control.

Posiblemente convendría tener una etapa de calentamiento de la partícula haciendo recircular la corriente de aire por un tiempo, ganando el vapor de la humedad superficial, y seguida de una etapa de entrada gradual de aire fresco y baja humedad relativa, creando entre ambas un gradiente de presión de vapor entre el interior de la partícula y los alrededores, debido a la diferencia de las humedades entre las etapas causando con esto el movimiento de la humedad interior hacia la superficie (figura 25). Es importante considerar el acomodo de la carga en las charolas para generar canales internos de recirculación.

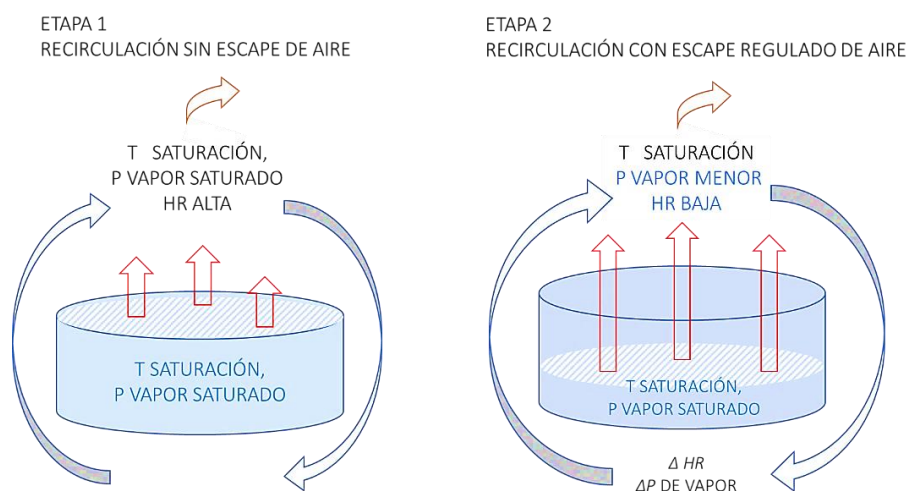


Figura 25. Etapas propuestas de calentamiento y secado de la partícula.
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, temperatura de salida y la humedad relativa tendrían comportamiento de dos inflexiones con una tercera inflexión imperceptible y asintótica hacia los valores iniciales de entrada de la corriente de aire, indicando que a partir de la tercera inflexión el sólido se calentaría con una pérdida de humedad mínima porque se trataría de la humedad ligada a la estructura del sólido (figura 26), cambiando entonces sus características físicas.

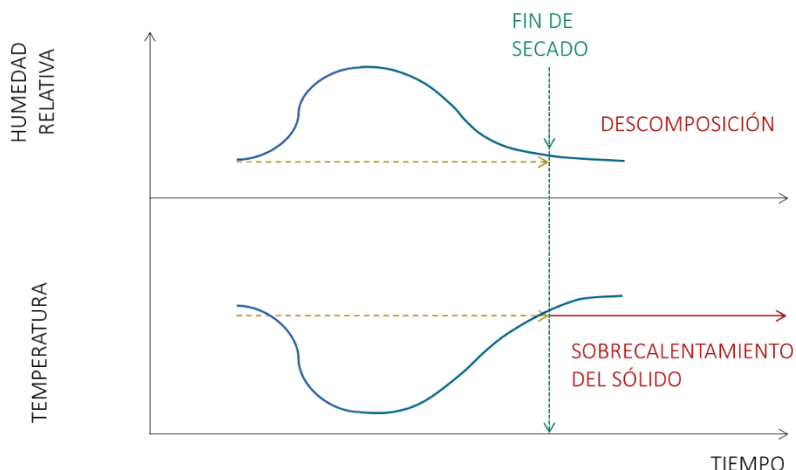


Figura 26. Comportamiento esperado del aire de salida.
Fuente: Elaboración propia.

Conforme el secado avanza, la concentración de sólido se incrementa y causa una disminución en la presión de vapor debido a las fuerzas osmóticas en el interior de la estructura del sólido, de manera que una subsecuente remoción de humedad se desplaza hacia la superficie. (Mujumdar, 2006) p.33.

2.2.3. Morfología y composición de la pulpa del plátano.

Analizando la figura 25 (Anne Vézina J. G., 2020) se observa en cortes transversales secuenciados para tres estados de maduración de la flor hasta convertirse en fruta. La pared del ovario que circunda los tres óvulos al inicio se convierte en lóculos ocluidos de los óvulos estériles para convertirse en la pulpa y cáscara con una forma gelatinosa de alto contenido de humedad; mientras que al centro quedan los óvulos estériles o semillas. Se ha encontrado que especies silvestres y domésticas de plátano presentan similares estructuras en la semilla y su anatomía, además, se explica que el contenido de humedad en semillas de plátano fresco oscila del 31 al 46%, y la masa fibrosa que rodea a la semilla está saturada de agua y se encoge al secarse. (Anne

Vézina J. G., 2020); es decir, la zona locular que rodea a los óvulos está dividida en tres cámaras o lóculos que los contienen y están embebidos en un gel mucilaginoso (Anne Vézina J. G., 2020). Lo que explica que la parte que más tarda en secar es el centro de la rodaja por estas dos razones, el alto contenido de humedad en los lóculos que rodean a las semillas y por la consistencia gelosa del líquido en esa zona, que se observan en las figuras 27-28, en consecuencia, es importante poner especial atención en el manejo de la pieza para el secado, como podría ser el espesor de la rodaja, el incremento del área expuesta, separando el centro de los lóbulos circundantes y fibrosos, o recortando la zona central en trozos más pequeños.

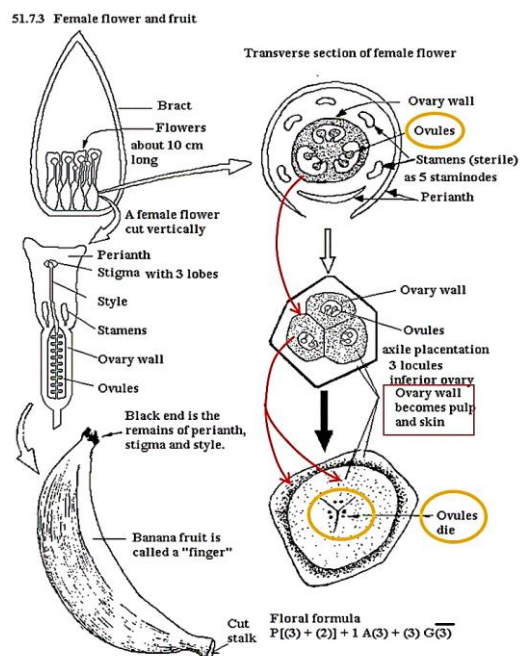
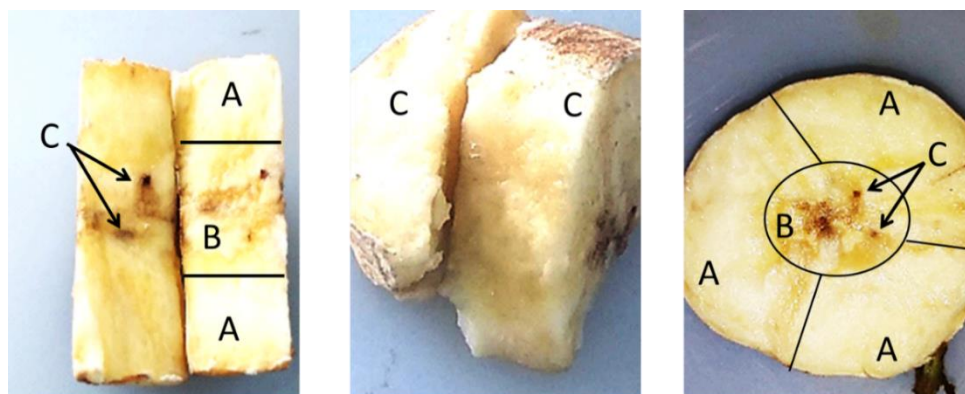


Figura 27. Flor hembra del plátano.
Adaptado de Fuente: (Anne Vézina J. G., 2020)



A. Lóculos. B. Ovario. C. Óvulos.

Figura 28. Cortes longitudinal, oblicuo y transversal.
Fuente: Elaboración propia.

La estructura no se muestra como un material poroso o con canales que propusieran la facilidad para el flujo interno de la humedad crítica, por el contrario, es un líquido mucílago viscoso atrapado en una masa gelatinosa y el centro está del ovario rodeado por una película que protegió a los óvulos. Al presionar la pulpa con una espátula se observa que el mucílago cristalino y brillante brota de las dos zonas, locular y ovárica en el centro, que sugiere un alto contenido de humedad.

La composición del plátano de manera general se presenta en la tabla 9 por Guyléne Aurore et al (Guyléne Aurore, 2009), se observa que las variedades de plátano presentan un valor de contenido de humedad del 69% para plátanos no maduros, y 3.0% para harina o deshidratados, o del 0.6 de humedad libre a_w , a fin de elaborar la harina evitando el riesgo de descomposición, que es una excelente referencia como especificación para el producto terminado.

2.2.1. El producto: Harina de plátano.

El objetivo del secado en los alimentos es conservar o prolongar su vida útil mediante la disminución la cantidad de agua disponible y evitar que actúe en reacciones de deterioro ya sea químico o microbiológico; aunque el contenido de humedad en sí mismo no es un indicativo de garantía de conserva puesto que a valores similares de contenido la estabilidad de los productos es variable, entonces se opta por asociar el contenido de humedad al valor a_w que es una medida de la depresión de la actividad del agua, que combinando valores adecuados con un empaque conveniente se puede hacer más eficaz la conserva. (Fito Maupoey, 2016).

De acuerdo con (Fito Maupoey, 2016), las características finales más relevantes del producto final serán los aspectos organolépticos (color, sabor, aroma, textura); los nutricionales como el valor vitamínico y el valor biológico de las proteínas; las características físicas como la forma y tamaño; y principalmente la conservación del producto que evite el deterioro físico, químico, bioquímico, y microbiológico. El parámetro de humedad libre a_w , que se asocia a la cantidad de humedad mínima requerida para que exista el crecimiento microbiano, es un valor que se marca como especificación máxima para el producto terminado, y se calcula como la relación entre la presión parcial del agua p , sobre el sólido húmedo con la presión de vapor del agua pura p^0 , ambos a la misma temperatura, o de otra manera, es igual a la Humedad Relativa HR en el equilibrio del aire que rodea a la pieza:

$$a_w = \frac{p}{p^0} = \frac{\%HR}{100} \quad (\text{ecuación 3})$$

Table 3. Chemical composition and biochemical features of banana and plantain at different physiological stages, and after transformation, per 100 g of fresh weight							
Component or parameter	Unit	Sweet banana pulp				Plantain pulp	
		Ripe ^a	Unripe ^b	Dried ^a	Dehydrated or flour ^a	Unripe ^c	Ripe
Energy	Kcal	89	110 ^b	257	340	91	122 ^e
Water	g	74	69 ^b	28	3.0	63	65 ^e
Protein	g	1.1	1.4 ^b	3.0	3.9	0.8	1.3 ^e
Total lipid	g	0.3	0.2 ^b	1.0	1.8	0.1	0.37 ^e
Carbohydrate	g	21.8	28.7 ^b	63.0	82.1	24.3	32 ^e
Dietary fibre	g	2.0	0.5 ^b	5.5	7.6	5.4	2.0–3.4 ^e
Na	mg	1.0		8.0	3.0		4.0 ^e
K	mg	385.0		1150.0	1491.0		500 ^e
Ca	mg	8.0	8 ^b	20.0	22.0	7	3.0 ^e
Mg	mg	30		90.0	108.0	33	35.0 ^e
P	mg	22		75.0	74.0	35	30.0 ^e
Fe	mg	0.42	0.9 ^b	1.3	1.15	0.5	0.6 ^e
Cu	mg	0.11		0.4	0.39	0.16	
Zn	mg	0.18		0.5	0.61	0.1	
Mn	mg	0.2			0.57	15	
Eq. β -carotene	μ g	68.0	48.3 ^b	150.0	183.0	0.03–1.20	390–1035 ^d
Vitamin E	mg	0.29		0.6		–	
Vitamin C	mg	11.7	31 ^b	4.0		20	20 ^d
Thiamin	mg	0.04	0.04 ^b	0.1	0.18	0.05	0.08 ^d
Riboflavin	mg	0.07	0.02 ^b	0.18	0.24	0.05	0.04 ^d
Niacin	mg	0.61	0.6 ^b	2.0	2.8	0.7	0.6 ^d
Panthenic acid	mg	0.28				0.37	
Vitamin B6	mg	0.47				–	
Total Folate	μ g	23.0				0.016	
Biotin	μ g	2.6				–	
Isoleucine	mg	34.0			167.0		
Leucine	mg	71.0			359.0		
Lysine	mg	50.0			162.0		
Methionine	mg	14.0			74.0		
Cystine	mg	20.0			63.0		
Phenylalanine	mg	41.0			201.0		
Tyrosine	mg	26.0			121.0		
Threonine	mg	36.0			171.0		
Tryptophan	mg	13.0					
Valine	mg	49.0			282.0		
Arginine	mg	57.0			176.0		
Histidine	mg	86.0			333.0		
Alanine	mg	43.0			222.0		
Aspartic acid	mg	120.0			503.0		
Glutamic Acid	mg	115.0			399.0		
Glycine	mg	41.0			190.0		
Proline	mg	43.0			229.0		
Serine	mg	49.0			226.0		
Dopamine	mg	65.0					
Serotonine	mg	3.3				45 ^c	76 ^c
Thiamine	mg	0.7					
Malic acid	meq	6.20 ^c	1.36 ^c				
Citric acid	meq	2.17 ^c	0.68 ^c				
Oxalic acid	meq	1.37 ^c	2.33 ^c				
Other acids	meq	0.17 ^c	0.19 ^c				
^a CIQUAL – CNEVA (1993). ^b Anonymous (1981). ^c Marriott and Lancaster (1983). ^d Woolfe (1992). ^e Lassoudière (2007).							

Tabla 9. Composición química del plátano de variedades y estados de madurez.
Fuente: (Guylène Aurore, 2009)

Es factible que el alimento se torne café debido al contenido de humedad presente y esto sucede en valores de a_w de entre 0.6 y 0.7 (S.V. Jangam, 2010, pág. p.21),

2.2.2. Determinación de humedades.

2.2.2.1. Contenido de humedad.

Existen métodos de medición, indirectos por secado de la muestra en estufa hasta peso constante; y los métodos directos que implican mediciones de características eléctricas o de resistividad, o en su caso mediante reacciones químicas.

Los pasos genéricos para los métodos indirectos:

1. Preparar el recipiente a peso constante calentándolo en estufa a temperatura alta para eliminar volátiles que pudieran interferir en el resultado final.
2. Preparar una muestra de alrededor de 5g cortándola en piezas pequeñas que faciliten la evaporación.
3. Calentar a temperatura acorde al material; en general, si es inorgánico a temperaturas altas rondando los 110°C, si el material es orgánico o sensible a la temperatura, entonces, alrededor de los 60°C por tiempos prolongados.
4. Sacar la muestra de la estufa y colocarla en un contenedor sellado y con material que absorba la humedad ambiental.
5. Esperar a que enfríe y pesar.
6. Repetir el calentamiento hasta que la diferencia en peso entre intentos sea menor entre la última y la anterior.

Existe otro método indirecto, automático y que es continuo con una termobalanza, en este instrumento la muestra se calienta y va determinando el peso constantemente. (Martínez & Segovia, S/A), (Mujumdar, 2006) p.53.

2.2.2.2. Humedad libre a_w .

Así también es importante la determinación de la humedad libre a_w , que actúa como facilitador de la actividad microbiológica y enzimática en el periodo de almacenaje y anaquel; existen diversos métodos instrumentales y fisicoquímicos para la determinación de a_w , uno conveniente y práctico es el Higrométrico, que consiste en simular microambientes de humedades en equilibrio de referencia y someter la muestra en ambos para calcular a_w por una interpolación la masa ganada

y perdida por la muestra, encontrando el resultado en la abscisa cuando la diferencia de humedades sea cero en la ordenada, que representa el valor en el equilibrio de humedad de la muestra (M. Plácido, 2009), mostrando un ejemplo de ejecución en el video de la Universidad Tecnológica de Uruguay (Contenidos, 2020). Figura 29.

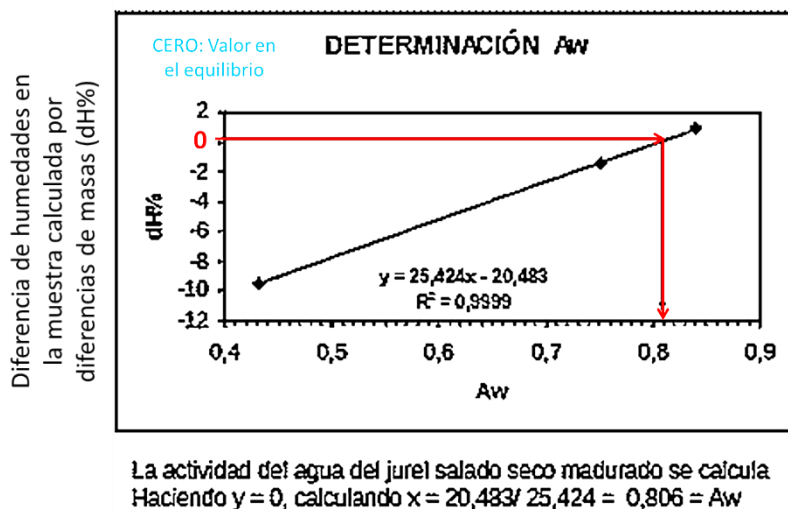


Figura 29. Ejemplo de cálculo de a_w por interpolación de humedades en equilibrio.
Fuente: Adaptado de (Plácido, 2005)

Es conveniente desarrollar una correlación entre el contenido de humedad de producto y la humedad libre del material deshidratado, con la intención de obtener un valor de referencia más oportuno a la salida del secador y evaluar el producto en el momento.

2.3. Estado de la cuestión

La producción de plátano está altamente concentrada en países tropicales en el sureste de Asia, África, Centroamérica, y el norte de Sudamérica, de modo que la mayoría de los estudios realizados son de estos países, principalmente de la India y algunos menores como Honduras, Guatemala, o Colombia; y estos se relacionan tanto como con la cinética – que estudia la velocidad de secado en condiciones establecidas - así como para técnicas de secado.

De los equipos y métodos mencionados en el numeral 2.1 se diferencian por la forma en que se aporta calor, si el proceso es por lote o continuo, la forma del material: granular, pasta, sólido grande, o en suspensión; pero añadiendo que el producto es perecedero, existen otras formas de deshidratación como la osmótica que utiliza excesos de sal o azúcar para así disminuir la concentración del agua libre a_w .

Se ha encontrado que la opción más viable para el secado del plátano ha sido cortarlo en rodajas transversales o en láminas longitudinales y exponerlo a una combinación de temperatura y tiempo de residencia en hornos de charolas de convección forzada o natural, operando en continuo o por cargas, con una fuente de calor artificial, o natural de exposición al sol.

Jigesh Mehta *et al* (Jigesh Metha, 2020) en su artículo mencionan que la mejor forma de secado es en rebanadas sometidas a una recirculación de calor; el efecto de la temperatura y el espesor de la rebanada son características importantes para el secado; pero también la temperatura influye en la difusividad del agua intrínseca atrapada en el seno del material. En sus conclusiones habla del impacto del pretratamiento de calor-frío (blanching) a tiempos iguales favorece la conservación de la apariencia y reduce el tiempo de secado.

Así también, (Antonio Vega Gálvez, 2012) en su artículo para el secado de manzana en rebanadas, menciona que el deshidratado con aire caliente sigue siendo el método más común, pero la combinación de temperatura y tiempo altos pueden afectar las propiedades organolépticas de la fruta, de modo que estas junto con la velocidad del aire de secado son variables importantes en la operación, resultando una relación inversamente proporcional entre la temperatura y el tiempo de secado (figura 30).

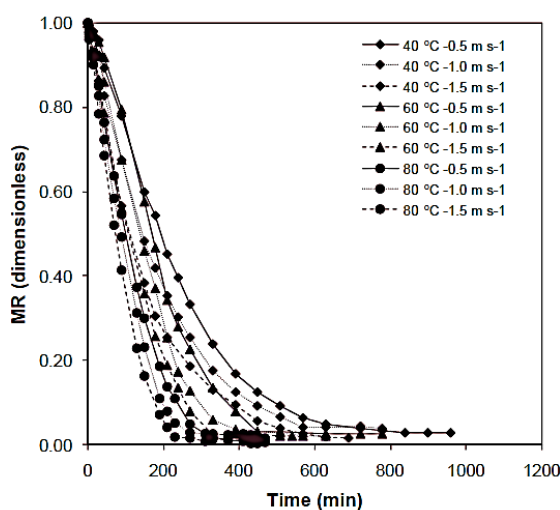


Fig. 1. Drying curves at air temperatures of 40, 60 and 80 °C for three different air velocities.

Figura 30. Curvas de secado de manzana temperaturas y velocidades de aire.
Fuente: (Antonio Vega Gálvez, 2012).

Entretanto, a la velocidad del aire en la convección forzada como el factor más relevante, por encima de la temperatura, para favorecer la difusividad de la humedad atrapada en la manzana en el proceso de secado. El plátano se rebanó en láminas de 5.0 ± 0.2 mm de espesor, con condiciones de secado: HR $72.0 \pm 4.0\%$, una densidad de carga de 4.4 ± 0.4 kg/m² y muestras de 100.0 ± 0.1 g, para realizar pruebas con variaciones de temperatura de aire (40, 60, 80°C) y velocidades (0.5, 1.0, 1.5 m/s).

Sus conclusiones refieren que la combinación de alta temperatura y velocidad entregaron un menor tiempo de secado, entre otras.

Los artículos de (Jigesh Metha, 2020) y (Ratiya Thuwapanichayanan, 2008) proponen el secado de la pulpa de plátano convirtiéndolo en una espuma mediante la agitación y utilizando albúmina de huevo como agente espumante, haciendo con esto atrapar burbujas de aire reduciendo su densidad y multiplicando el área de transferencia para extraer la humedad atrapada en la estructura de la pulpa, (Ratiya Thuwapanichayanan, 2008) logró un secado de 0.03 kg/kg base seca.

(Nimesh Chauhan, 2016) sugiere que dar un pretratamiento por inmersión en una solución de limón (1:1) conservará las propiedades organolépticas del producto final, además propone realizar una deshidratación antes del secado final con aire caliente que también reducirá el contenido de humedad, el tiempo de secado y el consumo de energía. Concluye su estudio que la forma más efectiva para el secado es un secador de charolas multipropósito.

Para la elaboración de la harina de plátano con fines de nutrición estos autores (Amir Amini Khoozani, 2019) muestran tablas comparativas de los métodos de secado, y el impacto en algunas de las propiedades de la harina (tablas 10 y 11), y parámetros de diversas referencias que sirvan de línea base para la comparación y establecimiento de éstos en esta implementación.

Finalmente, existen otros estudios como el realizado por Jun Qiu *et al* (Jun Qiu, 2019) que analiza el proceso de secado continuo de una suspensión a temperaturas desde 60 hasta 90°C con incrementos de 10°C, consiste en un equipo vertical que hace fluir la suspensión hacia abajo creando una película descendente que tiene contacto con una camisa caliente que hace evaporar los volátiles del líquido o pasta, cayendo el sólido seco por la parte inferior del cilindro.

mejor velocidad	VELOCIDAD AIRE (m/s)	mejor tiempo	TIEMPO (horas)	mejor Temperatura	TEMPERATURA (°C)	FORMA	CARGA (kg/m ²)	PROCESO	TIPO DE SECADOR	FRUTA	HUMEDAD FRUTA %	AUTOR
		33	1-2-3	70	60-70-80	Rebanadas		Lote	Convección Natural	Plátano	75-78	(Jigesh Metha, 2020)
	14		6		55				Convección Forzada	Plátano		(Amir Amini Khoozani, 2019)
			20		40-50-60	Rebanadas 5+/-0.2 mm 90° del eje	11.1	Lote	Convección Forzada 24 a 95 %HR	Plátano	87	Lecciones aprendidas
			72		70	Pulpa espumada		Lote	Convección Natural	Plátano		(Jigesh Metha, 2020)
					70-75-80	Rebanadas 7 mm		Lote	Convección Forzada	Plátano	72-77	(Nimesh Chauhan, 2016)
	0.5	2-0.3 g/mL 1-0.3 g/mL 5-0.5 g/mL 2.5-0.5 g/mL	2-0.3 g/mL 5-0.5 g/mL	60 80	60-70-80	Espuma 5mm		Lote	Convección Forzada	Plátano		(Ratiya Thwapanichayan, 2008)
1.5	2.0 +/- 0.1 perpendicular	8		80	40-50-60-70-80	Rebanadas 5+/-0.2 mm 90° del eje	4.4	Lote	Convección Forzada	Manzana		(A. Vega Gálvez, 2008)
	0.5-1.0-1.5				40-60-80	Rebanadas 5+/-0.2 mm 90° del eje		Lote	Convección Forzada 72 +/- 4 %HR	Manzana		(Antonio Vega Gálvez, 2012)
					60-70-80-90	Suspensión		Continuo	Vertical, película agitada	Hojas de espinaca		(Jun Qiu, 2019)

Tabla 10. Referencias de parámetros de operación de secadores diversos. Fuente. (propia).

Es muy importante acotar que el horno de deshidratación es de fabricación propia de la empresa, adaptado de un refrigerador de dos cámaras, que se le insertó un ducto interior para conducción y distribución de aire, forzado desde la parte inferior donde se instalaron ventiladores y una turbina para hacer circular el aire a través de un radiador para su calentamiento, como se muestra en la figura 33; esto podría influir sobre la eficiencia y eficacia de algunas variables de proceso, y de las que posiblemente no se podría tener control que ayudara dar una optimización del resultado en el contenido de humedad final en el producto.

Table 2 The effect of different drying methods on banana flours

Method	Conditions	Banana flour type	Remarks	Reference
Room drying	23 °C 6 days	GBPeF	Minimum or no maillard reaction Long preparation time	Eshak (2016)
Oven drying	50–60 °C 12–24 h	GBPF	↑ Phenolic acids with in higher temperatures ↓50% of RS in final flour	Alkarkhi et al. (2011), Juarez-Garcia et al. (2006), Segundo et al. (2017a), Yangilar (2015)
Air flow drying	55 °C, 6 h 1.4 m/s	GBPF	RS content remained constant between GBPF and banana paste Low dispersibility and solubility in water	Tribess et al. (2009)
Spouted bed with hot air flow	80 °C 50 m ³ /h	GBF GBPF	No need for grinding process after drying Maintaining RS to 35% in GBF and 42% in GBPF RS content remained constant between GBPF and banana paste	Bezerra et al. (2013b)
Pulsed-fluidized bed agglomeration	95 °C, 0.3 m/s 10 Hz 1 m/s (air flow)	GBPF	Low solubility under cold conditions Lower wetting time Dispersible in cold water Higher level of RS achieved in GBPF	Rayo et al. (2015)
Ultrasound and pulsed-vacuum followed by air drier	20–25 min (ultrasound) 60 min under 50 kPa pressure (vacuum convective drier) 50 °C (air drying)	GBPF	↓RS in US pretreatment followed by 60°C heating in GBPF No significant increase in RS amount	La Fuente et al. (2017)
Microwave heating	960 W for 6 min	YBPeF	↓Lightness more than other drying methods Lowest drying time Minimum loss of bioactive compounds, total phenolic and antioxidant activity Maximum moisture content compared to other drying methods (but below the safe limit)	Vu et al. (2017)
Freeze drying	– 50°C, 12–48 h	GBPeF GBPF GBPF YBPf	Maintained the original colour regarding the least browning reaction Highest value of total flavonoids reported in YBPf	Da Mota et al. (2000), Türker et al. (2016), Vu et al. (2017), Wang et al. (2012)
Spray drier	27,000 rpm (atomizer rotation) 50% (biomass concentration) 30 °C (biomass temperature) 40 mL/min (biomass flow rate)	GBPF	Moisture content of 9.17% Fastest method after microwave No analytical measurements	Oi et al. (2013)
Dehumidified drier	60 °C, 13 h	YBPeF	Highest flour lightness after freeze drying Lowest phenolic compounds	Vu et al. (2017)

GBPeF green banana peel flour, GBPF green banana pulp flour, YBPeF yellow banana peel flour, YBPF yellow banana pulp flour, RS resistant starch

Tabla 11. Efectos de los diferentes tipos de secado en la harina de plátano.

Fuente: (Amir Amini Khoozani, 2019).

2.4. Conceptos y enfoques teóricos relacionados

De manera resumida se expone el mecanismo de transferencia de masa (vapor de agua) durante la deshidratación, y las variables que internas y externas que la condicionan.

Externas	Internas
• HR - humedad relativa • Velocidad del aire • Tamaño y forma de la pieza • Temperatura y presión • Soporte del material a secar	• Contenido de humedad del material a secar • Estructura interna • Movimiento interno de la humedad por: • Difusión o Capilaridad • Gradiente de humedad • Superficial e interna • Gradiente de temperatura y de presión • Tiempo de residencia

La estructura de la pulpa del plátano no es fibrosa como lo es el tallo de la planta sino tiene una consistencia mucilaginosa – viscosa con un centro de aproximadamente la mitad del diámetro transversal con un altísimo contenido de humedad, y con la parte circundante con una consistencia carnosa.

La importancia del contenido de humedad en la harina como producto terminado es porque es muy influyente en la vida útil del producto y su conservación, puesto que rebasando su límite superior de la humedad activa a_w , el producto es propenso al desarrollo microbiano que causa cambios a las características organolépticas.

3. Marco metodológico de referencia

3.1. Definición de la metodología del análisis de la problemática, selección de las herramientas requeridas y el cronograma.

El estudio objetivo para esta intervención es la aplicación secuenciada de la metodología DMAIC (Definición, Medición, Análisis, Incremento, Control), apoyada en el uso de herramientas estadísticas para el análisis de los resultados obtenidos (tabla 12), y lograr la mejor conclusión respecto del establecimiento soportado de los parámetros para el proceso de secado, que es el objetivo principal.

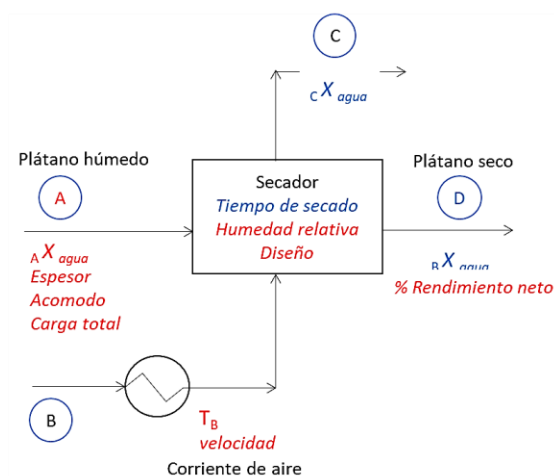
MATRIZ DE HERRAMIENTAS DE CALIDAD UTILIZADAS		
ETAPA	MÉTODO - HERRAMIENTA	ALCANCE
D	Diagrama de flujo de proceso	Describir de manera genérica las etapas y la primera aproximación al impacto de cada una al contenido de humedad del producto terminado.
	Diagrama Ishikawa	Reconocer la contribución ponderada de las etapas al contenido de humedad al producto; además, Detallar el funcionamiento de la etapa de secado y las influencias ponderadas de cada una de sus secuencias.
	SIPOC	Encontrar los requerimientos de las etapas secuenciadas considerando cada una como cadena de cliente-proveedor.
	VOC	Puntualizar los requerimientos del cliente y traducirlos a especificaciones de producto.
	Matriz de prioridades causa-efecto	Detallar el funcionamiento de la etapa de secado y las influencias ponderadas de cada una de sus secuencias.
	Gráficas de control	Observar el comportamiento de la variable en el tiempo y su respuesta ante un cambio en el proceso.
	Project charter	Declaración ejecutiva del proyecto.
	Gantt	Administración de las actividades del proyecto en el tiempo.
M	Instrumentos de medición de temperatura, humedad relativa, y masa	Verificación de estado y confiabilidad de mediciones
	Métodos de trabajo actuales	Línea base de operación.
	Método de análisis de contenido de humedad	Análisis de producto terminado
	Metodología de prueba	Definir la combinación de variables controlables para obtener el mejor resultado posible del rango para el contenido de humedad
A	Gráficos de dispersión	Relación entre variables y el contenido de humedad en producto.
	Gráficas de control	Comportamiento de variables de operación.
	Histogramas y diagramas de caja	Análisis de comportamiento de variables
	Software estadístico	Tratamiento de los datos.
	Análisis de regresión y correlación	Relación entre variables
	Definición de parámetros de operación	Propuesta de método de operación.
I	Diseño de pruebas, variables y tratamientos	Evaluar el impacto de modificar variables sobre el contenido de humedad en el producto, propuesta de nuevos parámetros de operación.
	Histogramas y diagramas de caja	Análisis de la respuesta a las variables controlables modificadas y el comportamiento en el contenido de humedad
C	Gráficas de control	Evaluar en el tiempo el comportamiento de los últimos parámetros de operación.

Tabla 12. Matriz DMAIC de herramientas de calidad. (propia)

Medición

En la teoría de secado se referencian variables que pueden influir sobre la cinética del proceso, la transferencia de humedad desde el material hacia el aire, la transferencia de calor desde el aire corriente hacia el material, y en consecuencia sobre el contenido de humedad final en el material y el tiempo de ciclo. Este conjunto de variables son la temperatura del aire caliente, su velocidad y humedad relativa; otras que son inherentes al material como su estructura y contenido de humedad; relativas al diseño del equipo como la forma de crear flujo y turbulencia sobre el material y el formato de las charolas, perforadas o lisas; las relacionadas a la operación, como la cantidad de material que se carga, su acomodo y la secuencia de pasos y manejo del equipo; y finalmente, las condiciones del aire del microambiente que rodea al secador, su temperatura y humedad relativa, que es de donde toma aire para ingresarlo al horno.

En la figura 31 se encuentran las variables de entrada y de salida para el secador y sobre las que se enfoca este estudio.



VARIABLES DEL PROCESO DE SECADO				
ENTRADA	CONTROLADA		SALIDA	
Carga total de entrada (kg)	A	Si	Carga total de salida (kg)	D
Contenido de humedad del plátano	$A X_{\text{agua}}$	No	Contenido de humedad del plátano	$B X_{\text{agua}}$
Espesor de pieza (mm)	--	Si	Contenido de humedad aire de salida	$C X_{\text{agua}}$
Acomodo de piezas	--	Si	Rendimiento neto (% masa pulpa seca/masa pulpa húmeda)	% RN
Temperatura del aire de entrada (°C)	T_B	Si		
Temperaturas internas de cámaras (°C)				
Humedad relativa dentro de cámaras (%HR)				
Velocidad de aire (m/s)	--	No		
Diseño de construcción	--	No		

Figura 31. Variables de proceso de secado para este equipo particular.
Fuente: Elaboración propia.

Enseguida se elabora un análisis de causa efecto (figura 32) para definir las variables más convenientes a medir en el proceso, considerando aquellas que sean controlables operativamente, y valorando el impacto de las que no se pueden manipular, además de las limitantes por la propia

construcción adaptada del equipo. Se ponderan el impacto (I), la capacidad de que la variable sea controlable (C), y la capacidad de que la variable se pueda mitigar (M).



Figura 32. Análisis impacto-control-mitigación de variables.
Fuente: Elaboración propia.

La luz verde indica una variable que se puede controlar y que requiere alguna forma de manejo operativo, aquellas en color naranja son las que no se pueden controlar pero que de manera indirecta se puede mitigar su impacto; en rojo la variable que no es posible manipular, principalmente por el diseño del equipo.

Atendiendo a las variables que son causa raíz del contenido de humedad en el producto seco se relacionan en este análisis de la figura 32 del que se derivan acciones concretas que impactan directa o indirectamente sobre la variable de respuesta, desglosando el diagrama se tiene que:

- Contenido de humedad de la fruta, es una variable no controlada que depende de la variedad y madurez del plátano, completamente ajena al control de la empresa, pero que de acuerdo

a la literatura se estima un contenido en un rango del 65 al 75%; las acciones que mitigan esta condición son el corte en rodajas, su acomodo en las charolas y la cantidad de plátano por charola..

- b) Estructura propia de la fruta completamente de la naturaleza del plátano, que tiene una consistencia viscosa mucilágnea que es difícil de modificar, pero se mitiga con el corte en rodajas que favorece el aumento del área de transferencia; la acciones que mitigan esta condición son el corte en rodajas, su acomodo en las charolas y la cantidad de plátano por charola.
- c) Velocidad lineal y patrón de flujo de las corrientes de aire, son variables que se deben calcular desde el diseño y construcción del equipo, que dada la adaptación y bajo rigor técnico con que se construyó, no son variables que se puedan controlar, pero se pueden mitigar con acciones específicas mediante el acomodo de las rodajas en las charolas dejando una franja libre en los extremos opuestos a la entrada de aire, evitando con esto el estancamiento, velocidad igual a cero, y mejorando su patrón de circulación.
- d) Temperatura y humedad relativa dentro de cámaras, de igual manera, estas son variables que se dan desde el diseño y cálculo, no son controlables en la operación, pero sí se pueden mitigar con acciones concretas de regulación de la banda de operación de la temperatura del medio de calentamiento y con el manejo adecuado de la válvula de escape de gases-vapor. La temperatura del agua de calentamiento se regula manualmente y se dispone de una resistencia para su control. La humedad relativa está íntimamente relacionada con la temperatura del aire, pero se propone dejar cerrada al arranque para alcanzar temperatura estable, enseguida hacer una purga rápida con poca apertura para bajar la humedad, y en adelante mantener una apertura del 10% solo para dejar escapar vapor y mantener temperaturas.
- e) Finalmente, la temperatura y humedad relativa en el microambiente que rodea al horno, se puede mitigar de dos maneras, la primera, asegurar que los vapores salgan a una atmósfera diferente del ambiente del horno para evitar recirculaciones de aire húmedo proveniente de la cámara; en segundo lugar, verificar que no haya fugas del aire interno hacia el ambiente del horno.

Las variables que sobre las que se actúa y que son controlables son: El *peso total de carga de pulpa*, repartido equilibradamente en el número de charolas, el *acomodo de las rodajas* en las charolas, la *secuencia de operación del secador* que relacione las etapas propias del proceso. La *temperatura del medio de calentamiento*, el tiempo de secado y con esto intentar hacer más productivo el proceso. Finalmente, tratar de influir en las condiciones ambientales mediante la entrada de aire fresco al microambiente que circunda al equipo. Sobre las que no se tiene control son la velocidad, el patrón de flujo, la estructura de la pulpa, y las condiciones internas de temperatura y humedad relativa de las cámaras.

Los instrumentos utilizados listados en la tabla 13 son calibrados de fábrica y no ha sido necesaria reposición ni servicio, adicional, se verifican periódicamente en su estado físico y sus mediciones con método sencillo y estable como es la temperatura de ebullición del agua (95°C), etanol (74°C) y acetona (51°C) a la presión atmosférica de Guadalajara. La condición de %HR no se calibra, solo es informativo. Finalmente, el tratamiento de los datos es procesado en el paquete estadístico Minitab 22 (2024).

	Variable	Síglas	UN	Instrumento	Posición	Marca	Modelo	Rango	Precisión	Verificado
1	Temperatura del medio de calentamiento	Tmc	°C	Termómetro	1	Yacumama Ipx7	TP301	-50 °C / +300 °C	± 1 °C	x
2	Temperatura interior superior	Tu	°C	Termohigrómetro	3	ThermoPro	TP50	-50 °C / 70 °C 10% - 99% HR	± 1 °F ±2%	x
3	Temperatura interior inferior	Td	°C	Termohigrómetro	2	ThermoPro	TP50	-50 °C / 70 °C 10% - 99% HR	± 1 °F ±2%	x
4	Humedad relativa superior	HRu	%	Termohigrómetro	3	ThermoPro	TP50	-50 °C / 70 °C 10% - 99% HR	± 1 °F ±2%	x
5	Humedad relativa inferior	HRd	%	Termohigrómetro	2	ThermoPro	TP50	-50 °C / 70 °C 10% - 99% HR	± 1 °F ±2%	x
6	Temperatura ambiente	Tamb	°C	Termohigrómetro	4	ThermoPro	TP50	-50 °C / 70 °C 10% - 99% HR	± 1 °F ±2%	x
7	Humedad relativa ambiente	HRamb	%	Termohigrómetro	4	ThermoPro	TP50	-50 °C / 70 °C 10% - 99% HR	± 1 °F ±2%	x
8	Carga de pulpa	C	kg	Báscula digital	--	AI-PIKA	180 kg	0.01 - 180 kg	0.01 kg	x
9	Tiempo de ciclo	TC	h	Reloj ordinario	--	NA	--	--	--	--
10	Rendimiento neto	RN	%	Báscula digital	--	AI-PIKA	180 kg	0.01 - 180 kg	0.01 kg	x
11	% de humedad en producto	%H	%	Secador	--	Matcha México	--	0.0001 - 3 kg	0.1 g	x

Tabla 13. Listado de instrumento de proceso y equipo de secado. (propia).

3.2. Análisis de referencia

El proyecto de implementación está orientado a la determinación de los parámetros de operación del horno de secado de plátano verde, y de manera secundaria a la propuesta de mejora de procedimiento o actividades en otras etapas del proceso, con el objetivo de estabilizar la operación de secado, lograr la consistencia del contenido de humedad en el producto y protegerlo a lo largo de la secuencia del proceso.

3.3. Metas de información

Las variables meta a monitorear son las que son controlables: carga de pulpa, temperatura del medio de calentamiento y el tiempo de ciclo; con estas se espera lograr el objetivo de calidad; y las variables de salida: la primaria que es el contenido de humedad en el material secado y la secundaria relacionada que es el rendimiento neto (masa de plátano seco respecto del plátano pulpa cargada al horno).

La obtención de datos es tomada directamente durante la operación del equipo, estos constan de nueve datos para control e información mostradas en la figura 33, temperatura del medio de calentamiento (1), temperaturas interiores inferior (2) e superior (3), humedad relativa inferior (2) e superior (3), temperatura y humedad (4) del cuarto donde está el secado, carga de pulpa, y tiempo de ciclo de secado; y una variable de interés de salida el contenido de humedad relacionado con el rendimiento neto.

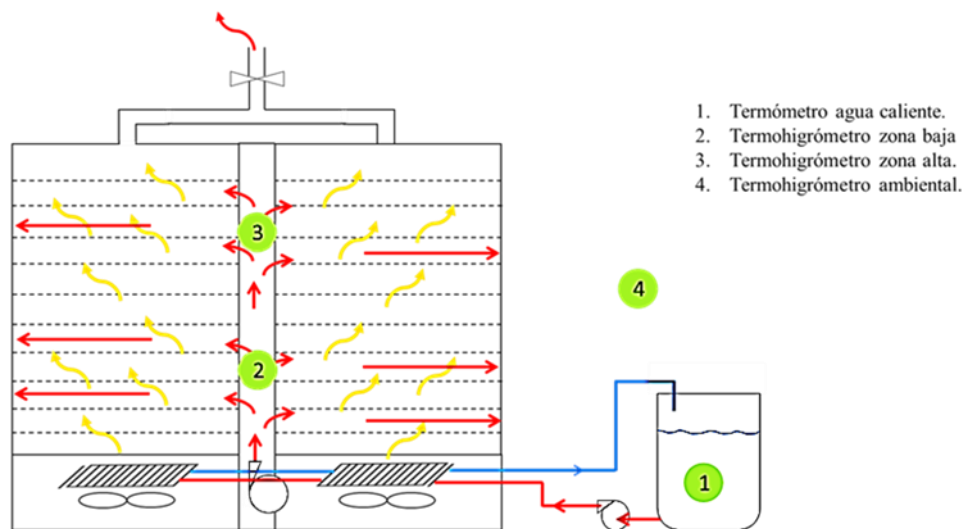


Figura 33. Esquema del horno de secado y ubicación de instrumentos.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis de los datos y considerando las variables controlables: temperatura del medio de calentamiento, carga de pulpa, y tiempo de ciclo, a valores establecidos convenientes para la operación de 75°C y 50 kg, se busca optimizar el rendimiento neto (peso pulpa seca/peso pulpa húmeda) y con esto el contenido de humedad en el material secado. En la figura 34 se muestra el rango resultante que se espera de esta optimización, de 22.34 a 23.92 con un intervalo de confianza del 95%, y una banda de 17.44 a 28.82% con un intervalo de predicción de rendimiento neto; estos rangos reflejan un contenido de humedad del 8.11 al 8.80% y del 5.99 al 10.92% respectivamente, que suponen valores apropiados para el cumplimiento de la meta en los VOC a una banda del 5 al 10% de contenido de humedad final.

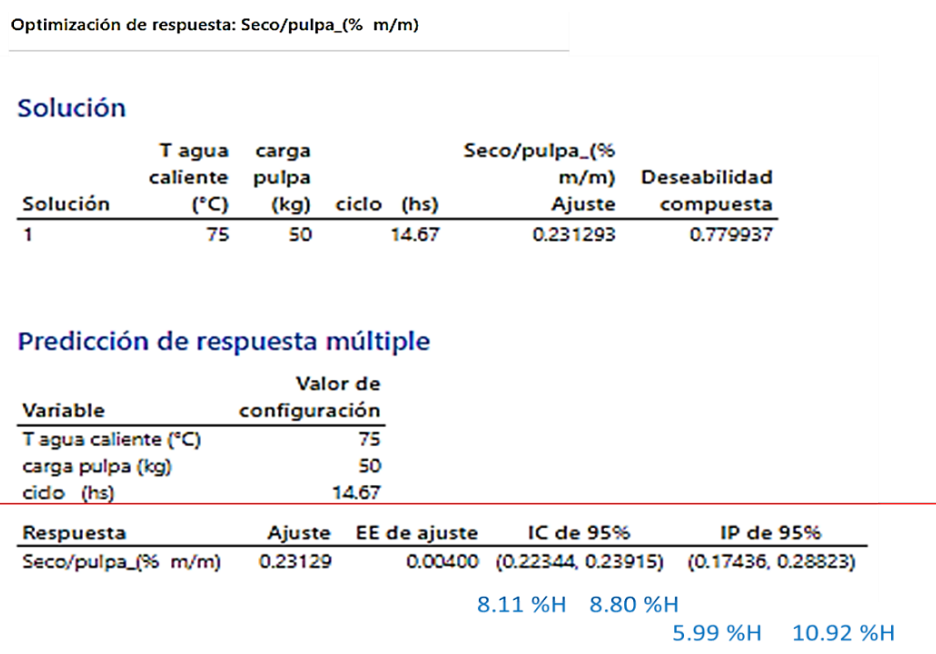


Figura 34. Valores de respuesta esperados 1ª implementación.
Fuente: Elaboración propia.

3.4. Identificación, descripción y cuantificación de métricas iniciales.

Se muestra la tabla 14 de datos recolectados en un periodo de dos meses y corresponden a la fabricación de siete lotes, después de la primera implementación de variables controlables:

- Temperatura del medio de calentamiento (75°C).
- Carga de pulpa de plátano (50 kg).
- Tiempo de ciclo (30 h).

De estas tres solo se aplicó control en el medio de calentamiento debido a la dificultad de la disponibilidad de la materia prima y la demanda del momento, además, se implementaron:

- El control de la válvula de escape de vapores a mantenerla cerrada durante la curva de calentamiento hasta los 50°C, enseguida una apertura 50% por 2 minutos y en tercera parte, mantener abierta al 10% para purga y renovación de aire y mantenimiento de temperatura interna.
- El acomodo de las rodajas en las charolas dejando una franja de 2 a 3 cm a lo largo y orientada hacia el extremo opuesto de la entrada de aire.

LOTE	FECHA	CICLO	PESO PULPA	PESO SECO	REND NETO	T cal	HRabajo	T abajo	HRarriba	T arriba	HRamb	T amb
A0123	03/02/2023	26.17	51.34	11.745	0.229	53	50	26	22	24.8	54	21.6
	03/02/2023					52	49	28.7	24	28.2	64	23
	03/02/2023					57	45	30.3	20	30.4	70	23.2
	03/02/2023					59	42	39	20	38.7	74	23.4
	03/02/2023					54.1	47	40	18	41.5	76	23.4
	03/02/2023					59.3	58	29.7	26	29.3	75	23.9
	03/02/2023					74.3	53	39.1	19	41.1	73	23.8
	03/02/2023					71	55	33.3	33	32.7	79.1	23.9
	03/02/2023					69.6	57	38.9	31	41	83	26.5
	03/02/2023					68.5	17	53.4	16	55.7	53	24.6
	03/02/2023					71.5	16	60.5	15	61.3	44	24.8
A0223	09/03/2023	21.55	24.078	6.405	0.266	93	17	31.7	18	28.6	36	22.9
	09/03/2023					96.3	27	27.6	20	25.4	44	22.9
	09/03/2023					94	52	28.4	18	34.7	59	22.5
	09/03/2023					79.7	21	44.32	16	41.7	46	23.2
	09/03/2023					69.3	31	39.9	17	43	43	24.9
	09/03/2023					57.5	26	44.3	17	47.9	47	24.6
	09/03/2023					58.4	30	46	16	49.1	44	25.2
	09/03/2023					58.5	30	46.3	16	49.3	44	25.2
	09/03/2023					95	32	46.3	17	47.3	44	25.2
	09/03/2023					77.8	33	45	15	57.2	51	25
	09/03/2023					74.5	16	64.1	15	65.4	35	23
	09/03/2023					93.2	36	28.7	20	26	42	23
A0223	10/03/2023	8.5	8.46	2.255	0.267	67	17	50.9	16	55	42.1	23
	10/03/2023					69.1	16	60.1	15	61.5	38	23.2
	10/03/2023					81	35	24.1	20	24	41	23.3
A0223	13/03/2023	19.75	16.55	4.235	0.256	96	71	24.5	41	24	57	23.3
	13/03/2023					96.3	75	24.3	44	27	57	23.4
	13/03/2023					65.1	24	48.4	15	51	45	22.8
	13/03/2023					60.2	23	48.9	16	50.5	43	23.3
	13/03/2023					94	27	44.8	17	43.9	43	23.4
	13/03/2023					94	32	44.9	18	44	43	23
	13/03/2023					84.6	21	57	15	56.7	43	23.4
	13/03/2023					82.1	17	53.9	15	47.7	35	29
	15/03/2023					81	45	23	20	22.3	20.6	44
	15/03/2023					90.1	30	38.9	18	38.9	22.2	53
	15/03/2023					82.6	26	52.9	15	52.1	22.8	64
	15/03/2023					75.9	21.1	57.1	15	56.1	65	23.5
A0323	15/03/2023	22.6	51.19	13.545	0.265	70.8	31	55.5	17	53.9	65	23.5
	15/03/2023					69	42	51.3	17	52.6	74	23.6
	15/03/2023					71.4	33	37.3	18	34.8	74	23
	15/03/2023					66.1	44.1	47.9	16	49	69	24.1
	15/03/2023					80	60	44.5	15	44.5	59.1	23.5
	15/03/2023					67.2	41	50.9	16	57.5	59	23.5
	15/03/2023					76.4	26	34.5	17	32	51	23.6
	27/03/2023					81	35	26.8	17	29.8	39	23.9
	27/03/2023					81.9	31	38.4	18	38.3	45	24.6
	27/03/2023					76.1	30	41.1	17	39.3	46	24.6
	27/03/2023					69.6	28	49.6	16	50	46	24.9
	27/03/2023					65.7	30	47	17	47.9	47	25
A0423	27/03/2023	31	49.39	12.29	0.249	62.5	32	42.6	16	44	49	24.6
	27/03/2023					60	37	40.7	17	41.5	42	24.5
	27/03/2023					82	51	38	19	39.1	41	24.5
	27/03/2023					63.9	27	45.3	17	38.3	38	24.2
	27/03/2023					60.5	26	44.3	15	46.3	38	24.1
	27/03/2023					83	27	38.6	17	38.3	38	24.2
	27/03/2023					66.7	24	47.7	17	40.9	39	24
	27/03/2023					65.9	16	55	16	55.5	39	23.8
	27/03/2023					70.3	19	35.7	18	33.5	39	24.3
	27/03/2023					66.1	16	55.5	16	55.2	40	23.7
	27/03/2023					70	18	43.3	16	39.5	38	24.2
	27/03/2023					67.1	15	56.9	15	56.8	39	23.9
A0523	27/03/2023	31	27.6	6.43	0.233	70	16	60.8	15	60.7	41	25
	30/03/2023					82	23	41.7	16	46.9	43	23
	30/03/2023					91.5	57	28.4	21	27.7	52	24.3
	30/03/2023					73.6	27	54.8	17	53.1	48	24.3
	30/03/2023					74.4	19	51.3	17	48.3	47	24.3
	30/03/2023					80	49	40.1	18	39.1	47	24.1
	30/03/2023					74.5	16	62.6	17	62.5	40	23.3
	30/03/2023					84.6	17	48.8	16	49.1	43	23.9
	30/03/2023					75.9	16	61.2	15	61.2	45	24.5
	31/03/2023					80.2	16	63.8	15	63.7	43	24.5
	31/03/2023					75.9	16	61	15	61.2	45	24.5
	31/03/2023					80.1	19	41.1	16	39.2		
A0523	31/03/2023	26.8	39.66	9.94	0.251	62.9	34	44.9	16	44.3	47	24.7
	31/03/2023					62.1	44	42	17	43.9	45	24.8
	31/03/2023					90	36	48.5	16	50.4	45	24.6
	31/03/2023					75	38	50	17	52.4	43	24.6
	31/03/2023											
	31/03/2023											

Tabla 14. Datos de secado, 1ª implementación. (propia)

3.5. Descripción del análisis: correlación e interpretación de la información obtenida.

La temperatura del medio de calentamiento para el aire se observa en la figura 35, con un comportamiento centrado, rango desde 52°C hasta 96.3°C (41.3°C) con una mediana de 73.95°C, esta es una variable que podría tener una mejora estrechando la amplitud de su rango, esperando dar mayor estabilidad a la temperatura del aire de secado.

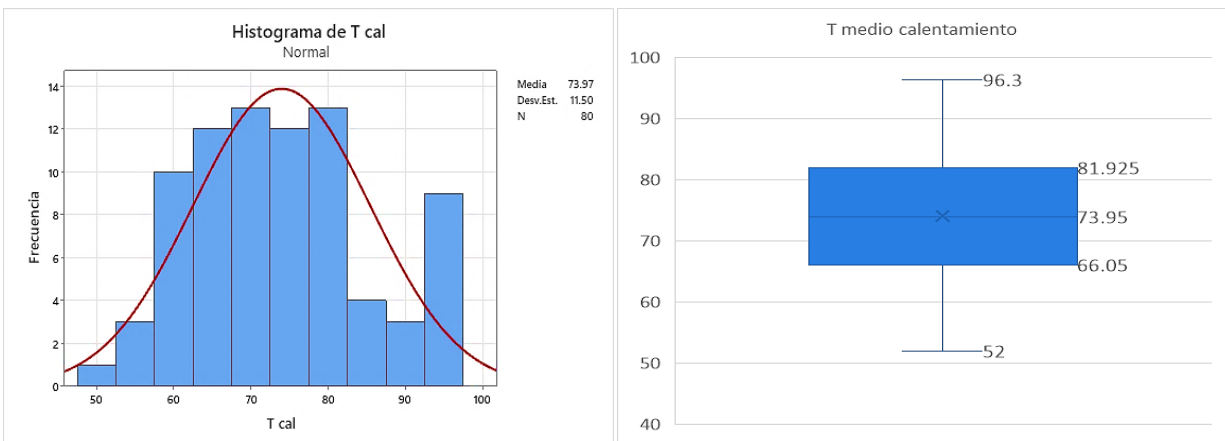


Figura 35. Temperatura del medio de calentamiento (°C), 1ª implementación.
Fuente: Elaboración propia.

El peso cargado de la pulpa de plátano a las cámaras tiene una tendencia hacia el superior y un rango muy amplio de 43 kg, aunque la media y la mediana (figura 36) coinciden en los 33 kg el rango permite que sea una variable que se pueda controlar y esperando dar estabilidad al proceso, desde la manualidad del corte y el tiempo que esto implica, hasta la uniformidad en las temperaturas dentro.

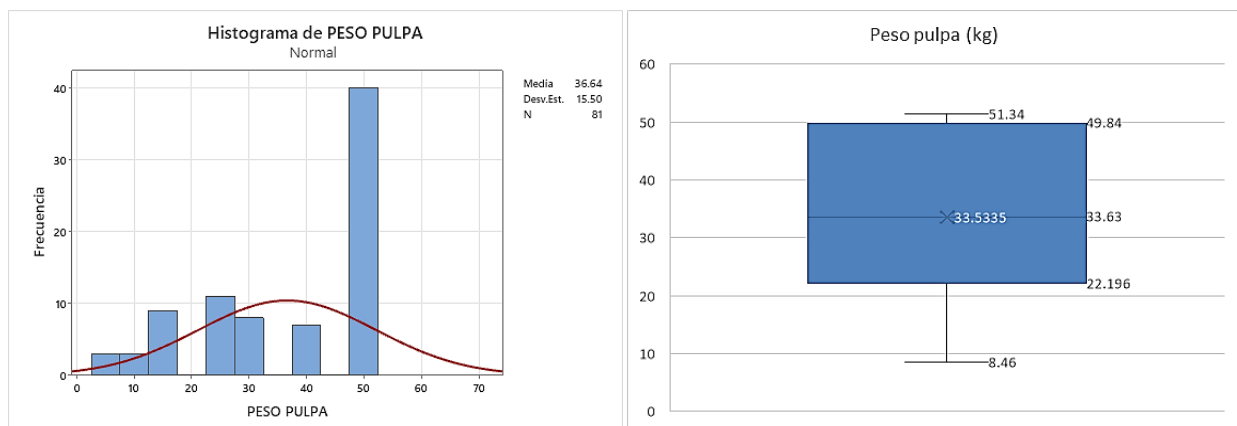


Figura 36. Peso de pulpa cargada al horno (kg), 1ª implementación.
Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la figura 37 que el tiempo de ciclo tiene la particularidad de ser muy extenso puesto que para asegurar la calidad del secado la pulpa se deja en modo ventilación durante toda la noche y eso causa un sobrecosto al no tener un tiempo estipulado de fin de ciclo; esta es una variable que puede mejorar su valor, aunque implícitamente está relacionada con el contenido de humedad al final.

Se observa un rango amplísimo de 22.5 h con una media y moda cercanas a las 24 h, pero con alta frecuencia a ciclos desde 22 hasta 32 horas.

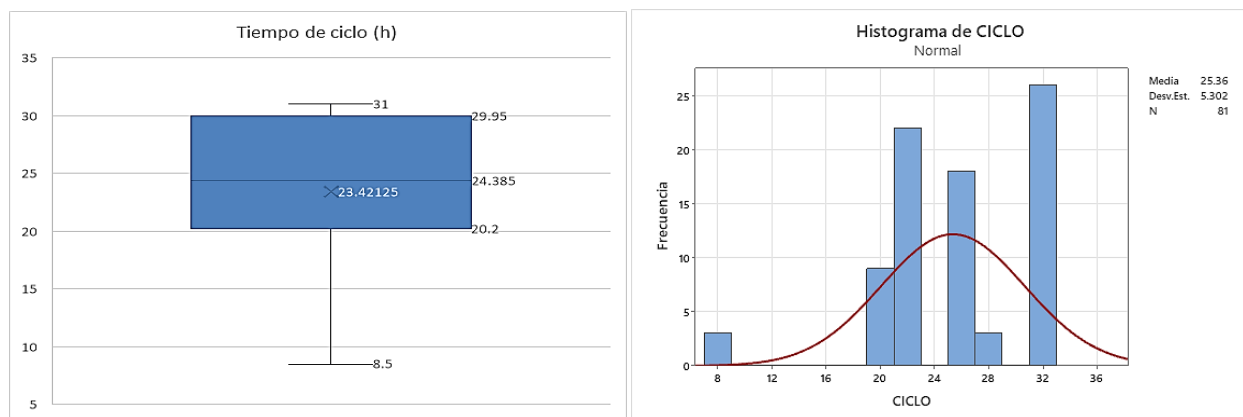


Figura 37. Tiempo de ciclo (h), 1ª implementación.
Fuente: Elaboración propia.

La variable de salida que es el rendimiento neto (kg pulpa seca/kg pulpa cargada) en la figura 38, está asociada directamente con el contenido de humedad en el producto y se interpreta como que, a menor rendimiento neto menor será contenido de humedad en el final.

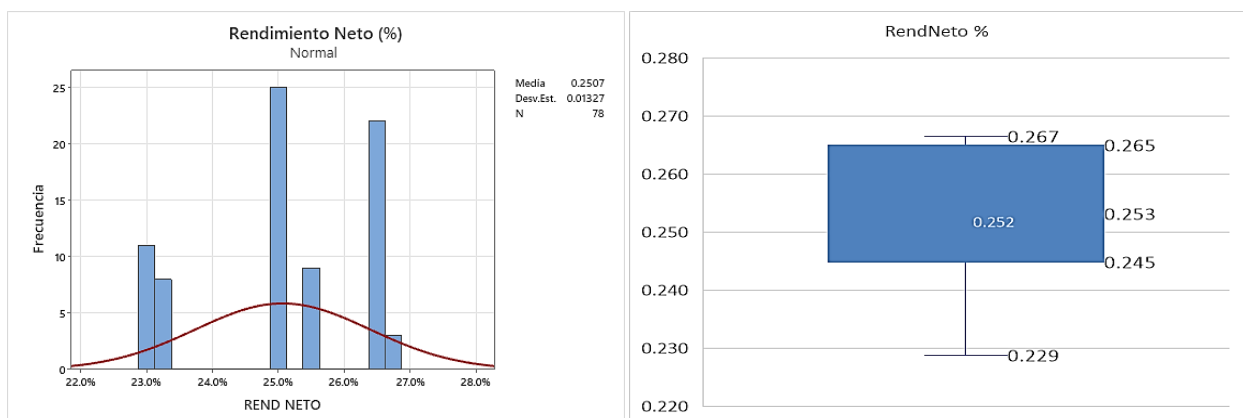


Figura 38. Rendimiento neto (kg pulpa seca / kg pulpa cargada, %), 1ª implementación.
Fuente: Elaboración propia.

La variable de salida se muestra con frecuencias altas para rendimientos altos, pero dada la interpretación, lo conveniente es que los rendimientos se disminuyan para que se favorezca la disminución en el contenido de humedad, y mitigar el riesgo de que el producto asuma problemas de calidad.

Dado el diseño y construcción del equipo de secado, las temperaturas y humedades relativas al interior de las cámaras (figuras 39 y 40), no son variables que sean controlables, pero aportan visión al comportamiento del proceso de secado y visualizan posibles mejoras a futuro. Estas variables tienen mucha amplitud de rango debido a dos causas, la primera es la curva de calentamiento del material, pero la más importante es la variación de la temperatura del medio de calentamiento, cuando este se enfría impacta sobre las temperaturas y humedades internas, de modo que se esperaría que, al controlar al medio de calentamiento en una banda más estrecha, las respuestas internas se modulen más suavemente dejando las colas del lado izquierdo más cortas.

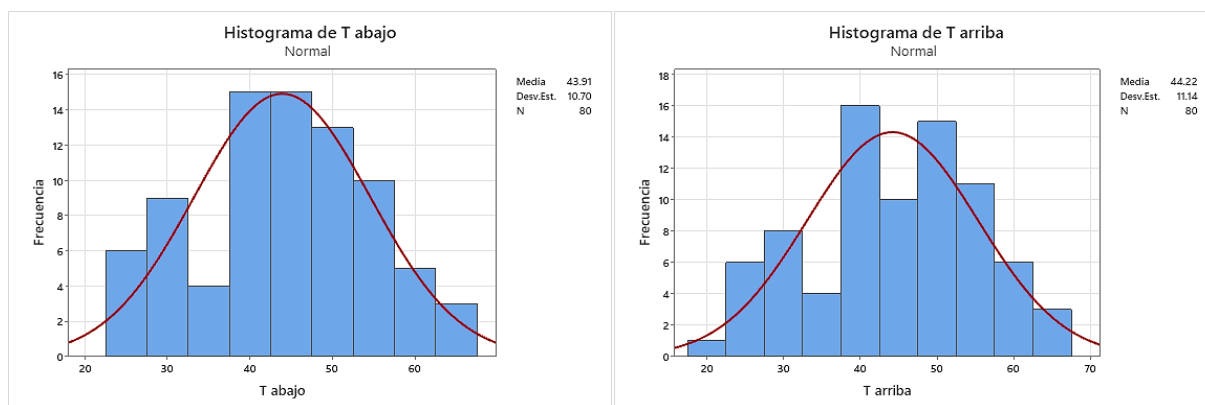


Figura 39. Temperaturas dentro de cámara, 1ª implementación.
Fuente: Elaboración propia.

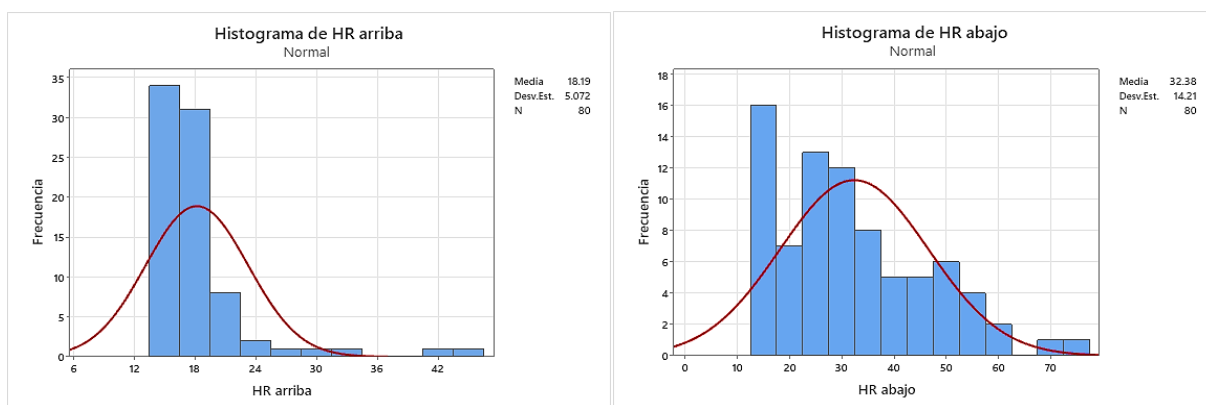


Figura 40. Humedades relativas dentro de cámaras, 1ª implementación.
Fuente: Elaboración propia.

Se observan humedades relativas con alta frecuencia de valores bajos por dos causas, el inicio del ciclo cuando está en curva de calentamiento y hacia el final del ciclo cuando el material ya está seco, al ser una variable no controlada que depende a su vez de las temperaturas dentro de cámaras, podría tener otro componente operativo con el control de la válvula de escape de aire-vapor.

La figura 41 intenta mostrar la correlación entre las temperaturas interiores contra la del medio de calentamiento, si bien la dispersión es alta en relación con la temperatura del medio, las temperaturas interiores si muestran un comportamiento muy similar entre ambas, lo que sugiere que tienen cierta armonía.

Por otra parte, observando la densidad de datos para las temperaturas interiores relacionadas con el medio de calentamiento, las temperaturas interiores están en una banda de 38-52°C contra la banda 66-82°C del medio; esto podría proponer la idea de que al controlar la temperatura del medio alrededor de los 74°C esperar tener una respuesta en las interiores alrededor de los 45°C.

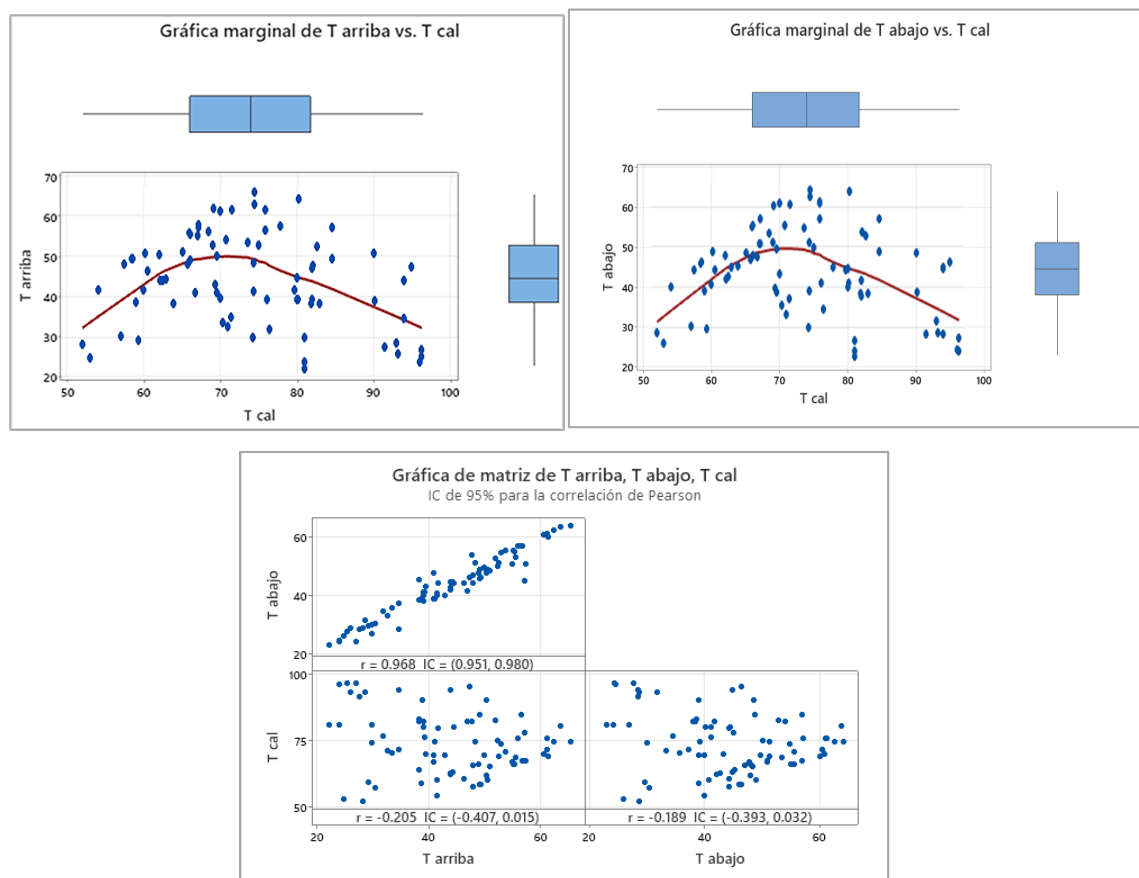


Figura 41. Relación de temperaturas interiores vs temperatura del medio de calentamiento.
Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de respuesta curvo hacia abajo de las temperaturas interiores de la figura 41, parece no hacer sentido con el medio de calentamiento, pero si se relaciona con la curva de calentamiento al arranque del secado, entonces la dispersión debería leerse de derecha a izquierda, en secciones de calentamiento-secado-control-enfriamiento; además de que la dispersión también se debe a la poca capacidad de control de la temperatura del medio de calentamiento.

Por otra parte, en la figura 42 se grafican las variables de proceso en la que se observan inestabilidades propias de la manualidad con que se opera el equipo; las variables en cantidades se leen en el eje izquierdo (kg, °C) y las variables en porcentaje (HR y Rendimiento neto) se leen en el eje derecho.

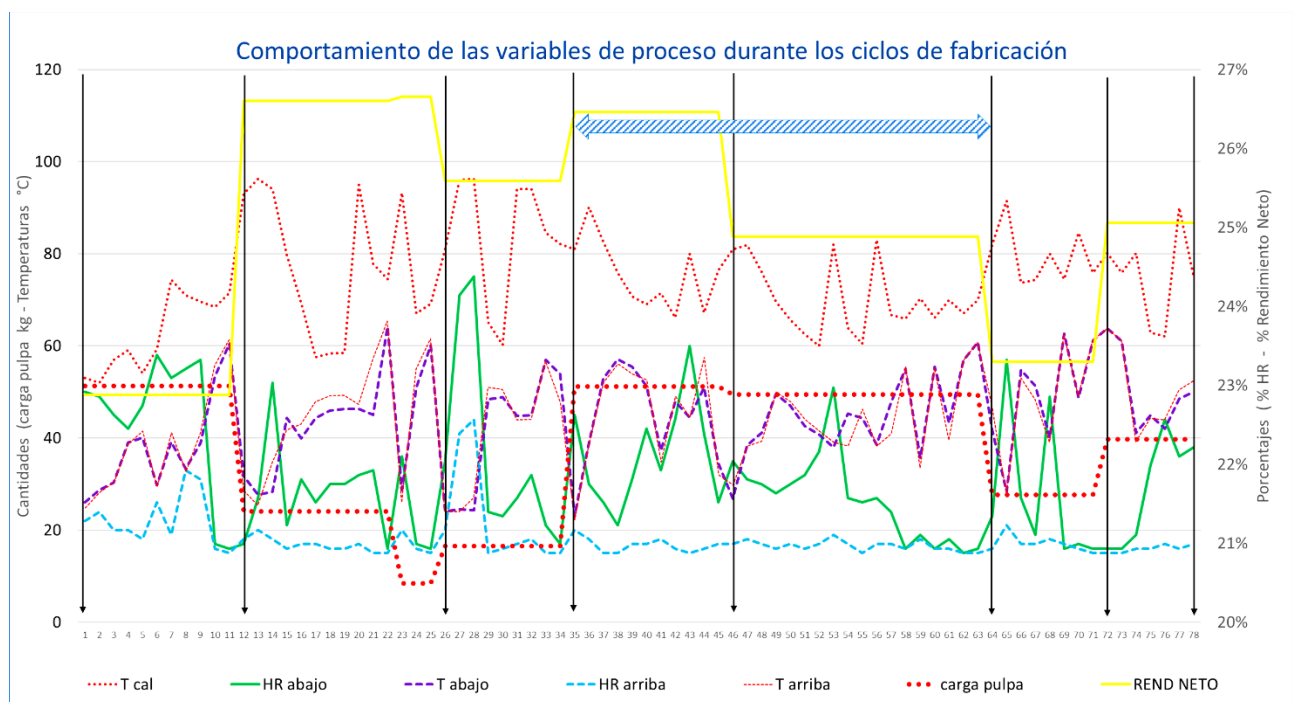


Figura 42. Variables de proceso, 1ª implementación.
Fuente: Elaboración propia.

Observando para una misma cantidad de carga de pulpa (línea roja gruesa punteada, en el intervalo en flecha azul), en el segundo lote se delinea una tendencia ligeramente hacia abajo en el %HR de la zona baja del horno (%HR abajo, línea verde), las temperaturas dentro de cámara (roja y morada punteadas) en un rango 40-60°C con cierta estabilidad, y la temperatura del medio de calentamiento (Tcal, roja punteada suave) en una banda casi estable de 60-80°C. Comparando contra el primer lote de este intervalo, para la temperatura del medio de calentamiento (Tcal) hay

una línea descendente no estable en una banda 85-65°C, las temperaturas dentro de cámaras inestables y descendentes, y finalmente, el %HR en la zona baja con tendencia hacia arriba. Esto da un indicio de las relaciones que pueda haber entre la temperatura del medio de calentamiento, las temperaturas dentro de cámara y la humedad en la zona inferior.

Se realizó un análisis de regresión factorial de las tres variables controlables, carga de pulpa, temperatura del medio de calentamiento, y tiempo de ciclo, y se observan interacciones entre la temperatura del medio de calentamiento con las otras dos, tabla 15, además de ser variables independientes; el valor-p indica que, con el 95% de confianza, que las variables independientes y sus interacciones contribuyen al comportamiento del proceso. Los valores del efecto son bajos porque la variable de respuesta está expresada en porcentaje como fracción. El efecto principal es la interacción entre el ciclo y la temperatura del medio, que disminuye el rendimiento neto en 14.661 veces, lo que es muy conveniente puesto que a menor rendimiento menor el contenido de humedad; enseguida la interacción peso de la pulpa con la temperatura del medio que compensa el efecto en +9.834 veces, que es una competencia contraria al secado, ya que a más carga mayor rendimiento, por lo tanto, mayor contenido de humedad en la pulpa secada.

Coefficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		0.26574	0.00104	255.63	0.000	
CICLO	-0.05076	-0.02538	0.00198	-12.79	0.000	2.59
PESO PULPA	0.01565	0.00782	0.00149	5.26	0.000	2.80
T cal	0.05385	0.02692	0.00234	11.49	0.000	4.58
CICLO*T cal	-0.14661	-0.07331	0.00694	-10.56	0.000	9.94
PESO PULPA*T cal	0.09834	0.04917	0.00386	12.73	0.000	5.06

Tabla 15. Regresión factorial para las variables de proceso controlables. (propia).

El modelo matemático de la ecuación 4 para estas combinaciones arroja un coeficiente de regresión del 86% y a la predicción en 82%.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\text{REND NETO} = 0.0080 + 0.01956 \text{ CICLO} - 0.007313 \text{ PESO PULPA} + 0.003930 \text{ T cal} \\ - 0.000294 \text{ CICLO} * \text{T cal} + 0.000104 \text{ PESO PULPA} * \text{T cal}$$

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0046358	85.97%	84.72%	82.21%

Ecuación 4: Modelo matemático estadístico para el rendimiento neto en función de las variables de proceso. 1ª implementación. (propia).

Por otra parte, dada la interpretación de la relación entre el rendimiento neto (% RN) y el contenido de humedad en el producto (% H, menos es mejor, y asumiendo que la relación entre ambos sigue la ecuación de una línea recta en los intervalos de ambos, se desarrolla una ecuación basada en los datos experimentales de los siete lotes muestreados:

% RN	% H
26.7	10
23	8.4

$$\% H = 0.432432 * RN \% - 1.54946$$

Ecuación 5: Relación %H en el producto seco en función del rendimiento neto.

Se realizan cálculos con el modelo matemático de la ecuación 4 sobre las variables tomadas en campo, obteniendo un cumplimiento muy cercano a lo experimental, es decir, la respuesta del modelo cumple con seis de siete lotes muestreados (85.71%). Adicional, con la ecuación 5 se calcula el %H en el producto secado para los lotes y se muestran en la tabla 16, que también coinciden con el rango obtenido en las fabricaciones. La diferencia promedio para el módulo del rendimiento neto es de 0.7% y 1.5% si se omite el dato de 6.2%.

LOTE	T caliente (°C)	Peso pulpa (kg)	Ciclo (h)	Rend Neto (kg seco/kg pulpa)			% Humedad en producto		
				Módulo	Real	% dif	Módulo	Real	% dif
1	62.66	51.34	26.17	24.3%	22.9%	6.2%	9.0%	8.4%	7.3%
2	77.64	24.08	21.55	26.1%	26.6%	-1.9%	9.7%	10.0%	-2.1%
3	60.00	16.55	19.75	26.4%	25.6%	3.1%	9.9%	9.5%	3.6%
4	75.50	51.19	22.60	27.3%	26.5%	2.9%	10.2%	9.9%	3.4%
5	70.13	49.39	31.00	25.0%	24.9%	0.3%	9.3%	9.2%	0.4%
6	79.56	27.60	31.00	22.8%	23.3%	-2.0%	8.3%	8.5%	-2.3%
7	75.17	39.66	26.80	25.5%	25.1%	1.7%	9.5%	9.3%	2.0%

Tabla 16. Validación del módulo matemático para el cálculo del Rendimiento neto y su relación con el contenido de humedad (%H) en el producto seco. (propia).

3.6. Definición de los factores prioritarios a intervenir y/o modificar en la problemática.

Los factores principales a intervenir son las variables controlables: carga de pulpa, temperatura del medio de calentamiento y el tiempo de ciclo; junto a estos habría ajustes en algunos pasos de la operación del secador.

Enseguida se realiza un análisis de optimización de las variables controlables, partiendo de los datos experimentales, que regresen la mejor combinación de éstas para llegar al valor objetivo del

rendimiento neto, que es del 20%; de este análisis resultan para las variables optimizadas: Ciclo de 8.5 h, Peso de pulpa a 49.75 kg, y la temperatura del medio de calentamiento en 59.2°C, para con estos esperar un rendimiento neto con un intervalo de confianza del 95%, valores en una banda del 18.47 al 21.53%.

Optimización de respuesta: REND NETO

Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
REND NETO	Objetivo	0.18	0.2	0.266548	1	1

Solución

Solución	CICLO	PESO PULPA	T cal	REND NETO Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	8.5	49.7502	59.2018	0.2	1

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración
CICLO	8.5
PESO PULPA	49.7502
T cal	59.2018

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
REND NETO	0.20000	0.00764	(0.18470, 0.21530)	(0.18210, 0.21790)

Tabla 17. Valores de variables para un rendimiento neto optimizado. (propia).

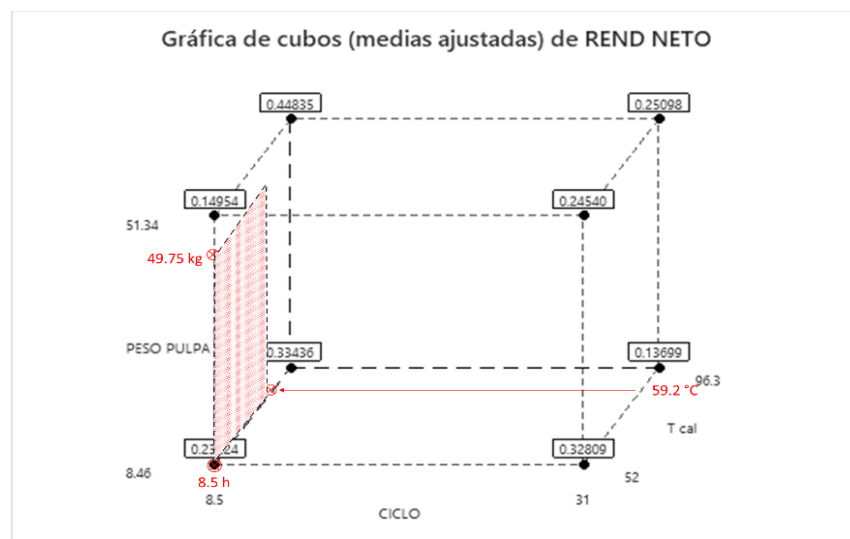


Figura 43. Gráfica de cubo para las variables controladas y respuesta.
Fuente: Elaboración propia.

Describiendo la gráfica de cubo de la figura 43, se ubica el rendimiento neto objetivo de 0.20 sobre cada eje, y se observan los valores de las aproximaciones de cada variable, proyectando un plano, en rojo, sobre el eje de la temperatura dado, que el tiempo óptimo de ciclo está en el valor mínimo experimental.

4. Estrategia de intervención.

La variabilidad en la calidad del producto, que en si misma tiene un nivel de cumplimiento aceptable, consecuencia más por el tiempo de reposo que se da al material que por un tiempo establecido como una variable a controlar.

De manera global se trabaja sobre: la operación del equipo, específicamente en el medio de calentamiento para lograr que la temperatura de este se mueva dentro de un rango que provoque que las temperaturas al interior de la cámara sean estables. El tiempo de ciclo y la cantidad de pulpa a cargar se establecen a partir del análisis de los datos recabados; para la pulpa, además, se requiere repartir homogéneamente en las charolas de secado y dejar una franja para la circulación interna del aire entre charolas.

El resumen de variables observadas hasta esta parte de la investigación se enlistan las siguientes:

- Temperatura del medio de calentamiento.
- Cantidad de material cargado.
- Tiempo de ciclo.
- Operación del equipo.
- Consideraciones de diseño.
- Velocidad del aire de secado.

4.1. Justificación de la estrategia de intervención

La intención de la intervenciones es la determinación de parámetros básicos que de primera logren dar una estabilidad a la etapa de secado, como principal contribuyente a la calidad del producto, pero también sugerir mejoras a las etapas anteriores y posteriores para que en su conjunto la protejan y mantengan.

4.1.1. Consideraciones costo/beneficio de la estrategia

La estandarización de los procesos repercute en la estabilidad de las respuestas, y el establecimiento de estándares conlleva implicaciones en la calidad y en el costo, debiendo seguir siempre una máxima que prioriza la calidad:

“Calidad al menor costo posible y lo más pronto posible ”

En la rutina operativa es común actuar al revés, priorizar la cantidad con probable demérito y riesgo en la consistencia de la calidad y la aceptación de los productos, convirtiendo la relación costo-beneficio en un desbalance en contra. Aunque parezca paradójico, siempre será más seguro para el negocio anteponer la Calidad a la cantidad, porque asegura la consistencia en el cumplimiento de los requerimientos y las expectativas de los productos, y en consecuencia la satisfacción del cliente, su confianza y lealtad y, para el negocio, el flujo de efectivo.

En relación al costo, para la organización siempre debe existir desde el aspecto financiero un análisis de rentabilidad, y en ese sentido balancear las exigencias del cliente versus el costo de venta, a fin de proponer precio adecuado a ambos requerimientos.

La expectativa para este proyecto no es especialmente la optimización del costo de la operación del secado, sino el establecimiento de sus parámetros básicos de operación, y darle en consecuencia estabilidad a una parte del costo de la cadena.

Dado el alto contenido de humedad en la fruta, 69%, el rendimiento de producto seco es muy bajo y hace que el precio no sea competitivo comparado con harinas de otras fuentes, como el trigo o el maíz, lo que convierte a la harina de plátano en un producto de nicho y precio alto para que sea rentable.

Por otra parte, analizando la consistencia de algunos parámetros u operaciones que se pueden controlar podrían traer beneficios económicos, por ejemplo, con la estandarización del peso del material a secar se puede valorar el costo de la mano de obra en función del tiempo utilizado en la preparación del lote; la distribución de la fruta en las charolas, la definición de la temperatura de secado y estableciendo un tiempo de ciclo, se puede valorar y estabilizar el costo de la energía aplicada, y con todo esto, establecer el costo por unidad de peso de material secado, puesto que se tendría un rango de costo esperado que podría funcionar como indicador.

Con estos antecedentes y la implementación sugerida se espera:

- Estabilizar el costo de mano de obra dado por el tiempo invertido para una cantidad fija de material a procesar.
- Estabilizar el costo de materia prima al definir el tamaño de lote en cantidades estándar.
- Reducir el costo de la energía alrededor del 45-60% debido a la definición de un rango de temperatura del medio de calentamiento y el establecimiento de un tiempo de ciclo estimado en 1/3 parte del tiempo actual; ayudado por el acomodo del material en las charolas y la estabilidad de las condiciones internas de la cámara.

Es muy posible que las optimizaciones posteriores impliquen inversiones en mejoras de equipos y periféricos que ayuden al rendimiento, calidad y calidad del producto.

4.2. Herramientas e instrumentos

En el proyecto global se utiliza la metodología DMAIC (Definición, Medición, Análisis, Incremento, Control) que parte desde la definición de la situación objeto del estudio hasta que la hipótesis planteada llega al punto que dados los análisis y las acciones derivadas se pretende llegar a un estado de control de las variables meta.

4.3. Etapas del proceso de aplicación/intervención

El enfoque principal que se pretende es sobre modificaciones a los métodos de trabajo y que no tienen una repercusión económica mayor sobre el proceso. Además de que al ser una pequeña empresa favorece el cambio, la capacitación y la implementación de formas diferentes de trabajo esperando con esto de regreso una mejor calidad y costo al procesamiento.

De manera amplia la intervención consiste en:

- Análisis de datos actuales y proponer parámetros optimizados.
- Intercambio de experiencias para el ajuste de instrucciones de operación en función de las condiciones del equipo que faciliten la implementación de las actividades y mitiguen el diseño empírico.
- Realización de corrida de prueba considerando las variables involucradas de temperatura del medio de calentamiento, la cantidad de pulpa, y el tiempo de ciclo.
- Análisis de los resultados obtenidos de rendimiento y contenido de humedad en el producto, observar su diferencia y proponer nuevos ajustes.

4.3.1. Cronograma de trabajo

La cronología para la intervención se describe en el Gantt de la tabla 18.

#	Lista de actividades	Inicio	Fin	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Análisis de datos actuales y proponer parámetros optimizados.	1	2								
2	Implementación de instrucciones de operación.	2	2								
3	Corrida de prueba con parámetros óptimos.	4	2								
4	Análisis de resultados de salida	6	2								
5	Propuesta de parámetros finales.	8	1								

Tabla 18. Cronograma de implementación. (propia).

4.3.2. Imprevistos

Ciertamente los imprevistos se enfocan en aspectos que retrasan o ralentizan el desarrollo del proyecto, pero también puede pasar en forma positiva, aquellos no visualizados que aceleren o que fortuitamente traigan un valor agregado no esperado.

1. Considerando los factores externos de aquellos de las fuerzas de Porter, si existe uno muy real de repercusión natural que es el clima o la temporalidad de la cosecha, cuando la fruta puede escasear.
2. El control del cultivo de la fruta por terceros, esto causa limitación en la distribución, escases y costo alto a la materia prima.
3. El mercado se mueva a lento y que afecte los planes de producción.
4. Operativamente, el control de la temperatura del medio de calentamiento no sea del todo regulable en el rango deseado dado el diseño del equipo.
5. Que por alguna de las causas anteriores se deba hacer una réplica en laboratorio reproduciendo las variables controladas con el mejor apego al proceso real.

5. Exposición de hallazgos

Se presentan los hallazgos del análisis de los datos experimentales y sus interpretaciones.

5.1. Sistematización y aplicación de escalas de medición de resultados

Se desarrolló y realizó e implementó en una prueba sencilla para la medición del contenido de humedad en el plátano seco para dar un valor y certeza a la calidad del producto.

Complementario, se comparte la ecuación 5 para el cálculo del contenido de humedad en función del rendimiento neto como modo de comparación y verificación del resultado.

Se redacta un nuevo instructivo específico para la operación del equipo de secado en el que se detallan los parámetros, temperaturas y cantidades de carga de pulpa de plátano, además de los movimientos de sus accesorios.

Enseguida se ofrece capacitación acerca de puntos específicos para la operación del sistema de control de temperatura del medio de calentamiento a fin de estabilizarlo en una banda de $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$, y con esto intentar estabilizar las temperaturas internas en un rango de $42 \pm 4^{\circ}\text{C}$.

A manera de anticipar el comportamiento del módulo matemático experimental y el resultado en el rendimiento neto, se realizó una corrida de prueba a nivel piloto en laboratorio de secado escalando a la inversa las variables controladas de carga de pulpa, temperatura de medio de calentamiento y tiempo de ciclo bajo las siguientes premisas:

1. Escalamiento.

La prueba escalada en el laboratorio puede no ser concluyente de las relaciones entre las variables controladas y la variable de respuesta.

2. Carga de pulpa.

Se calculó la densidad por cm^2 de la carga optimizada (49.75kg) escalada a una charola perforada de 759.5 cm^2 (24.5cm x 31cm) que correspondió a 391.46 g.

3. Temperatura del medio de calentamiento.

Con las gráficas de correlación (*figura 38*) entre temperatura del medio de calentamiento y las temperaturas interiores, y la correlación armónica de las temperaturas interiores se obtiene que para 59.20°C del medio de calentamiento corresponde, siguiendo la curva de regresión, una temperatura de aire caliente de 42°C .

4. Tiempo de ciclo.

Se acortó el tiempo de ciclo a 4.75 h del tiempo de ciclo del valor optimizado de 8.5 h.

5.2. Organización de la información obtenida

Con la particularidad de que el equipo de secado es de fabricación propia de la empresa y adaptado con poco rigor técnico, complica el abarcar todas las variables que pudieran impactar en la transferencia de humedad desde el material a secar con el aire seco, como las condiciones del aire de secado que fueran las temperaturas internas y sus humedades relativas, las velocidades y patrones de flujo; de manera que se decide enfocar el análisis hacia las variables sobre las que se tiene control, que son, la temperatura del medio de calentamiento, carga de pulpa y tiempo de ciclo

De este enfoque, el análisis de los datos experimentales se deriva un módulo matemático (ecuación 1) que replica estadísticamente el comportamiento del rendimiento neto en el proceso de secado en función de las tres variables que son controlables: temperatura del medio de calentamiento, carga de pulpa y tiempo de ciclo, éste arroja resultados con variaciones en una banda muy ajustada del +/- 2% respecto de los datos experimentales.

Adicional, se define una ecuación 2 para relacionar el rendimiento neto con el contenido de humedad del material seco para obtener de manera inmediata el resultado en el producto terminado, que a su vez y con la ecuación 1, introduciendo la ecuación 2 en la ecuación 1 se obtiene la relación directa para el contenido de humedad en el producto seco expresado en porcentaje:

$$\%H = -1.2 + 0.84584 C - 0.31624 P + 0.16995 T - 0.012714 CT + 0.0044973 PT$$

Donde:

C = tiempo de ciclo (h); P = peso de pulpa (kg); T = temperatura medio calentamiento (°C)

Ecuación 6. Relación directa para contenido de humedad en función del rendimiento neto. (propia).

Por otra parte, se observa una aparente dispersión y la baja relación entre la temperatura del medio de calentamiento con las temperaturas internas de la cámara, en contraste se observa una relación armónica proporcional entre las temperaturas superior e inferior dentro de cámara. Ahora bien, relacionando las tres temperaturas con las fases del proceso de secado: calentamiento – secado – enfriamiento, se podría dar sentido al comportamiento de la relación entre el medio de calentamiento y las temperaturas interiores, y con esto, interpretar que puede haber una relación directa entre la temperatura del medio con las temperaturas interiores, así que se podría ejercer un impulso de control indirecto de las temperaturas interiores a partir del control de la temperatura del medio; y a su vez influir en las propiedades del aire de la humedad relativa.

El módulo parametrizado con los valores óptimos: $T=59.2^{\circ}\text{C}$, Carga=49.75 kg, y tiempo Ciclo en 8.5h, se espera respuesta en el rendimiento neto del 20% dentro de una banda del 18 al 26.65%.

Por otra parte, con los parámetros escalados para la prueba: $T = 60^{\circ}\text{C}$, Carga = 0.39146 kg, y Ciclo recortado a 4.75 h, el módulo espera con esta prueba obtener una respuesta en el rendimiento neto optimizado en una banda de 26% en las 8.5 h.

Se presentan los siguientes resultados de este escalamiento invertido, el comportamiento de la temperatura del aire caliente, de la pérdida de peso y el rendimiento neto en el tiempo:

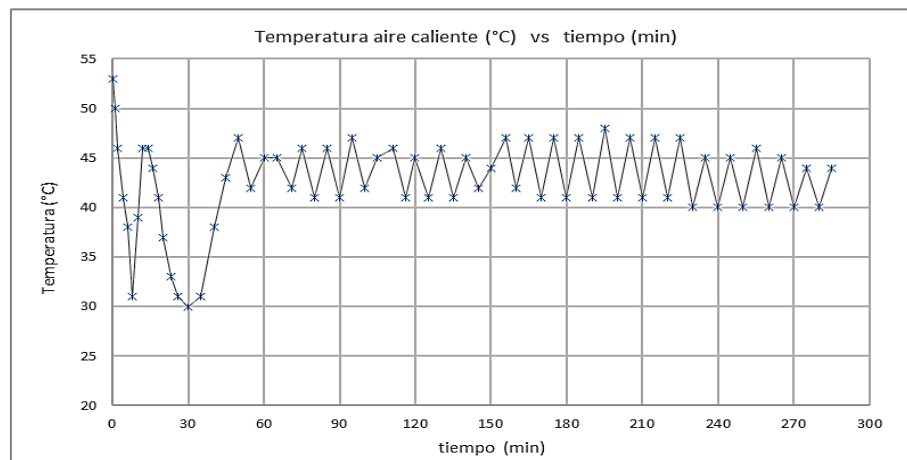


Figura 44. Temperatura del aire caliente
Fuente: Elaboración propia.

La variable controlada, la temperatura del aire caliente (figura 44), observa un comportamiento inestable durante los primeros 40 minutos, en adelante se mantuvo en una banda de 40-47°C con un promedio general de 42.6°C.

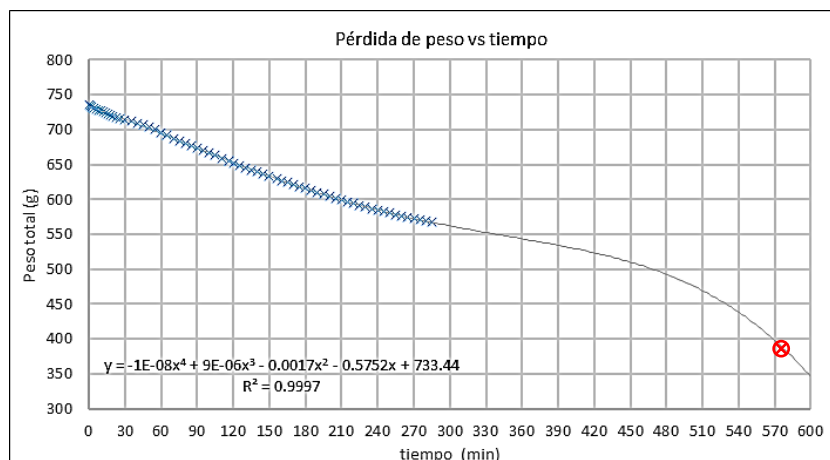
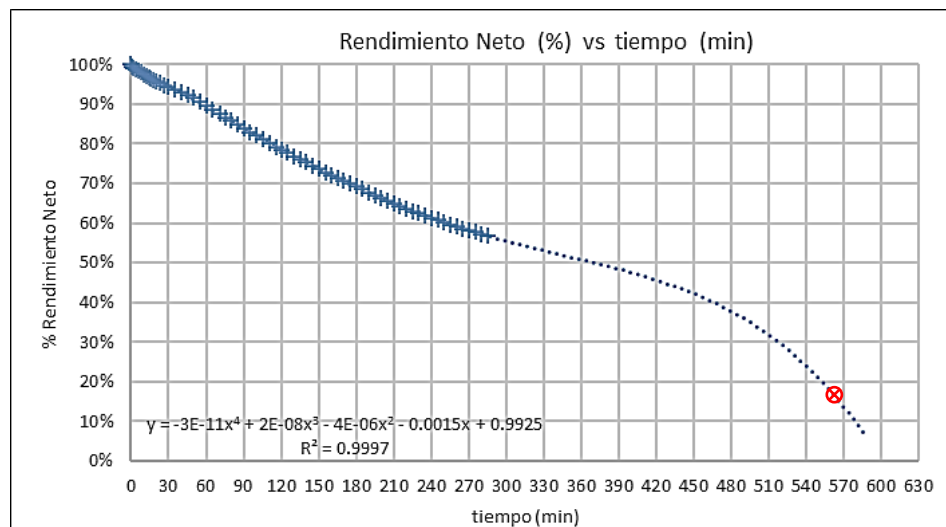


Figura 45. Pérdida de peso en el tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

La pérdida de peso de la figura 45 está asociada con la pérdida de humedad, se observa uniforme a lo largo del tiempo de prueba, extrapolando la línea de tendencia hasta los 510 minutos equivalentes a 8.5 h se lee un valor aproximado de 470 g remanentes de los 423 g esperados para un rendimiento óptimo, que se alcanzarían en un tiempo de 560 minutos o 9.3 h aproximadamente.

Finalmente, la variable de salida deseada es de 20% en el rendimiento neto en la figura 46, que a tiempo extrapolado a las 8.5 h es de 30% a los 510 minutos, en tanto que, de acuerdo a la línea de tendencia, el 20% de rendimiento se lograría a los 560 minutos aproximadamente.



*Figura 46. Rendimiento neto en el tiempo.
Fuente: Elaboración propia.*

En el tiempo de prueba y extrapolado se observa una congruencia muy interesante entre los parámetros óptimos aplicados y los resultados esperados en el rendimiento neto; aun con esta correspondencia es muy conveniente llevar los parámetros a la escala de tiempo apropiada para completar la validación del módulo y de las variables óptimas, y considerando además, que el equipo de secado es de fabricación y adaptación propia de la empresa, y que no responde plenamente a los rigores técnicos para un equipo destinado para ello.

5.3. Impacto de la estrategia en la organización

La problemática encontrada en la empresa se manifiesta en resultados variables del contenido de humedad del producto terminado, lo que impacta directamente a la calidad del producto reflejados en el sabor, olor y color, derivados en parte por la descomposición microbiológica favorecida por la humedad presente en valores propicios para este efecto, llegando inclusive al rechazo y desecho de lotes completos de producto.

De modo que la orientación de este estudio es hacia el establecimiento de parámetros de variables controlables de operación en el equipo de secado que impacten, de primera intención, en la estabilidad del proceso que asegure una calidad estable de proceso y de producto, y que en las etapas subsecuentes se alineen las actividades al mantenimiento de esa característica de calidad.

El impacto en la organización se refleja en diversos rubros:

1. Uniformidad de resultados de calidad.
2. Conocimiento del comportamiento del equipo y proceso de secado, y del producto.
3. Estandarización de los procesos y reducción del tiempo de secado en 60%.
4. Aprovechamiento y optimización de la energía utilizada, con una reducción del 45-60%.
5. Estandarización del costo de operación.
6. Análisis de los posibles riesgos de contaminación del producto en cada etapa.
7. Redefinición de procedimientos operativos.
8. Análisis de los procesos desde un enfoque crítico y de mejora continua.
9. Capacitación y desarrollo del personal.
10. Ayuda visual para la carga de rodajas en charolas.
11. Estabilizar el costo de mano de obra dado por el tiempo invertido para una cantidad fija de material a procesar.
12. Estabilizar el costo de materia prima al definir el tamaño de lote en cantidades estándar.

6. Discusión final

Los beneficios que deja este proyecto son en dos planos, el primero y más inmediato es del orden operativo que se refleja en mejoras objetivas y tangibles como la reducción de los rangos de las variables, la estabilización del proceso, mantener dentro de nuevas especificaciones el contenido de humedad, importantísimo para el producto, su vida de anaquel, y para el cliente; sin embargo, el plano sobresaliente es el de haber sembrado un nuevo estilo de pensamiento, de mirar la forma de hacer negocio desde la responsabilidad de cumplir el compromiso de que la calidad se resuelva, sabiendo que esto podría traer consecuencias por demás notables para la organización.

La calidad inicia en la persona, comprometida con su responsabilidad individual de cumplir cabalmente con su actividad sabiendo que su resultado es importante, por menor que parezca, ese también suma e impacta: *La Calidad Es la persona misma.*

Visto hacia afuera de la organización, la calidad en el producto asegura la venta, el ingreso, la competitividad, y sobre todo la lealtad del cliente, dispuesto a pagar el precio de su satisfacción.

Por el otro lado, visto hacia adentro, la calidad en los procesos, paradójicamente, asegura la calidad de los productos, los estabiliza, reduce las fallas, mantenimiento y costos, y asegura la calidad de salida de cada proceso a todo lo largo de la cadena de valor, y esta combinación de productos y procesos con calidad son el seguro de vida de la organización.

La calidad siempre será la mejor inversión con el mejor rédito tangible, pero sobre todo el intangible, ese que hace que el cliente no tenga más opciones fidelizarse a las respuestas superadas.

6.1. Consecuencias de la aplicación de la estrategia

Las acciones llevadas a cabo se orientaron en la estabilización de la temperatura del medio de calentamiento, mientras que la carga se tuvo que adaptar a las necesidades de la producción y las condiciones de la adquisición de la fruta. Adicional, se hizo ajuste a la operación de la válvula de escape de vapores a fin de aprovechar el calor cedido por el medio de calentamiento, y finalmente, el acomodo de las rodajas en las charolas dejando una franja libre de rodajas para ayudar a la circulación del aire dentro de cámara.

Los efectos de estas acciones se reflejan en varios aspectos, se describen a continuación y se exploran en el conjunto de gráficas de la figura 47.

1. La temperatura del medio de calentamiento se redujo la banda de operación de 61 a 42°C, considerando la curva de calentamiento al arranque de la etapa; sus medianas incrementaron de 65 a 74.9°C.
2. Con esto, las temperaturas al interior de las cámaras se estabilizaron, asemejaron y redujeron sus rangos de operación desde 46°C hasta 43.2°C, pero sin datos atípicos. Sus medianas cambiaron de un rango entre temperaturas de 41 y 44°C a temperaturas uniformes de 44°C con una diferencia de 0.5°C entre ambas posiciones; además, sus medianas crecieron de 42.5 a 44.40°C.
3. La carga de pulpa se vio impactada por la demanda, pero principalmente por la disponibilidad de plátano en la cadena de suministro, lo que causó variabilidad en la carga al secador; aun así, se procuró estandarizar la cantidad a que el 50% de las cargas fueran a 51 kg, mientras previamente el 50% de las cargas estuvieron en un rango de 48.9 a 85.6 kg.
4. El tiempo de ciclo a su vez tuvo variación fuerte conforme a la cantidad cargada, pero se observa una reducción en las bandas de tiempo, reduciéndose de 11.3h a 3.8h.
5. La variable de salida representadas indirectamente por el rendimiento neto se visualiza mucho más estable, sin datos atípicos, que mejoró desde una banda de 10.7% hasta una de 2.7%, acertando los rendimientos desde 26.49 hasta 25.06%.
6. La variable importante es el contenido de humedad en el producto terminado, obteniendo un rango mejorado de 7.9% (5.37-13.25%) hasta un rango reducido de 1.64% (8.36-10.0%), arrojando promedios previos de contenido de humedad de 9.91% a nuevos de 9.29%, pero con las condiciones estabilizadas del proceso, previamente se llegaron a valores de 13.25% mientras que en condiciones actuales se llegó a un máximo de 10%, que es el objetivo máximo propuesto en los VOC de 5 a 10% de contenido de humedad.
7. Mejora en la eficiencia de lotes aprobados desde el 88% antes de la intervención hasta el 100% de lotes buenos a la primera.

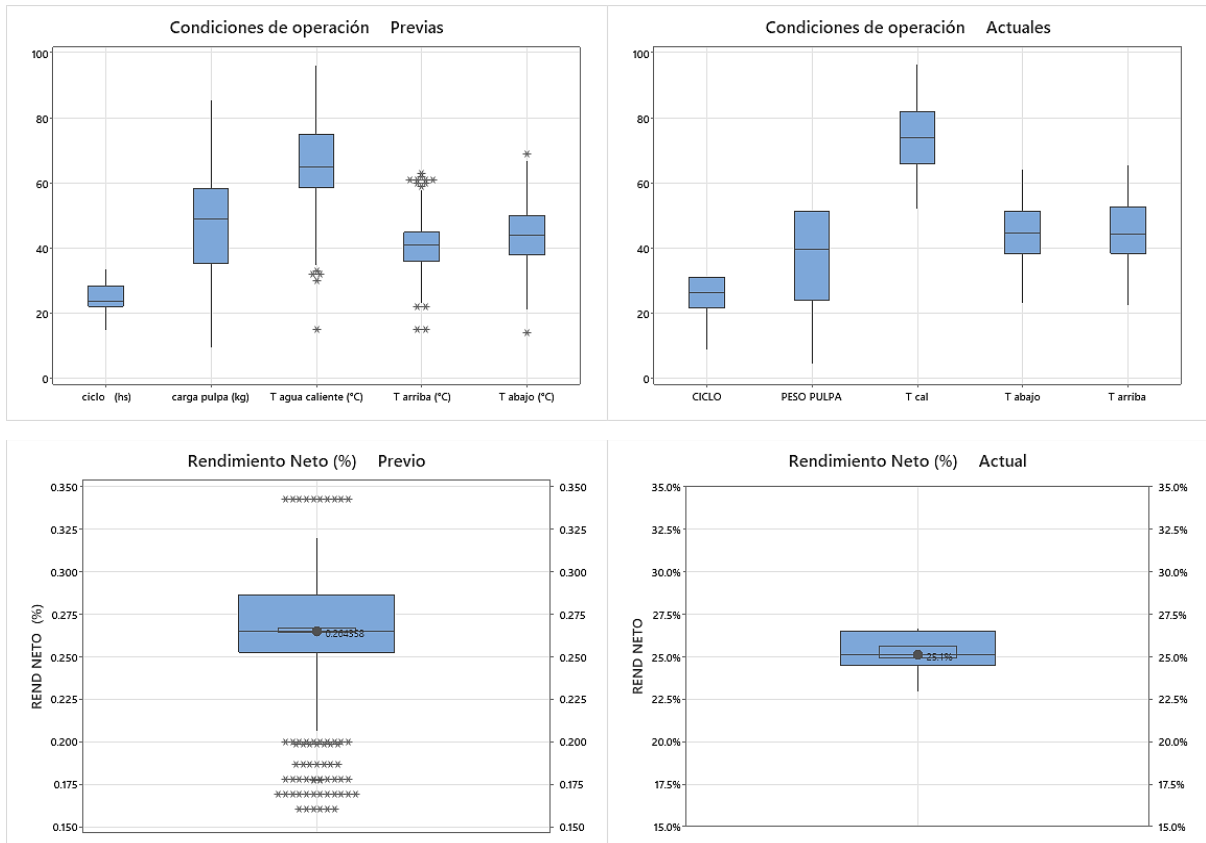


Figura 47. Comparación de condiciones de operación y respuesta previas y actuales.
Fuente: Elaboración propia.

Los análisis de igualdad de medias y varianzas de la figura 48 arrojan que no existe evidencia estadística significativa para afirmar que las dos poblaciones son iguales.

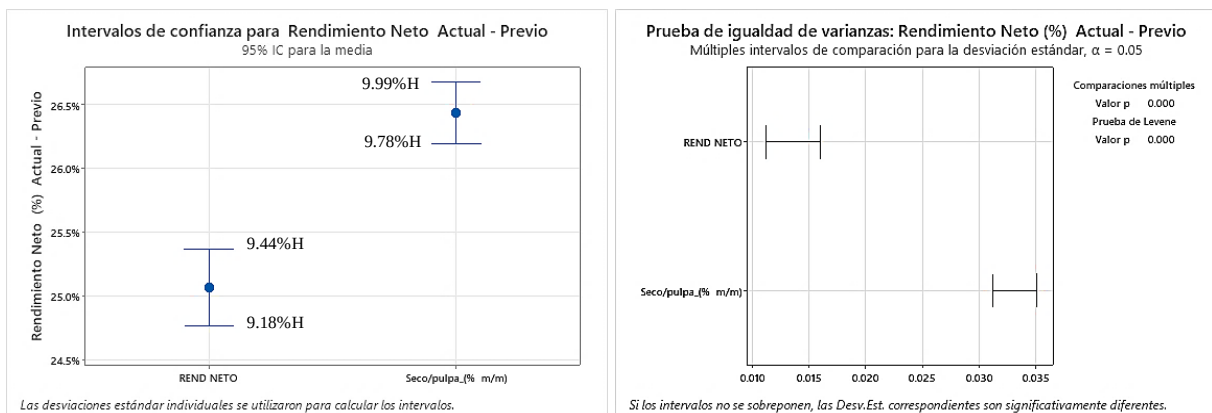


Figura 48. Comparación de intervalos de confianza de medias y varianzas Actual y Previo.
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, contrastando el incremento con las acciones implementadas se observa una mejora en los indicadores de proceso de largo plazo, como se muestran en la figura 49, capacidad del proceso para el Rendimiento Neto; Pp de 0.38 a actual de 0.85, la cercanía con el límite inferior mejora de 0.77 a 1.24 y el Ppk de -0.01 a 0.47; si bien, los indicadores no son óptimos a un proceso ideal si exhiben una mejora sustancial comparativa.

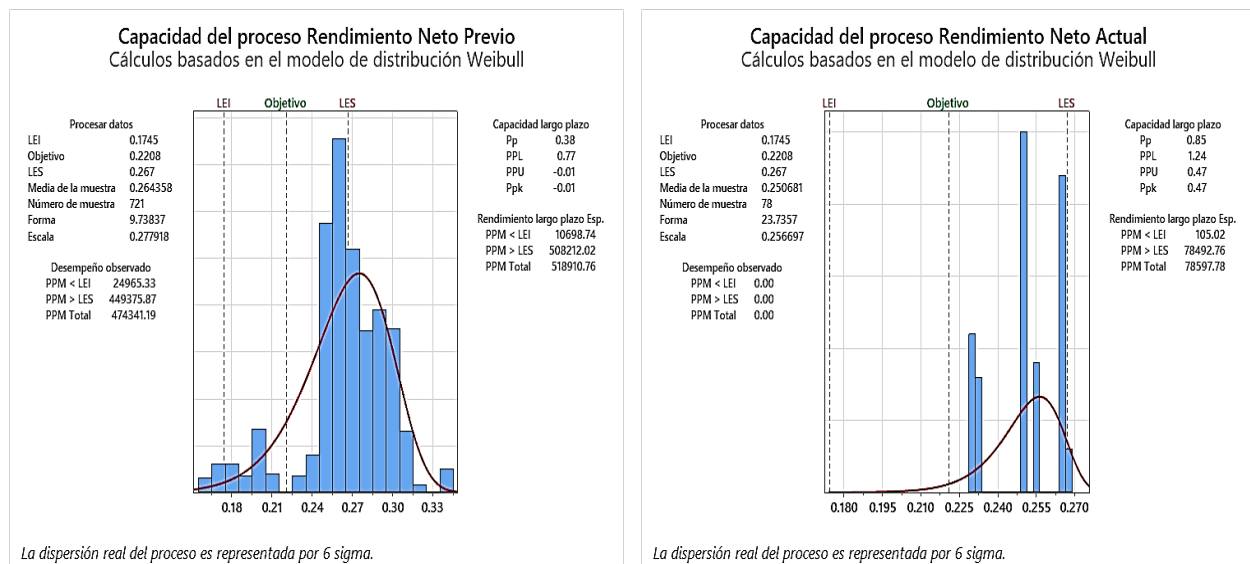


Figura 49. Capacidad del proceso Previa y Actual al implementar acciones de mejora.
Fuente: Elaboración propia.

Al final, las acciones implementadas requieren cierto nivel de pericia sobre su manipulación en el equipo, la válvula de escape de vapores y el control de la temperatura con el manejo de válvulas y resistencias para lograr una banda más fina y al mismo tiempo encontrar la forma de automatizar los movimientos para reducir el error por ajuste.

El objetivo final de encerrar la variable de salida en una banda de 5 a 10% de contenido de humedad en el producto final marcado en la Voz del Cliente (VOC) se llegó mediante un ajuste de controles preliminares de las variables controlables principalmente la temperatura del medio de calentamiento, logrando con esto además la estabilidad del proceso de secado; así, con acciones de relativa sencillez se alcanza la meta específica de la organización de cumplir con los requerimientos del cliente a través del control de los procesos.

6.2. Aspectos de mejora para intervenciones subsecuentes

La característica de ser un producto para consumo humano le confiere un rasgo de escrúpulo en el cuidado a todo lo largo de la cadena productiva y no solamente de la etapa de deshidratación, que es la de mayor impacto.

Las siguientes etapas sugeridas consisten en aplicar en el equipo de secado, los parámetros de temperatura, carga y tiempo de ciclo propuestos para la optimización del contenido de humedad en el producto terminado y observar su comportamiento.

Los motivadores principales para tomar este proyecto son los de impactar en la operación, en la Calidad, en el conocimiento técnico, con reflejo económico, y por esto se torna indispensable que se cree y sostenga una cultura de la Calidad en operación y administración de los procesos desde una perspectiva que no necesariamente sea de un escrupuloso apego al método, pero sí que se muestre el ánimo a la formación de una Cultura sólida de la Calidad.

Así, se sugiere que para esto se implementen paulatinamente en el tiempo algunas herramientas y metodologías para el mantenimiento y control del proceso:

1. Auditorías de calidad, internas y por un tercero, no necesariamente certificador, sino aquel capaz de aportar mejoras con una visión ajena. Anexo 7.1 se presenta un formato para esto.
2. Se actualiza el procedimiento desecado en el Anexo 7.2, en el que se dejan establecidos los parámetros de operación de las variables controlables implementadas.
3. Así mismo, se diseña una prueba rápida para la determinación del contenido de humedad en el producto secado, con cálculos y parámetros establecidos. Anexo 7.3.
4. Se diseña una ayuda visual para el acomodo de las rodajas en charola, especificando la franja libre y la posición dentro de cámara. Anexo 7.4.
5. Caminatas Gemba, que mantengan el sentido crítico y la mejora de las actividades operativas.
6. Herramientas de manejo de quejas y solución de problemas o fallas: 5W's, AMEF, Ishikawa, Diagrama de flujo, A3.
7. Mejora continua: PDCA cuando se detecten oportunidades de mejora con un seguimiento metódico; eventos Kaizen, que requieran acciones específicas e inmediatas.
8. Análisis de información: Histogramas, cartas control, diagrama Pareto, Indicadores de desempeño.

Es muy posible que las optimizaciones posteriores impliquen inversiones de bajo costo en mejoras de equipos y periféricos que ayuden al rendimiento, calidad y calidad del producto, como, por ejemplo:

1. Instalación de un termostato para el control de la temperatura del medio de calentamiento.
2. Agregar instrumentos de medición de temperatura y humedad en las cámaras.
3. Análisis de patrones de flujo de aire caliente dentro de cámaras para generar uniformidad y con esto un ciclo de secado más efectivo en tiempo y calidad.
4. Sistema de recirculación de agua de calentamiento para un mejor aprovechamiento de la energía solar.
5. Controlar la humedad relativa en los alrededores del secador para reducir la saturación por humedad del aire interno, inicialmente eliminando fugas del aire interno hacia el microambiente del secador.
6. Optimizar las operaciones de descascarado y cortado de pulpa, relacionar con inciso 9.
7. Dar tratamiento químico a la pulpa recién descascarada para reducir el oscurecimiento de la harina final.
8. Evitar la acumulación de producto en proceso para eliminar el riesgo de contaminación física, química y microbiológica.
9. Explorar las opciones de la utilización de la cáscara del plátano para incrementar el rendimiento del proceso, principalmente económico, pero sin modificar la especificación del contenido de humedad, y aprovechar el contenido de fibra y demás propiedades de la cáscara.
10. Explorar formas nuevas de manejo de la pulpa para incrementar la eficacia del secado, como separar el centro de los lóbulos e intentar romper la película de almidón.
11. Explorar la posibilidad de aplicar pulsos de vacío para acelerar el proceso y proteger las propiedades.
12. Explorar alternar la carga completa de cámaras para provocar un proceso estable y continuo

6.3. Relevancia y trascendencia disciplinaria del caso

La calidad en su más básica y subjetiva expresión es la satisfacción de los requerimientos del cliente, sin embargo este alcance es tan vago y amplio como criterios de las personas; la calidad tiene una connotación mucho más trascendente que parte desde las personas mismas que están

involucradas en toda la cadena de suministro, de cómo conciben qué tan bien es bien y qué tan bueno es bueno, y esas concepciones se abordan desde los perfiles, disposición y afinidad a los métodos y resultados esperados, y es allí donde se cumplen las expectativas del cliente, luego entonces, los procesos, equipos, herramientas técnicas y tecnológicas se convierten en los medios a y de control para cumplir las expectativas de la organización.

En lo personal tengo dos máximas que he aplicado en mi trayecto profesional:

“La calidad al menor costo posible y lo más rápido posible”

“La calidad crea lealtad, y sí, a cualquier precio”

Donde “posibilidad” implica necesariamente una prioridad secundaria a la calidad, porque ésta crea necesariamente la lealtad del cliente con la certeza que cumplirá por mucho sus expectativas y estará dispuesto a pagar el precio que ello implique.

Un proyecto de implementación de metodologías de calidad implica en sí mismo los cuatro recursos básicos de la administración: personas, equipos, tiempo y espacio, pues todos están implicados directa e indirectamente en la calidad, y todo eso en conjunto se convierte en la Cultura de Calidad.

7. Anexos.

7.1. Formato de auditoría interna:

	AUDITORÍA DE PROCESO		PUNTUACIÓN		CALIFICACIÓN	
	REALIZÓ		2	CUMPLE	MAYOR QUE 90 APROBADO	
	FECHA		1	CUMPLE CONDICIONADO	ENTRE 89 Y 75 PROGRAMAR ACCIONES	
			0	NO CUMPLE	MENOR A 75 SUSPENDER Y CORREGIR	
SUMA PUNTOS =		SUMA TEÓRICA =		CALIFICACIÓN = SUMA PUNTOS X 100 / SUMA TEÓRICA = %		
INSTALACIONES			EQUIPO E INSTRUMENTOS		REGISTROS	
	Puertas y ventanas cerradas		Equipos de proceso limpios		Corresponden al producto	
	Pisos y paredes limpias y sanitizadas		Equipos de proceso identificados		Número de lote	
	Libre de rastros de plagas		Equipos de proceso con estatus		Sin tachones	
	Puntos de control de plagas ubicados		Número de lote visible		Con pluma	
	Tapetes de ingreso limpio y clorados		Instrumentos identificados		Claros	
	Botes de basura tapados		Instrumentos limpios		Correcciones correctamente	
	Lavamanos limpio		Instrumentos calibrados		Instrumentos calibrados	
	Lavabo limpio				Nombre de operador	
	Artículos de limpieza limpios				Nombre de revisó	
	Artículos de limpieza en su lugar				Fecha y hora según corresponda	
PERSONAL			PRODUCTO EN PROCESO Y TERMINADO			
	Bata		Identificado			
	Cubrepelo		Estatus			
	Guantes		Cantidad			
	Zapatos limpios		Número de lote			
	Ropa sin exposiciones		Segregado (si aplica)			
	Collar, pulsera, aretes, reloj		Sobre tarimas			
	Alimentos		Contenedores limpios			
			Contenedores tapados			

7.2. Propuesta de procedimiento de operación de secado:



2. PROCESO DE OPERACIÓN

2.7 INSTRUCTIVOS DE PRODUCCION

Deshidratación de plátano

1. Utilice el equipo: ~~guantes de nitrilo y mandil~~.
2. Saque las cajas y **pese 100 kg de plátano**.
3. ~~Llene la tina con agua caliente hasta 3/4 de su volumen.~~
4. ~~Añada 30 mL de cloro a la tina y mezcle.~~
5. ~~Coloque plátanos repetidamente en la tina conforme se vayan consumiendo.~~
6. ~~Pele los plátanos y rebaneos con el rebanador.~~
7. **Precaliente y mantenga a 40°C el horno secador**
 - a. Abra la llave que surte agua caliente al tanque del horno.
 - b. Asegúrese de que el **agua caliente esté entre 50-6 °C**, de no ser así, encienda la resistencia y espere a que alcance la temperatura.
 - c. **Cierre las puertas y la válvula de mariposa** de salida superior del aire del horno.
 - d. Encienda la bomba del agua caliente y los ventiladores del horno.
 - e. Vigile que el horno alcance los 40°C y manténgalo.
8. ~~Cambie los guantes de nitrilo por guantes quirúrgicos limpios.~~
9. ~~Rebane y acomode las rodajas, sin encimarlas, en las charolas.~~
 - a. **Deje una franja libre de plátano de 2-3cm** a todo lo largo de la charola
10. Ingrese al horno cada charola conforme se vaya llenando de rodajas en orden de arriba hacia abajo y alternando las dos cámaras del horno. asegure de cerrar bien la puerta cada vez que cargue charolas.
 - a. **Deje la franja libre en los externos del horno** para que el aire caliente circule entre charolas.
11. ~~Se realiza un registro del peso del plátano, la hora que se inicia y la hora en que ponemos las charolas en el deshidratado en el formato de proceso de deshidratado~~
12. **La temperatura del agua caliente Suba a 65-75°C y mantenga todo el tiempo y Verifique cada 20 minutos**, si es necesario renueve el agua con agua del calentador y encienda la resistencia.
13. Cuando termine de cargar el horno **espere 30 minutos y abra la válvula de mariposa por 1 minuto y cierre a 1/4; así déjela hasta el final del proceso.**
14. De aquí en adelante verifique que:
 - a. Temperatura del agua caliente se mantenga entre **65-75°C**
 - b. Temperaturas dentro del horno se mantengan entre **45-55°C**
15. Realice los registros de temperaturas, humedades dentro y fuera de cámara en los tiempos conforme al formato.
16. El proceso de deshidratado de una carga completa de 50kg de plátano SIN cáscara tiene una duración de 24 horas.
17. El proceso se termina cuando la humedad en el horno esté estable en 20%.
18. Verifique que el plátano esté completamente seco para poder descargar, de no ser así, repita el ciclo con los pasos 12 a 15.
19. Limpie y sanitice las cajas de plástico con alcohol al 70%.

7.3. Determinación del contenido de humedad en producto seco.



DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN PLÁTANO SECO

1. Tome una nueva muestra de 50 g exactamente, y el resto devuélvalo a una caja de plástico.
2. Los **50 g (peso1)** de muestra mételes al horno de microondas por 1 minuto, sáquelos y pese inmediatamente.
3. Tome de nuevo esta muestra y calienta en el microondas por 30 segundos y pese inmediatamente (**peso2**).
4. **Calcule la humedad del plátano seco** de la siguiente manera:

$$\% \text{ Humedad del plátano seco} = (\text{peso 1} - \text{peso 2}) \times 100 / \text{peso 2}$$

El resultado debe estar debajo de 10%

7.4. Formato de ayuda visual

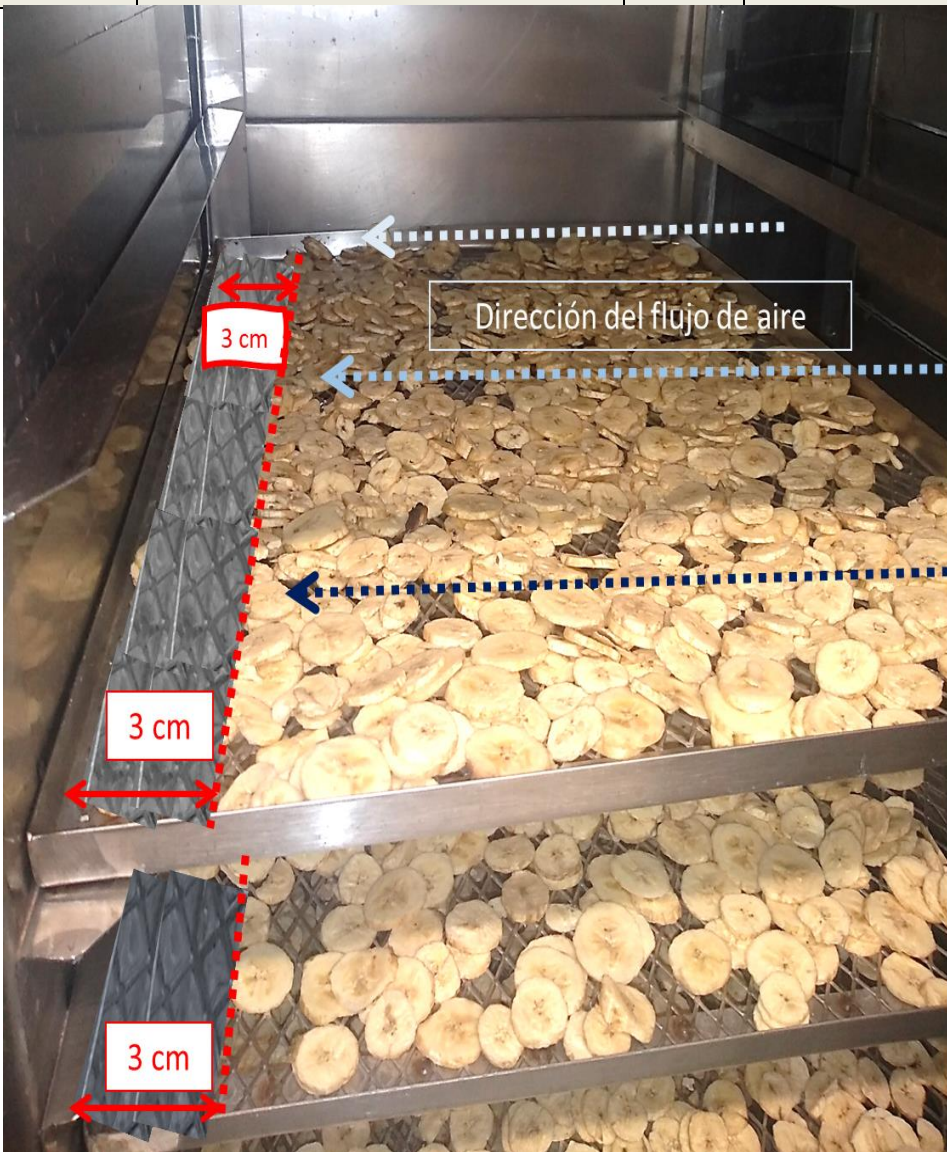
Carga de rodajas a charolas, franja libre y orientación.

	AYUDA VISUAL			F-CAL-10
				0010
PRODUCTO PLÁTANO VERDE PARA SECADO	CLIENTE GENÉRICO	EMISIÓN 1-nov.-2024	EMISOR CALIDAD	

**DEJAR
3 cm
DE FRANJA LIBRE
DE RODAJAS**

**PARA PERMITIR
CIRCULACIÓN DEL
AIRE CALIENTE
ENTRE CHAROLAS**

**LA FRANJA DEBE
DEJARSE DEL
LADO OPUESTO A
LA ENTRADA DE
AIRE.**



The image shows three metal trays stacked vertically, each filled with banana slices. A 3 cm wide strip is left free of slices on the left side of each tray. Red double-headed arrows and boxes labeled '3 cm' indicate this gap. Blue dashed arrows point from right to left across the trays, labeled 'Dirección del flujo de aire' (Direction of air flow). The trays are placed on a metal stand.

8. Bibliografía

- A. Vega Gálvez, M. M. (2008). Empirical modeling of drying process for apple (CV. Granny Smith) slices at different air temperatures. (I. Wiley Periodicals, Ed.) *Journal of Food Processing and Preservation*, 32(6), 972-986. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2008.00227.x>
- Agriculture, U. D. (01 de Abril de 2019). <https://www.usda.gov/>. Recuperado el 06 de Mayo de 2022, de <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/173945/nutrients>
- Amir Amini Khoozani, J. B.-D. (2019). Production, application and health effects of banana pulp and peel flour in the food industry. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 548*559. doi:<https://doi.org/10.1002/fsn3.298>
- Anne Vézina, J. G. (17 de Julio de 2020). <https://www.promusa.org>. Recuperado el 01 de Marzo de 2023, de <https://www.promusa.org/The+banana+seed>
- Anne Vézina, J. G. (25 de Septiembre de 2020). <https://www.promusa.org>. Recuperado el 01 de Marzo de 2023, de <https://www.promusa.org/Banana+flowers>
- Antonio Vega Gálvez, K. A.-H.-M.-S.-M. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132, 51-59. doi:10.1016/j.foodchem.2011.10.029
- Contenidos, U. (15 de Abril de 2020). AQA - Determinación actividad de agua (Método estático). (U. Tecnológica, Ed.) Uruguay. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=zy_6B6BWfZs&t=8s
- EL Financiero. (04 de Mayo de 2022). ¿Qué productos de la canasta básica entran y cuáles no al plan contra la inflación de AMLO? *El Financiero*. Obtenido de <https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/2022/05/04/que-productos-de-la-canasta-basica-entran-y-cuales-no-en-el-paquete-contra-la-inflacion-y-la-carestia/>
- Elfick, J. (25 de Febrero de 2023). <https://www.uq.edu.au>. Obtenido de https://www.uq.edu.au/_School_Science_Lessons/51.7.3.GIF
- Fito Maupoey, P. -A.-B. (2016). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México, DF, México: CECSA.
- Guyléne Aurore, B. P. (2009). Bananas, raw materials for making processed food products. *Food Science and technology*, 20, 78-91.
- INEGI. (s.f.). <https://www.inegi.org.mx>. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/?ti=6>
- INEGI. (s.f.). [inegi.org.mx](https://www.inegi.org.mx). Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/indicesdeprecios/calculadorainflacion.aspx>
- J.D.Seader, Henley, E. J., & Roper, D. (2011). *Separation Process Operations*. United States of America: JohnWiley & Sons, Inc.

- Jigesh Metha, D. S. (19 de Jun de 2020). Drying of Banana-Stepwise Effect in Drying Air Temperature on Drying. (T. O. Journal, Ed.) *The Open Chemical Engineering Journal*, 14, 71-76. doi:10.2174/1874123102014010071
- Jun Qiu, R. M. (2019). Agitated thin-film drying of foods. *Drying technology*, 37(6), 735-744. doi:10.1080/07373937.2018.1458037
- Khetarpaul, N. (2013). Food Processing and Preservation. En N. Khetarpaul, *Food Processing and Preservation* (págs. IV-13). Haryana, India: DAYA PUBLISHING HOUSE.
- Liaqat Ali, N. S. (2019). Foam Mat Drying of Banana (*Musa acuminata*) Pulp. *Biological Forum – An International Journal*. 11, págs. 280-283. Pakistán: Research Trend. Obtenido de www.researchtrend.net
- M. Plácido, M. A. (14 de Oct de 2009). Método higrométrico rápido para determinar actividad del agua. *Journal of food*, 3(4), 229-235. doi:10.1080/11358120209487733
- Martínez, E. G., & Segovia, I. F. (S/A). *Determinación de la humedad de un alimento por método gravimétrico indirecto por desecación*. Universitat Politècnica de València, Departamento de Tecnología de Alimentos. Valencia, España: Universitat Politècnica de València. Obtenido de [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16339/Determinación%20de%20humedad.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16339/Determinación%20de%20humedad.pdf)
- Maupoey, P. F., Gra, A. M., Baviera, J. M., & Sorolla, A. M. (2016). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, España: Editorial Universitat Politècnica de València.
- McCabe, W. L. (1993). *Unit Operation in Chemical Engineering* (5a ed.). Singapur: McGraw-Hill.
- McCabe, W. L. (2002). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (6a ed.). (M. A. Arriola, Trad.) México D.F., México: McGraw-Hill.
- Moreiras, O. C. (2003). *Tablas de composición de alimentos* (7a ed.). Madrid, España: Pirámide.
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of industrial drying*. Boca Raton, Florida, Estados Unidos de América: Taylor & Francis Group, LLC. doi:<https://doi.org/10.1201/9781420017618>
- Nimesh Chauhan, K. R. (2016). Drying Characteristics of Banana Powder. *Indian Journal of Science*, 23(77), 75-88.
- Plácido, M. (Abril de 2005). *ResearchGate*. doi:10.13140/RG.2.2.11033.01124
- Pyzdek, T. (2003). *The six sigma handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Quiceno, M. G. (2020). Caracterización fisicoquímica del plátano (*Musa paradisiaca* sp. AAB, Simmonds) para la industrialización. *UGCiencia*, 20, 48-54.
- Ratiya Thuwapanichayanan, S. P. (2008). Drying characteristics and quality of banana foam mat. *Journal of food engineering*, 86, 573-583|. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.11.008
- Riznic, J. (Diciembre de 2009). The logical framework approach - Millennium. *Project Management Journal*, 40(4), 31-44. doi:10.1002/pmj.20117
- S.V. Jangam, C. L. (2010). Drying of foods, vegetables and fruits. *Libro electrónico, 1*. (C. L. Sahim V. Jangam, Ed.)

- Sansom, K. (2011). An introduction to the logical framework. *Developing knowledge and capacity in water and sanitation*. (B. R. Shaw, Ed.) Leicestershire, UK: WEDC, Loughborough University.
- Secretaría de agricultura y desarrollo rural. (Febrero de 2020). <https://dj.senasica.gob.mx>. (S. d. rural, Ed.) Recuperado el 05 de Mayo de 2022, de https://dj.senasica.gob.mx/Contenido/files/2021/febrero/Estudioparadeterminarelimpactoecon%C3%B3micodeFocR4TenM%C3%A9xico_f78b4bad-6ebb-4ff1-b122-012ffa9112ed.pdf
- Secretaría de economía. (2022). <http://www.economia-sniim.gob.mx/>. Recuperado el 2022, de <http://www.economia-sniim.gob.mx/>: <http://www.economia-sniim.gob.mx/Analisis/CuadroAnualFRUanCons.asp?prod=732&uni=1&ori=8&pres=T&dest=T&x=25&y=14>
- Secretaría de Salud. (27 de Julio de 2009). *chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/318308/247-ssa1.pdf*. Obtenido de <https://www.gob.mx/busqueda?utf8=%E2%9C%93#gsc.tab=0&gsc.q=NOM-147-SSA1-1996&gsc.sort=:chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/318308/247-ssa1.pdf>
- Wikipedia. (05 de Nov de 2022). <https://es.wikipedia.org/>. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Psicrometr%C3%ADa>: <https://es.wikipedia.org/wiki/Psicrometr%C3%ADa>
- www.agrosintesis.com. (30 de Junio de 2016). www.agrosintesis.com. Obtenido de <https://www.agrosintesis.com/humedad-del-grano-del-maiz-importancia-la-comercializacion/>