

**MEJORAMIENTO DEL PROCESO PARA EL SECADO DE CAFÉ PERGAMINO
BAJO LAS CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE PUERTO RICO.**

Por

Alejandro Gracia Hernández

Tesis sometida en cumplimiento parcial
de los requisitos para el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

en

Ciencia y Tecnología de Alimentos

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2013

Aprobado por:

Javier A. Huertas Miranda, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Fernando J. Pérez Muñoz, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Francisco M. Monroig Saltar, Ph.D.
Presidente, Comité Graduado

Fecha

Jay O. Soto Vélez, MS, MIS
Representante, Estudios Graduados

Fecha

Edna Negrón de Bravo, Ph.D.
Coordinadora, Programa CITA

Fecha

ABSTRACT

A laboratory dryer was constructed and validated to simulate the drying process at various environmental conditions. The effect of the drying air temperature and specific humidity in the time and energy consumption of the process was studied using washed parchment coffee of the *Coffea arabica* variety. Three levels of temperature (45, 50 and 55°C) and three levels of specific humidity (0.014, 0.018 and 0.022 grams water / grams dry air) were used by triplicate. The results show that the drying temperature has a significant effect on energy consumption and drying time. The specific humidity only had significant effect on the energy consumption and drying time at the extreme temperature levels. The constant and falling drying rates were determined for all treatments and their energy consumption rates. A sensory evaluation was performed for parchment coffee, green coffee and roasted coffee.

RESUMEN

Se construyó y validó un secador de laboratorio para la simulación del proceso de secado a varias condiciones ambientales. Se estudió el efecto de la temperatura y la humedad específica del aire de secado en el tiempo y consumo energético del proceso utilizando café pergamino lavado de la variedad *Coffea arábica*. Se utilizaron tres niveles de temperatura (45, 50 y 55°C) y tres niveles de humedad específica (0.014, 0.018 y 0.022 gramos agua/gramos aire seco) por triplicados. Los resultados demuestran que la temperatura de secado tiene un efecto significativo en el consumo y en el tiempo de secado. La humedad específica solo tuvo efecto significativo en el consumo y tiempo de secado en los niveles extremos. Se determinó la razón de secado constante y de caída para todos los tratamientos y su razón de consumo. Se realizó una evaluación organoléptica al café pergamino, al café pilado y al café tostado.

**A Dios y a mi hijo Andrés Camilo,
Quienes me dan fuerzas día a día,
Para perseguir y lograr las metas propuestas en mi vida.**

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos principalmente a quien me guío, el Dr. Francisco M. Monroig Saltar, por su colaboración representada en sus conocimientos, disponibilidad y paciencia sin los cuales no se hubieran logrado las metas del proyecto.

Al Dr. Javier Huertas, responsable del proyecto HATCH-430, por haber colocado su confianza en mí, siendo parte del comité. Al Dr. Fernando Pérez Muñoz, por ser parte del comité, por sus aportes académicos y por sus consejos en los difíciles momentos de mi llegada a esta institución educativa.

A la Dra. Edna Negrón por su colaboración en todo momento desde la dirección del programa CITA. A la Dra. María Plaza por permitirme usar sus equipos y laboratorio. A todas las personas que hacen parte del personal administrativo y técnico del programa CITA-CITAI y el departamento de Ingeniería Agrícola y Biosistemas. A la Dra. Ivelisse Padilla y a la profesora Verónica Sánchez por permitirme ser parte de su equipo de trabajo en el departamento de Química.

A la Estación Experimental Agrícola, por el apoyo económico a ésta investigación a través del proyecto HATCH-430: “Revenue Opportunities for the Puerto Rico Coffee Industry”. Al personal de la Estación Experimental Agrícola - Adjuntas por su colaboración y disponibilidad de los equipos para la realización de la investigación.

Al Dr. Raúl Macchiavelli, a la Dra. Linda Beaver y al Dr. David Sotomayor por sus consejos y colaboración en el uso del Laboratorio de Biometría.

A Fernando Pantoja y Fabián Chaparro, por permitirme compartir sus amistades y sus consejos.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Lista de Tablas	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Apéndices	xii
Capítulo 1. Introducción.	1
1.1. La Industria del Café en Puerto Rico.	1
1.2. Justificación.	6
1.3. Objetivos.	7
1.3.1 Objetivo General.	7
1.3.2 Objetivos Específicos.	7
1.4. Resumen de Tesis.	8
Capítulo 2. Marco Teórico.	9
2.1 Beneficiados de Café	9
2.2 Principios de Secado	10
2.3 Secado de Café.	14
2.4 Componentes de un Secador Mecánico	17
2.4.1 Cámara de Secado.	17
2.4.2 Ventilador	19
2.4.3 Intercambiadores de Calor	20
2.4.4 Sistema de Combustión	20
2.5 Equipos para Secado Mecánico	21
2.5.1 Tipo Silo.	21
2.5.2 Tipo Guardiola o Bombo – Secadores Cilíndricos Giratorios	22
2.5.3 Tipo Bateas	23
2.6 Propiedades Físicas del Café Pergamino	24
2.6.1 Densidad Real (ρ_t).	24
2.6.2 Densidad Aparente (ρ_b).	24
2.6.3 Porosidad (ϵ).	25

2.7 Capas y Estructura del Grano de Café Pergamino	25
2.7.1 Capa de Pergamino	25
2.7.2 Capa de Perispermo	26
2.7.3 Endospermo	26
2.8 Calidad del Café Pergamino	27
2.9 Psicometría del Aire.....	29
2.9.1 Índices de Humedad.....	30
Capítulo 3. Revisión Bibliográfica	33
3.1. Temperatura del Aire de Secado (TS)	33
3.2. Humedad Relativa del Aire de Secado	39
3.3. Flujo de Aire de Secado	42
3.4. Inversión de Flujo de Aire de Secado	43
3.5. Calidad del Café Pergamino	45
3.6. Diferencias de la Investigación Realizada	47
Capítulo 4. Materiales y Métodos.....	49
4.1 Secador y sus Componentes.....	50
4.1.1 Generación y Control de Flujo.....	51
4.1.2 Calentamiento del Aire	51
4.1.3 Humidificación de Aire.....	51
4.1.4 Secador.....	52
4.1.5 Sistema de Intercambio de Flujo de Aire en el Secador	53
4.1.6 Instrumentación.....	53
4.1.7 Adquisición de Datos	56
4.2 Validaciones al Equipo	57
4.3 Pruebas Definitivas	63
4.3.1 Muestras de Café.....	63
4.3.2 Otros Aspectos Importantes de las Pruebas Definitivas	65
4.3.3 Diseño del Experimento.....	68
4.4 Evaluación del Café Pergamino	69
4.5 Análisis Estadístico	71
4.6 Limitación del Sistema	71

Capítulo 5. Resultados y Discusión	75
5.1 Análisis de Masa y Reducción de Masa	79
5.2 Análisis de Temperatura del Grano	82
5.3 Análisis Contenido de Humedad	84
5.4 Análisis Tiempo de Secado.....	87
5.5 Análisis Consumo de Energía.....	94
5.6 Determinación de la Razón de Secado y de Consumo Energético	102
5.7 Análisis Organoléptico.....	108
5.7.1 Analisis Café Pergamino Seco.....	109
5.7.2 Análisis Café – Pilado (Café Oro)	110
5.7.3 Análisis Café Tostado	111
Capítulo 6. Conclusiones	114
Capítulo 7. Recomendaciones.....	116
Bibliografía	117
Apéndices.....	122

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Diseño experimental.	68
Tabla 2. Orden de las pruebas del experimento al azar por lotes.	69
Tabla 3. Temperaturas de entrada promedio y desviaciones estándares por experimento.	77
Tabla 4. HS de entrada promedio y sus desviaciones estándares por experimentos.	78
Tabla 5. Tiempos de secado para alcanzar un contenido de humedad de 12% para los diferentes tratamientos y lotes.	87
Tabla 6. Consumo de energía (kWh), para diferentes tratamientos.	94
Tabla 7. Tratamientos (TS, HS) y las humedades relativas necesarias para alcanzarlos.	101
Tabla 8. Valores de razones de secado constante y de caída con sus consumos para Lote #2. ...	107
Tabla 9. TS y HS para 5 tratamientos usados en el análisis sensorial.	108
Tabla 10. Resultados de sensorial a café pergamino.	110
Tabla 11. Resultados sensorial de granos pilados.	110
Tabla 12. Resultados sensorial de café tostado.	112

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Producción de café en Puerto Rico.....	2
Figura 2. Producción y consumo local de café.	3
Figura 3. Etapas de secado para pedazos de manzanas y tazas de secado a diferentes contenidos de humedad.	12
Figura 4. Diseños cámaras de secado de capas fijas.	18
Figura 5. Secador tipo silo de capa estática con inversión de flujo.	22
Figura 6. Secador industrial Guardiola desmontable.	22
Figura 7. Equipo de secado de café tipo Batea.	23
Figura 8. Secador de laboratorio utilizado para los experimentos (A) y su cámara interior (B).	50
Figura 9. Esquemático de los componentes principales del secador de laboratorio utilizado en el experimento.	50
Figura 10. Interior del secador con bandeja metálica para muestras.	53
Figura 11. Instalación del sensor de temperatura y humedad relativa del aire en el ducto (A) y vista interior (B).	54
Figura 12. Posiciones de detectores termo-resistivos en la bandeja.	56
Figura 13. Diagrama de pantalla de programación LabVIEW.	57
Figura 14. Analizador de humedad (Balanza Sartorius MA35).	61
Figura 15. Canasta y soporte metálico usado en el secador.	65
Figura 16. Histograma de los diferentes valores de humedad específica en beneficiado de café Mayagüez en los meses de septiembre a noviembre.	66
Figura 17. Equipo Quantic L-200 para pilado eléctrico de granos de café pergamino.	70
Figura 18. Tostador de café Gene Café, modelo CBR- 101A.	71
Figura 19. Efecto de la temperatura de secado en los sensores de masa.	72
Figura 20. Lecturas de los sensores de masa y lectura corregida con factor de temperatura durante el precalentamiento.	73
Figura 21. Lecturas de los sensores de masa y lectura corregida con factor de temperatura durante el experimento	74
Figura 22. Comportamiento de temperaturas en equipo durante el proceso.	76
Figura 23. Comportamiento de humedades específicas en equipo durante el proceso.	76
Figura 24. Promedio masa del café a través del tiempo de secado.	80
Figura 25. Reducción porcentual promedio de masa del café a través del tiempo.	82
Figura 26. Temperaturas promedio masa del grano de café a través del tiempo.	83
Figura 27. Contenido de humedad promedio en el grano a través del tiempo.	85
Figura 28. Tiempos de secado de café pergamino a diferentes HS. – Promedio lotes.	88
Figura 29. Análisis estadístico del efecto de la temperatura del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino.	89

Figura 30. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino.	90
Figura 31. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino a temperatura de secado de 45°C.....	91
Figura 32. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino a temperatura de secado de 50°C.....	91
Figura 33. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino a temperatura de secado de 55°C.....	92
Figura 34. Análisis estadístico del efecto de la interacción de la temperatura y humedad específica del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino.	93
Figura 35. Consumo energía de secado café pergamino a diferentes HS. – Promedio Lotes.	95
Figura 36. Análisis estadístico del efecto de la temperatura del aire de secado en el consumo energético de secado para café pergamino.	96
Figura 37. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el consumo energético de secado para café pergamino.....	97
Figura 38. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el consumo energético para café pergamino a temperatura de secado de 45°C.	98
Figura 39. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el consumo energético para café pergamino a TS = 50°C.....	98
Figura 40. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el consumo energético para café pergamino a temperatura de secado de 55°C.	99
Figura 41. Análisis estadístico del efecto de la interacción de la temperatura y humedad específica del aire de secado en el consumo energético para café pergamino.	100
Figura 42. Comportamiento Prueba TS=50 y HS=0.018.....	103
Figura 43. Curva de Razón de Secado para TS = 50 y HS = 0.018.....	104
Figura 44. Consumo energético de la razón constante y de caída para prueba TS=50/ HS=0.018 del Lote 2.	106
Figura 45. Granos de café pergamino utilizados para las pruebas sensoriales.	109
Figura 46. Granos pilados utilizados para las pruebas sensoriales.	111
Figura 47. Granos de café tostado utilizados para las pruebas sensoriales.....	112

LISTA DE APÉNDICES

	Página
Apéndice A. Manual del Equipo.....	122
Apéndice B. Procesamiento de Datos (ANOVA).....	127
Apéndice C. Análisis Sensorial.....	141

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. LA INDUSTRIA DEL CAFÉ EN PUERTO RICO.

La industria del café ha sido tradicionalmente una de las de mayor importancia en Puerto Rico. Representa el cuarto renglón de la producción agrícola en cuanto su aportación a la economía del país. Para el año fiscal 2011-2012, la industria cafetalera estaba compuesta por 10,000 agricultores, 132 beneficiadores y 39 torrefactores (Flores Ortega, 2011). Además, provee empleo a 20,000 trabajadores en una región con limitada actividad económica y altas tasas de desempleo. La actividad caficultora se concentra especialmente en 22 municipios del área central-oeste.

Para el año 2009/2010, el café representó el 9.0% de los \$283.2 millones de dólares que aportaron el sector de las cosechas en Puerto Rico. Para el año 2010/2011, representó el 11.30% de los \$261.8 millones de dólares del sector de cosechas. (Departamento Agricultura, 2010). Sin embargo, en los últimos años la producción de café se ha visto disminuida según se puede observar en la Figura 1.

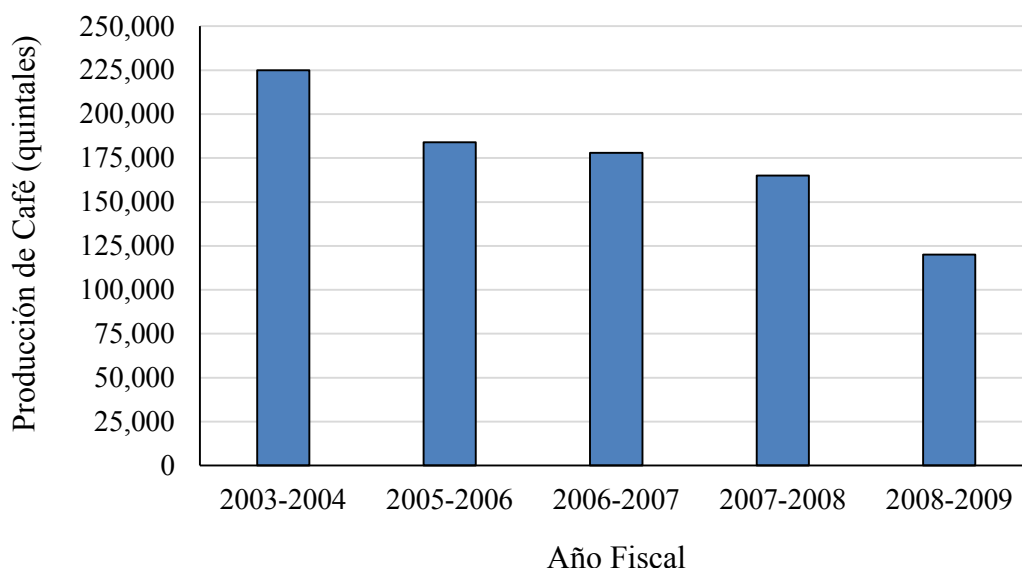


Figura 1. Producción de café en Puerto Rico. Fuente: Informe Empresa del Café 2011-2012.

Entre los principales problemas que contribuyen a la reducción de la producción encontramos: la escases de mano de obra para recolectar adecuadamente y a tiempo la cosecha, así como los altos costos que implican para el caficultor. Los costos de los fertilizantes han aumentado y las diferentes políticas gubernamentales han disminuido sus aportes al caficultor. La recién aparición en Puerto Rico de la broca del café, plaga que contribuye a la disminución del rendimiento y la calidad, ha representado un aumento en los costos para controlarla. La reglamentación del precio del café comercial, la disminución de los incentivos del gobierno, la eliminación de programas para el establecimiento de nuevos cultivos de café y el cierre de programas que ayudaban a reemplazar maquinaria agrícola han sido otros factores que han contribuido a la reducción del margen de ganancia de los caficultores (Flores Ortega, 2011).

A pesar de los problemas que afectan a los caficultores en Puerto Rico, el sector se mantiene activo dado que la venta de su producción siempre va a tener compradores. Otro punto a

favor, es que la producción actual no llega a los niveles de demanda. En la Figura 2, se puede observar como en los últimos años el consumo de café ha ido aumentando, mientras que la producción local ha bajado. Esta diferencia entre el consumo y producción local se ha tenido que compensar con la importación de café a la isla. Analizando los datos para ese mismo periodo, se registró un aumento en el consumo de un 27%, mientras que la producción bajo 20%. Dadas las anteriores cifras, se puede ver que existe un amplio margen para producción de café necesaria en el mercado.

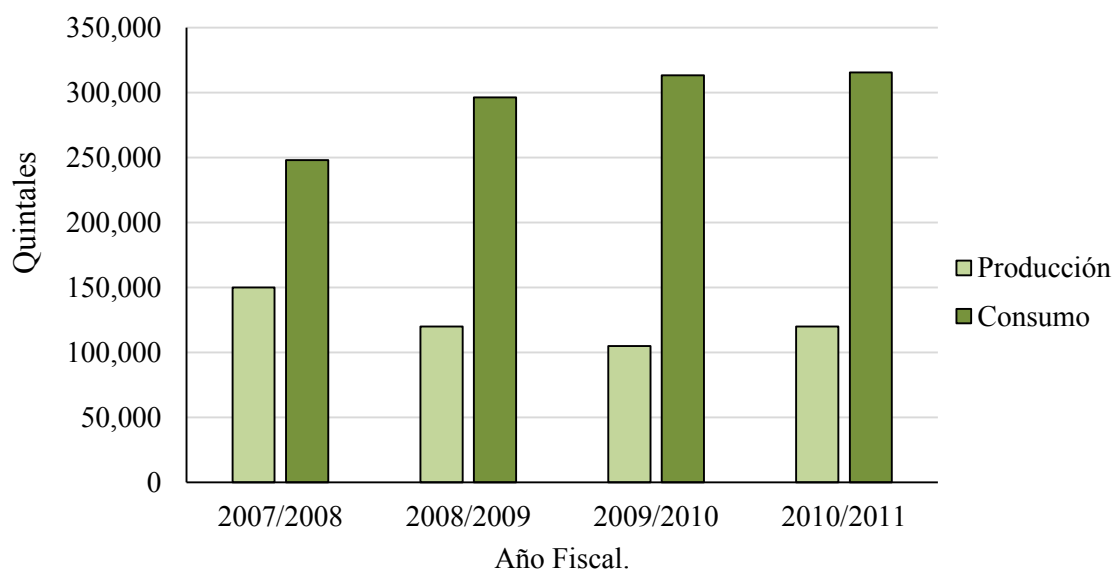


Figura 2. Producción y consumo local de café. Departamento de Agricultura, 2010.

Otra perspectiva para hacer más llamativa la producción de café en el país es dirigir a los caficultores hacia la producción de cafés especiales. Por sus requerimientos de calidad, estos representan mayores ganancias en sus precios de venta y mayores oportunidades para su mercadeo. Es hacia éste renglón que debe moverse la industria cafetalera en Puerto Rico ya que permite salirse del precio establecido para café comercial, cubrir los altos costos asociados con la producción del producto y generar un mayor margen de ganancia. Para lograr éste objetivo, es

necesario establecer unas buenas prácticas en el manejo del producto para obtener un café con la calidad necesaria para ser considerado especial.

En los últimos años, uno de los componentes de la industria cafetera que más se ha visto afectado ha sido el beneficiado de café. Este proceso es la transformación primaria del grano, que consiste en la remoción de la cascara al grano cereza, la pulpa y el mucílago, seguido del lavado y un posterior secado del grano. El grano seco, permite un mejor manejo y es apto para almacenarlo por largos periodos de tiempo hasta someterlo al proceso de torrefacción en donde se le retira el pergamino (pilado), se somete a tostación y a una molienda (Anacafe, 2005).

En Puerto Rico se utilizan dos tecnologías de beneficiado del café por vía húmeda: tradicional y ecológico. Desde el año 2004, esfuerzos combinados entre el Departamento de Agricultura de Puerto Rico, del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) y la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, promovieron la conversión de los beneficiados tradicionales (vía húmeda) a beneficiados ecológicos. Estos módulos ecológicos, han logrado reducir los costos asociados con el uso de agua y electricidad al despulpar y desmucilaginar el café uva (cereza). Al ser integrados, compactos y de alta capacidad, un motor se aprovecha para varias funciones, ahorrando electricidad y mantenimiento. El café uva y el despulpado se transportan en seco y la desmucilaginadora utiliza poca agua, lo que ahorra considerablemente este recurso (IICA, 2010).

Aun cuando se han logrado grandes avances en la reducción de costos en el proceso de despulpado y desmucilaginado de café, el secado de café pergamino ha sido identificado por los beneficiadores como uno de los de mayores costos. En éste paso se reduce la humedad del grano

pergamino, de 50 a 56%, a 12%. Como combustible, comúnmente se utilizan gas propano o diésel, en un intercambiador de calor. En muchos casos, se aprovecha el cisco del café. El proceso puede durar de 15 a 30 horas y la temperatura de la masa de grano debe estar entre 40°C y 50°C. Temperaturas por encima a los 50°C pueden causar endurecimiento en la superficie del grano y evitar la salida de humedad. Las altas temperaturas dañan la apariencia y calidad de grano, además de provocar la pérdida de peso y provocar la expulsión del embrión. Por el contrario, temperaturas muy bajas pueden retardar el secado y lo hacen más costoso, así como causar problemas durante el almacenamiento por el ataque de hongos o pérdidas de sabor poniendo en riesgo la calidad del grano (Puerta Quintero, 1999).

El clima de las áreas central y oeste de la isla son adecuadas para producir café. Poseen un promedio de temperaturas mensuales que varía de 20 a 30°C y de 1.78 a 2.54 metros de lluvia distribuidas a lo largo del año. Generalmente hay un periodo de sequía que comprende los meses de febrero, marzo y abril. En contraste, los meses de agosto, septiembre y octubre presentan promedios superiores a 0.229 metros de precipitación de lluvia, lo que los convierte en la época más lluviosa del año (Vicente-Chandler et al., 1984). Este periodo de lluvia coincide con la época de cosecha del café y por consiguiente con los procesos de secado mecánico del grano. Debido a la lluvia frecuente, la utilización del secado solar disminuye, por lo que en muchos casos se utiliza el secado mecánico para deshidratar el grano lo antes posible después de su recolección para evitar su deterioro, especialmente por fermentaciones. El hecho de realizar el secado mecánico paralelo a la precipitación de lluvia, conlleva tener que utilizar el aire cargado con gran cantidad de humedad, lo cual va a aumentar los tiempos de secado o a utilizar temperaturas elevadas para

reducir los tiempos de proceso. Lo anterior, también va a incidir sobre la utilización de combustible o energía para realizar los procesos de secado eficazmente.

1.2. JUSTIFICACIÓN.

El propósito de la investigación fue hacer un aporte a la industria del café en Puerto Rico en el sector de beneficiado, específicamente, en el proceso de secado del café pergamino. Con el estudio del efecto que tiene el aire ambiental sobre el proceso de secado deberá ser de utilidad para hacer un uso adecuado de los combustibles o la energía. Al someter la masa de granos a secar a tiempos determinados, con el uso de flujos de aire y temperaturas de secado óptimas para las condiciones ambientales, se deben obtener ahorros económicos y en cuanto a los tiempos gastados en los procesos sin demeritar la calidad en el café pergamino secado en la región.

La necesidad de aplicar los resultados obtenidos de la investigación en el secado del café pergamino es urgente, dada la falta de conocimiento y las malas prácticas aplicadas durante años. Además, las nuevas condiciones durante el secado van encaminadas a mejorar el buen nombre del café producido en Puerto Rico, ayudándolo a competir internacionalmente. Siendo lo anterior, parte de los lineamientos enmarcados en los objetivos del proyecto “Revenue Opportunities for the Puerto Rican Coffee Industry”.

La investigación comprendió el diseño, fabricación y validación de un secador (prototipo) de café pergamino para simular las condiciones ambientales en la época de cosecha y secado de café pergamino en Puerto Rico. Luego se realizaron pruebas de secado con tiempos de 36 horas, utilizando diferentes temperaturas, simulando diferentes humedades específicas, con una capa de

grano y flujo de aire constante. De los procesos de secado y las de las evaluaciones sensoriales del café se obtuvieron datos que fueron analizados estadísticamente. Se pretendió estudiar la influencia y los efectos de las diferentes variables sobre el consumo de energía y tiempo de proceso hasta lograr una humedad promedio de 12 % en el grano.

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

- Optimizar los métodos para el secado de café pergamino, tomando en consideración las condiciones climatológicas de Puerto Rico en la época de cosecha.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Construcción y validación de un secador para café pergamino a escala de laboratorio para la simulación del proceso de secado a varias condiciones ambientales.
- Estudio del efecto de la temperatura y la humedad específica del aire de secado en el tiempo de proceso y consumo energético del secado de café pergamino.
- Evaluación organoléptica y estadística de la calidad del café pergamino obtenido bajo las condiciones ambientales simuladas.

1.4. RESUMEN DE TESIS.

El Capítulo 2, Marco teórico, presenta una reseña sobre café, procesamiento de café pergamino y principios de secado. El Capítulo 3, Revisión bibliográfica, presenta las principales variables que intervienen en el proceso de secado de café pergamino, así como estudios previos de este tipo, y la aportación de ésta investigación.

Posteriormente, en el Capítulo 4, Materiales y métodos, se encontrará una detallada descripción del secador construido y sus componentes, el recuento de todos los procedimientos utilizados para su validación, la metodología utilizada para las pruebas definitivas del estudio, la preparación de las muestras de café pergamino, el diseño del experimento, la evaluación organoléptica del café secado y todo lo relacionado al análisis estadístico.

El Capítulo 5, Resultados y discusión, contiene los principales resultados obtenidos en la investigación seguidos de la discusión y análisis correspondiente. Finalmente en el Capítulo 6, se presentan las conclusiones derivadas del presente estudio, y en el Capítulo 7 las recomendaciones para futuros estudios.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

La planta de café es originaria de Etiopía pero la bebida tiene orígenes en Arabia y Egipto. En el siglo XVII, el café viajó a la isla de Java, en el archipiélago Malayo, donde, por tener suelos de tipo volcánico, se favoreció la difusión del cultivo. Desde allí se introduce hacia Europa en calidad de especie para investigación en los jardines botánicos de Ámsterdam y París. Militares Franceses introducen la planta a la Isla de Martinica, donde se disemina su cultivo por las Antillas y llega a Surinam, para posteriormente ser introducido a Brasil y Colombia (Castañeda-Parraga, 2004). A Puerto Rico llega en el año de 1736 y solo hasta el año 1755 se tiene conocimiento de la primera plantación en la zona del municipio de Coamo.

En Puerto Rico, la principal variedad cultivada es la *Coffea arabica*, la cual necesita una precipitación desde 1.78 hasta 2.54 metros. Altitudes de 100 a 915 metros y un clima de 17°C a 29°C. Su tiempo anual de cosecha por lo general va desde septiembre hasta abril siendo entre septiembre y noviembre donde se concentra el pico de la cosecha; coincidiendo con la época más lluviosa de la isla (Monroig Inglés, 2013).

2.1 BENEFICIADOS DE CAFÉ

En Puerto Rico el café se beneficia de dos maneras: mediante el beneficiado tradicional o convencional y el beneficiado ecológico. El beneficiado tradicional consiste en una serie de etapas que conllevan a retirar la pulpa del grano, fermentar el mucílago, y lavar el grano para remover el mucílago. Este beneficiado se considera una transformación primaria del grano. El beneficiado

ecológico, a diferencia del tradicional, consiste en retirar la pulpa y mucilago del grano por medio mecánico sin llevar a cabo el proceso de fermentación.

Un factor que contribuye con la eficiencia del beneficiado ecológico es la utilización de maquinaria agrícola eficiente compuesta por módulos integrados, compactos y de gran capacidad de trabajo. Utilizan motores para varios componentes para conseguir ahorros en energía y mantenimiento. Las operaciones de transporte y despulpado se hacen en seco y los equipos que utilizan agua son eficientes, en cuanto al ahorro de este recurso. Los subproductos al final son canalizados para ser utilizados de diferentes maneras, principalmente en la elaboración de fertilizantes orgánicos.

Las técnicas utilizadas para beneficiar café son la vía seca y la vía húmeda. La primera consiste en un proceso para preservar el café que consta de las operaciones de recolección, secado, ensacado y almacenamiento. El grano se somete a secado sin retirar la cáscara y demás componentes. La técnica de vía húmeda es más completa y se le llama así porque utiliza agua en el procesamiento del grano. Las operaciones que se realizan son recolección, flotación, despulpado, fermentación, desmucilaginado, lavado, secado, ensacado y almacenamiento (Monroig Inglés, 2013).

2.2 PRINCIPIOS DE SECADO

El secado generalmente se refiere a la remoción de un líquido de un sólido por proceso de evaporación. Cuando un sólido húmedo se somete a un proceso de secado se presentan dos subprocesos. El primero consiste en la transferencia de la humedad del sólido hacia la superficie de éste y su posterior evaporación. El movimiento de la humedad dentro del sólido ocurre

principalmente por convección y es una función de su naturaleza, su temperatura y su contenido de humedad. El movimiento de la humedad dentro del material alimenticio puede ser causado por la combinación de diferentes mecanismos de transporte como flujo capilar, difusión de líquidos, difusión de vapor (Sfredo el al., 2005) El segundo subproceso consiste en la transferencia de energía en forma de calor del ambiente que rodea al sólido, para evaporar la humedad de su superficie. Este subproceso ocurre por transferencia de energía por convección y conducción, dependiendo de las condiciones externas de temperatura, humedad y flujo de aire, presión y área de exposición.

El proceso de secado completo de un alimento ocurre en un número de etapas, que se caracterizan por tener diferentes tasas de secado para cada etapa, como se puede observar en la Figura 3. Al observar una curva de secado se encuentra una velocidad de secado constante (línea AB). En esta primera etapa del ciclo de secado se efectúa una evaporación en la superficie del alimento porque su agua libre ($AW = 1.00$), se encuentra disponible para ser evaporada. Esta es una etapa a velocidad de secado constante y es limitada por la velocidad a la cual el calor se transfiere al material desde el aire de secado. La temperatura del producto es igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado.

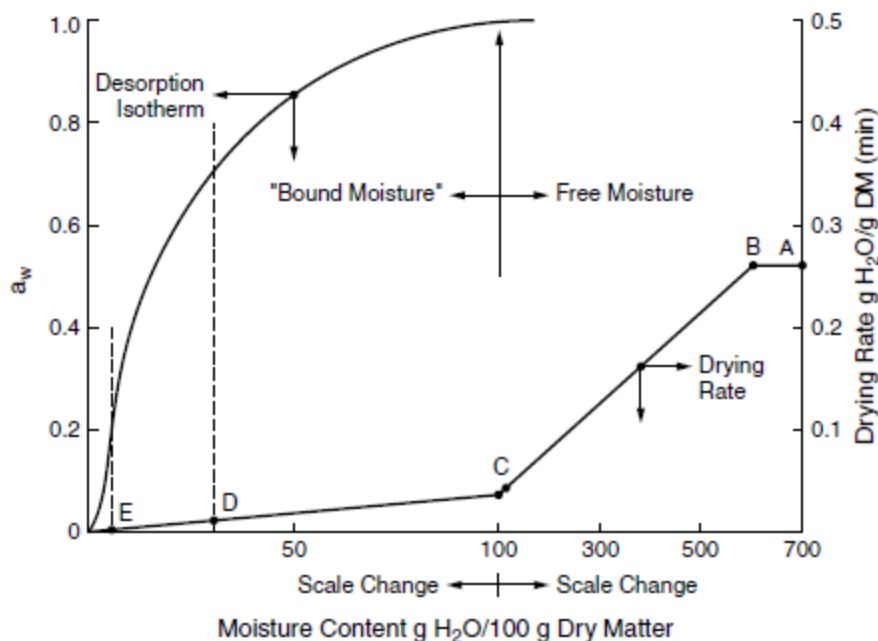


Figura 3. Etapas de secado para pedazos de manzanas y tazas de secado a diferentes contenidos de humedad. (Fuente: Toledo, 1991).

El punto B, es el contenido de humedad crítico y comienza a disminuir la velocidad de secado linealmente con el contenido de humedad. La línea BC representa el primer periodo de velocidad decreciente y se caracteriza por un ligero aumento en la temperatura del producto, aunque ésta puede ser menor que la temperatura de bulbo húmedo. En este punto del secado, se presenta mucha humedad libre en la superficie y la velocidad de secado es controlada por la difusión de humedad hacia la superficie. La mayor parte del agua en el material aun es de naturaleza libre, pero debe difundirse hacia la superficie para que se produzca su evaporación. A continuación la pendiente de la velocidad de secado versus el contenido de humedad, presenta cambios y la taza de secado pasa a un segundo periodo de velocidad decreciente. Esta segunda taza decreciente comienza en el punto C, donde la humedad relativa de equilibrio para el material comienza a caer por debajo de 100%.

El contenido de humedad en el punto C está determinado por la cantidad de agua ligada que contiene el material. Durante este periodo la tasa de secado comienza a disminuir, los procesos de deshidratación siguen las isotermas de adsorción del agua, produciéndose en el material adsorción multimolecular y condensación capilar. El calor de vaporización del agua es mayor que el calor de vaporización del agua pura debido al calor de adsorción y la evaporación se produce en el interior del material. El vapor de agua tiene que difundirse hacia la superficie antes de mezclarse con la corriente de vapor de aire que fluye (Toledo, 1991).

A continuación, el contenido de humedad disminuye y la velocidad de secado pasa a otra zona en donde las tasas de secado son decrecientes. Esta etapa de secado corresponde a la región de la isoterma de evaporación de agua, donde se llevan a cabo la evaporación por mono o multi capas moleculares. La deshidratación debe ser detenida en cualquier punto a lo largo de la línea DE. El punto E representa el contenido de humedad de equilibrio en el que se debe detener la deshidratación debido a que el AW de la superficie del producto y el aire de secado se igualan.

Cuando el aire de secado es forzado a través de una capa de granos, todos los granos no secan uniformemente y al mismo tiempo. Esto es más evidente cuando se utilizan tasas de flujos de aire por unidades de volumen bajas. Usualmente en un secador de capa fija se considera que el grano va a desarrollar tres diferentes zonas. La primera, llamada zona de grano secado, la segunda, zona de grano secándose y una tercera llamada zona húmeda o de grano sin secar. Los procesos que se realizan en esas zonas son más complejos y pueden involucrar zonas de rehumidificar, enfriar y atemperar granos, a lo largo del recorrido del aire que atraviesa la capa. Las zonas que se desarrollan son dependientes de la temperatura y la humedad relativa del aire que entra, así como de la temperatura de equilibrio y condiciones de contenido de humedad del grano a través de toda la columna. En general, se pueden diferenciar siete zonas en todo el proceso y se sus procesos se

pueden representar en el diagrama sicométrico. La complejidad del desarrollo de las zonas se debe a que hay muchos procesos simultáneos (Valentas et al., 1997).

Un frente de secado uniforme se produce sólo cuando hay flujo de aire paralelo con una velocidad uniforme a través de toda la sección transversal del secador. La diferencia en la profundidad de la capa de grano, la variabilidad en la resistencia al flujo de aire por parte del grano en diferentes lugares y el uso de ductos para distribuir aire de secado, mal implementados en el secador producen patrones de secado no uniformes en la capa de grano. Concentraciones de material extraño y granos partidos pueden modificar el flujo de aire, lo que afectaría las tasas de secado de esa sección de la capa de grano. Un secado no uniforme, produce una excesiva variación en el contenido de humedad a través de la sección horizontal en la masa de grano. Es aconsejable que el grano se encuentre limpio para el secado y que el material extraño fino o granos partidos que permanezcan, sean distribuidos en la capa de grano (Loewer et al., 1994).

2.3 SECADO DE CAFÉ

El secado consiste en la remoción del agua del producto hasta lograr un porcentaje de humedad equilibrado con el aire atmosférico ambiental o hasta un nivel de humedad determinado. El propósito es preservar la calidad, evitando el deterioro por la acción de los microorganismos u otros agentes. Después del proceso de beneficiado húmedo, el café pergamino presenta un porcentaje de humedad entre 50 a 58%, lo que hace necesario realizar un secado inmediato con el fin de evitar procesos fermentativos. Estos defectos en la calidad del café solo se perciben durante el consumo del café como bebida, lo que comúnmente se denomina mala calidad de taza. Además de lo anterior, un secado adecuado del café le confiere al grano una buena apariencia, uniformidad

en el color de todos los granos, y al conseguir un peso justo de la materia seca, evita pérdidas económicas.

Un atributo de la calidad del café es el contenido de humedad, el cual inclusive se toma como parámetro de comercialización a nivel nacional e internacional. Este debe estar entre 10 y 12 % (b.h). Estos valores están determinados por el equilibrio higroscópico o por el equilibrio entre la presión de vapor del grano y la del aire circundante. El contenido de humedad también se toma como parámetro para la conservación del grano, siempre que se quiera conservar su buena calidad. El contenido de humedad del 12% es el valor máximo al cual se debe almacenar café pergamino en condiciones ambientales por tiempos prolongados. Valores superiores a este, contribuyen a que actividades fisiológicas del grano, como por ejemplo la respiración, consuman energía propia del grano, liberando calor y perdiendo peso el grano (Ministerio Agricultura y Ganadería de Costa Rica, 2010).

Además, a valores de almacenamiento mayores de 12% de contenido de humedad, se presentan altos niveles de humedad relativa de equilibrio, mayores al 70% en el aire entre los granos, generando una gran actividad microbiológica. Los principales organismos que atacan al café en estas condiciones de almacenamiento son los hongos, seguidos de los mohos y ciertas bacterias (Potter y Hotchkiss, 1997). En regiones de clima cálido estos procesos de deterioro a nivel del grano, se dan más rápidamente.

El proceso de secado de café es un proceso complejo y por lo general enfrenta diferentes dificultades en su desempeño. Al presentar el grano un elevado contenido de humedad, hace necesario su evaporación, lo cual debe regirse por las condiciones del grano y conlleva a aumento en tiempos de proceso, así como a un mayor consumo de combustibles. Otro inconveniente del

grano de café pergamino es su difícil manejo por su inconsistencia mecánica, lo que genera disminución en el rendimiento de la materia seca. Por otro lado, la obstrucción del paso uniforme del aire de secado a través de la capa de grano, es crítica para la calidad final del producto (Restrepo y Burbano, 2005).

Durante el proceso de secado de café pergamino se han logrado determinar tres diferentes etapas (Espinosa y Flores, 2011):

- Oreado: remoción del exceso de agua que se encuentra en la superficie del grano y su objetivo es reducir la humedad desde 55 a 56% hasta aproximadamente 48 %.
- Pre-secado: durante esta etapa se evapora el agua que se encuentra presente entre el pergamino. Se logra una reducción del contenido de humedad hasta el 32%.
- Secado: evaporación del agua que se encuentra en el interior del grano hasta lograr un equilibrio con el medio ambiente. Al final de esta etapa se logra obtener valores de humedad entre 11 a 12%.

Durante el proceso, los granos transfieren la mayor parte de su humedad al aire caliente que pasa forzosamente entre ellos. La humedad de la superficie y la que se encuentra entre el pergamino y el grano se transfieren rápida y fácilmente al aire. En estas dos fases el coeficiente de transferencia de masas por convección va a determinar la rapidez del secado. Posteriormente, se inicia una migración lenta del agua desde el interior del grano hacia la parte externa con el fin de sustituir el agua perdida en la zona superficial del grano, fenómeno que se denomina “difusión”. Esta última fase, va a depender del contenido de humedad del grano y de la resistencia al paso del agua en el interior del grano (Montoya, 1989).

2.4 COMPONENTES DE UN SECADOR MECÁNICO

En los beneficiados que procesan gran volumen de grano, se hace necesario utilizar métodos de secado mecánicos. El secado mecánico consiste en el reemplazo del sol como fuente de energía por un conjunto de elementos mecánicos ensamblados, para lograr el secado del grano a gran escala y sin causar daños al producto final. Al recurrir a estos métodos se aprovecha las ventajas que ofrece el grano de café como, por ejemplo, que sus espacios entre granos son amplios. Esto permite una fluidez del caudal de aire de secado entre granos y en la mayoría de los casos, no es necesario forzar el paso del aire caliente o sobredimensionar la potencia de los equipos. Por otro lado, las condiciones, forma y naturaleza del grano de café, permiten un intercambio adecuado y eficiente de la humedad extraída del grano y la energía térmica que provoca su secado (Roa, 1999).

Un secador convencional consta de: una cámara de secado, un ventilador, un intercambiador de calor y el sistema de combustión. A continuación una breve descripción de ellos.

2.4.1 CÁMARA DE SECADO

Es la zona donde se deposita y permanece el grano durante su secado. El piso debe ser de mallas con ranuras o con orificios de acuerdo a especificaciones, con el propósito de permitir el paso del aire. Es la zona donde se debe procurar una difusión adecuada del caudal de aire caliente a través de la masa de café (Sivetz et al., 1979). Lograr una uniformidad en el secado de los granos es el objetivo principal. Esto se logra obteniendo un porcentaje de humedad lo más similar posible entre los granos de la parte superior y la parte inferior de la capa de café sometida a secado. Los secadores de capa estática siempre han presentado altos gradientes de humedad (diferencias de

alrededor del 13%) en la misma capa. Para lograr disminuir este valor y lograr uniformidad en el % de humedad, se han diseñado secadores estáticos pero con la inversión del flujo del aire caliente, es decir, atravesando la capa de grano en dos direcciones (Figura 4a). Tratando de obtener ahorros en las construcciones y adquisiciones se ha llegado a los modelos de los secadores verticales de 2 pisos. Estos son más sencillos y ocupan menos espacios. Su sistema para lograr la inversión de flujo también es más sencillo porque ocupa menos compuertas y se aprovecha el calor para hacer pre-secado (cámaras de pre-secado incluidas en el diseño). Por lo tanto, el secado se hace con inversión en dos sentidos y el pre-secado se hace solo de abajo hacia arriba (Figura 4b). Otra forma de optimizar la uniformidad de la humedad final es el diseño de tres pisos con inversión de flujo en la primera capa. Este presenta mejores resultados y solo se debe tener en cuenta la bajada en forma ordenada de la capa siguiente (Figura 4c).

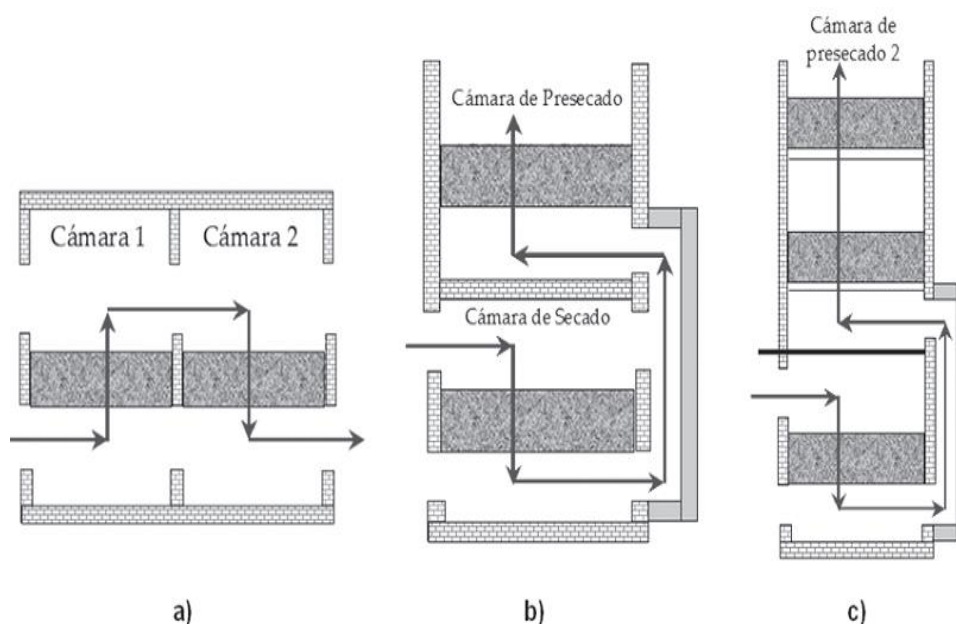


Figura 4. Diseños cámaras de secado de capas fijas. (Fuente: Ciro-Velásquez, 2000).

2.4.2 VENTILADOR

Tiene como objetivo principal impulsar el caudal de aire apropiado para lograr que pase a través de la capa de grano. Se considera el corazón del sistema de secado porque de él depende que el flujo de aire consiga el caudal y la presión necesaria para vencer las pérdidas por las diferentes presiones estáticas encontradas a lo largo del sistema. El cálculo del caudal necesario frente a la suma de todas las presiones parciales del sistema, va a ser el resultado que determine la selección del ventilador. Otros factores importantes para tener en cuenta a la hora de seleccionar el ventilador deben ser: la eficiencia deseada, el nivel de ruido, la estabilidad mecánica, el balanceo estático y mecánico, la calidad de los materiales, los rodamientos utilizados, el tipo de conexión entre el motor con el eje del ventilador y la posición del ventilador.

Los ventiladores más apropiados para ser utilizados en el secado mecánico del café, son los centrífugos porque presentan un alto rendimiento y buen desempeño a altas presiones. En términos económicos, el control del flujo de aire va a incidir en la rentabilidad del proceso. Cuando el flujo de aire es deficiente en un secador, conlleva a discrepancias en los contenidos de humedad, presentando granos con humedades superiores al 14% o granos sobre-secados con contenidos de humedad inferiores al 10%. Esto se refleja en los defectos del café secado y en el aumento del tiempo del proceso. Por el contrario, cuando el flujo de aire es mayor que el recomendado, nos encontramos con un mal aprovechamiento del exceso de la energía térmica. Entonces, se incrementa la demanda de potencia del ventilador, aumentando el consumo de combustible y resultando más costoso el secado del café (Roa, 1999).

2.4.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR

Se denomina a la superficie o instalación destinada para producir un intercambio térmico entre dos fluidos, conduciendo el calor del más caliente al menos caliente. Las principales características que debe poseer son: un área adecuada para el intercambio entre la cámara donde se produce la combustión y el equipo o superficie que caliente el aire. Una adecuada geometría que garantice un alto coeficiente de transferencia de calor por convección. Un flujo en contracorriente entre el flujo de gases de combustión y el aire a calentar. La mayoría de estos equipos de construcción industrial presentan niveles de eficiencia de alrededor del 60%.

También presentan una baja eficiencia neumática debido a sus diferentes diseños, los cuales inducen a pérdidas de presión en el equipo de secado. Por lo general, requieren mayor presión que la necesaria para la capa de grano, es decir entre el 35 a 50 % de la presión que da el ventilador a un caudal determinado. Los que presentan menos pérdidas de presión, poseen baja eficiencia térmica, lo cual se traduce en alto consumo de combustible. Ahora, los que presentan eficiencia térmica aceptable, presentan altas pérdidas de presión, lo que requiere mayor potencia por parte del ventilador, aumentando considerablemente el costo del proceso.

2.4.4 SISTEMA DE COMBUSTIÓN

Son los dispositivos utilizados para calentar el aire mediante la combustión de los combustibles, transformando la energía química en térmica. Por lo general, son construidos en acero laminado. Estos sistemas son de dos clases: de fuego directo o indirecto. Con los de fuego directo no se utilizan intercambiadores de calor ni chimeneas para evacuar gases. Se disminuye el tiempo de secado al calentarse directamente la cámara de secado pero el humo afecta la calidad

del secado al entrar en contacto con el grano. Los sistemas de fuego indirecto constan de una cámara de combustión con compuertas o sistemas de suministro del combustible. Además, con la ayuda de un intercambiador de calor para calentar el aire y en algunos casos tiene acoplados ciclones para evacuar los gases de combustión. Los principales combustibles utilizados son diésel, petróleo crudo, carbón mineral, cisco o pergamino del café, gas natural, etc.

2.5 EQUIPOS PARA SECADO MECÁNICO

A continuación se presenta una breve descripción de los principales equipos utilizados para secado mecánico de café pergamino a nivel industrial en Puerto Rico:

2.5.1 TIPO SILO

Los secadores tipo silo los podemos encontrar de varios tipos, pero los más utilizados en Puerto Rico son los de capa estática con inversión de flujo (Figura 5). Su principal atributo es que cuentan en el interior de su cámara de secado hasta con tres niveles de mallas para mejorar la homogeneidad del grano y la calidad del secado. También utilizadas para realizar una etapa de pre-secado del café. Los secadores tipo silo de capa estática, cuentan con un sistema de inversión de flujo del aire de secado para asegurar un secado uniforme del grano.

Otra ventaja que presentan estos equipos es que ocupan áreas pequeñas. En ocasiones, están adaptadas para utilizar el cisco del café como combustible. La descarga del grano seco se realiza por la parte inferior del equipo. Existe una variante del silo que es de forma cilíndrica y que tiene en su interior un brazo giratorio que mueve constantemente la masa de café para mejor homogeneidad de secado.



Figura 5. Secador tipo silo de capa estática con inversión de flujo. Fuente: www.ingesecltda.com

2.5.2 TIPO GUARDIOLA O BOMBO – SECADORES CILÍNDRICOS GIRATORIOS

El movimiento constante del tambor giratorio favorece las condiciones de uniformidad del secado de los granos en su interior trasladando esta bondad a la calidad del café pergamino secado en estos equipos (Figura 6). Debido a sus diseños modernos, el caudal de vapor se alimenta por la parte central del equipo, contribuyendo con el secado uniforme del grano (IICA, 2010). Su alto consumo de energía hace que su eficiencia del proceso sean cuestionados. Su uso en Puerto Rico es limitado.



Figura 6. Secador industrial Guardiola desmontable. Fuente: IICA - Guía técnica.

2.5.3 TIPO BATEAS

Los secadores tipo batea son muy utilizados en la industria cafetera puertorriqueña (Figura 7). Son de forma cilíndrica y cuentan con un brazo que mueva la masa de café. La dirección del flujo es en un solo sentido y descargan el aire húmedo al ambiente. Sus altos tiempos de secado y su ineficacia ocasiona que algunos dueños de beneficiado opten por secar a temperaturas extremadamente altas (70 a 90 °C), deteriorando la calidad del café (IICA, 2010).



Figura 7. Equipo de secado de café tipo Batea.

La gran mayoría de las bateas en Puerto Rico utilizan calentamiento directo, donde los gases de combustión son dirigidos a la masa de café. Los combustibles utilizados son el gas propano y el diésel. Al ser un sistema abierto, que se alimenta del aire del cuarto donde se encuentra instalada, éste tipo de secador es potencialmente más susceptible a los efectos de la humedad del aire.

2.6 PROPIEDADES FÍSICAS DEL CAFÉ PERGAMINO

Las propiedades físicas del café pergamino son importantes en el proceso de secado porque la migración de agua desde el interior del grano hacia la superficie, va a estar influenciada por la naturaleza de la capa de pergamino presente. Las tres propiedades principales para tener en cuenta durante el secado son:

2.6.1 DENSIDAD REAL (ρ_t).

Es la relación entre la masa y el volumen de un solo grano de café pergamino. Esta se puede determinar por el método de desplazamiento de un líquido. Para esto es recomendable utilizar un líquido que tenga una penetración mínima en los poros del grano de café pergamino. Moreira et al., (1985) determinó que el aceite de soya es el líquido más adecuado porque es fácil de obtener y económicamente accesible. El grano de café pergamino se sumerge en aceite de soya y el volumen desplazado de aceite corresponde al volumen del grano. El grano debe ser previamente pesado para tener su masa.

2.6.2 DENSIDAD APARENTE (ρ_b).

También conocida como peso hectolitro y se define como la relación entre una determinada masa de grano incluyendo los espacios vacíos y el volumen respectivo. Estas medidas se realizan con una balanza hectolítrica con capacidad de un litro.

2.6.3 POROSIDAD (ε).

Se define como la relación existente entre los volúmenes de los espacios vacíos en la masa granular del producto y el volumen total ocupado por esta masa granular. El valor de esta propiedad del café pergamino, puede ser determinada mediante la correlación de las densidades aparente y real. Para tal fin se usa la fórmula del método de Mohsenin (Ramírez-Martínez et al., 2010) :

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}\right) \times 100\% \quad (2.4)$$

Donde, ρ_b y ρ_t corresponden a densidades aparente y real en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y ε en %.

2.7 CAPAS Y ESTRUCTURA DEL GRANO DE CAFÉ PERGAMINO

Desde el punto de vista morfológico, es un fruto elipsoidal con dos lados curvos de un lado y plano por el otro. Es decir tiene una geometría elíptica u oval, planoconvexa, con una división en la superficie plana. El fruto se compone por un pericarpio que cubre el endospermo (semilla). El pericarpio se compone de un exocarpio (piel), mesocarpio (pulpa y tejido mucilaginoso), y un endocarpio (pergamino). La estructura del grano de café pergamino lo constituyen la capa de pergamino, el perispermo y el endospermo.

2.7.1 CAPA DE PERGAMINO

Es el endocarpio del fruto y es un tejido duro, el cual sirve de protección y soporte. Con paredes secundarias y lignificadas de 110 a 150 milimicras de espesor. Dentro de las funciones

específicas se cuentan: proteger el endospermo del ataque de enzimas y bacterias, actúa como una barrera física que limita la difusión de compuestos bioquímicos del pericarpio y actúa como una barrera aislante entre el medio ambiente y el endospermo.

2.7.2 CAPA DE PERISPERMO

También llamado tegumento o piel plata, su espesor es de aproximadamente 70 milimicras y está constituido por células de esclerénquima dispuestas longitudinalmente. Al principio de su desarrollo, sus células se encuentran unidas a las células del endospermo pero luego pierden su forma, lo que indica muerte celular, constituyendo una capa fina en el grano de café pergamino. El perispermo juega un papel importante en la transferencia de moléculas como ácidos orgánicos y azúcares. Por otro lado, durante el crecimiento del grano el perisperma es más verdoso, lo que sugiere que tiene función de traslado de moléculas al endospermo mediante difusión pasiva y transporte activo.

2.7.3 ENDOSPERMO

Es la parte del grano de café que después de los tratamientos post-cosecha se le denomina café verde. Después de la etapa de fertilización (130 a 190 días), las paredes de la células se van haciendo delgadas y están compuestas principalmente por polisacáridos de naturaleza solubles. Esta constitución, es la que determina la dureza característica del endospermo. En la madurez (230 días aproximadamente), las células toman formas poliédricas, las externas tienen formas poligonales y las internas formas rectangulares. Pero en realidad, las células del endospermo están divididas en dos regiones basadas en las características de las paredes de sus células. La primera

zona, que es la adyacente al perispermo, tiene células con paredes de diferente espesor y se pueden ver que tienen conexiones entre ellas y su eje orientado hacia el perispermo.

La segunda zona se encuentra situada en el centro del endospermo, en esta región las paredes de las células tienen un espesor más uniforme y sus ejes son paralelos al perispermo. Otro constituyente importante del endospermo es el embrión. Es muy pequeño, solo tiene de 3 a 4 mm de longitud. Se compone de un eje y dos cotiledones yuxtapuestos, que están situados cerca de la superficie convexa del grano de café (Ramírez-Martínez., et al 2010).

2.8 CALIDAD DEL CAFÉ PERGAMINO

La calidad del café pergamino se evalúa en función de las características físicas del grano pergamino, las características físicas del café verde y a las características organolépticas de la tasa de café. El principal atributo de calidad del grano pergamino es su contenido de humedad, que debe estar entre 10 a 12%. Además, se debe evaluar de acuerdo a los siguientes defectos (Castañeda Parraga, 2004):

1. Granos pelados. Son los granos que les hacen falta la mitad o más de la mitad del pergamino (endocarpio).
2. Granos Bola o media cara. Son los granos que se encuentran parcial o totalmente cubiertos por cáscara de cereza, pegada al grano (seca).
3. Impurezas. Es el cisco y lo constituyen mayoritariamente cáscaras de cerezas y granos pergamino vanos.
4. Material extraño. Son todos aquellos materiales que no tienen relación con el grano de café pergamino, por ejemplo palos, piedras, semillas de otros cereales.

Para la evaluación del grano verde (seco sin pergamino), se deben tener en cuenta los principales defectos. Estos tienen sus causas asociadas al proceso de secado cuando éste presenta deficiencias o no es el adecuado, en cuanto a los malos usos de las variables que intervienen (Fedecafé, 2004):

1. Grano parcial o totalmente negro: Son granos con coloración desde pardo a negro. Son encogidos, arrugados con cara plana hundida y hendidura muy abierta. Las causas pueden ser granos cereza muy madurados, fermentaciones prolongadas, malos procesos de secado, o granos rehumedecidos.
2. Grano Cardenillo: Son los granos atacados por hongos, cubiertos de polvillo amarillo o rojizo. Las causas son fermentaciones prolongadas, interrupciones largas durante el secado, y almacenamiento húmedo del producto.
3. Grano parcial o totalmente vinagre: Granos con coloración de crema a caramelo y hendidura libre de tegumento. Las causas son asociadas a demora en recolección o despulpado, fermentaciones prolongadas, usos de aguas contaminadas, sobrecalentamientos en secado, o almacenamiento húmedo.
4. Grano cristalizado. Grano de color gris azulado, frágil y quebradizo. La causa es la utilización de temperaturas de secado por encima de 50°C.
5. Grano decolorado o sobre secado: Granos de color ámbar o ligeramente amarillentos. La causa es un prolongado tiempo de secado.
6. Grano Flojo: Grano de color gris oscuro y consistencia blanda. La causa es un secado deficiente.

Además de los anteriores, se tienen en cuenta defectos que no están asociados al proceso de secado como: granos ámbar o mantequilla, grano mordido o cortado, grano picado por insectos, grano veraneado o arrugado, grano verde o paloteado, grano aplastado.

2.9 PSICOMETRÍA DEL AIRE.

La psicrometría estudia las propiedades termodinámicas de las mezclas de gas con agua. En la mayoría de los casos se refiere al aire húmedo como la mezcla de aire seco y vapor de agua. Resulta importante estudiar y controlar el vapor de agua en el aire cuando se aplica en procesos industriales, como por ejemplo en el secado de café pergamino y su almacenamiento. El aire ambiental es una mezcla de varios gases (oxígeno y nitrógeno mayoritariamente) a la que normalmente se llama aire seco pero con un cierto contenido de agua en forma de vapor. En termodinámica, tanto el aire seco como el vapor de agua se considera que se comportan como gases ideales. También se considera que el aire seco se comporta como un componente puro, por tal razón se pueden estudiar las propiedades del aire ambiental (húmedo) con base en las propiedades de mezclas de gases ideales, regidas principalmente por la ley de las presiones parciales, enunciada por Dalton.

Estudiando las propiedades del aire seco y el vapor de agua, tales como masa molar, calor específico, entalpía específica, densidad y volumen específico, se pueden determinar sus respectivos valores para cada uno. Por tal razón, también se podrán estudiar las propiedades y determinar sus valores para el aire húmedo. El cual es una mezcla binaria que a presiones inferiores de 3 atm, se comporta como una mezcla de gases ideales, pero los valores de sus propiedades van a depender de su cantidad de vapor de agua.

Es así como en el aire, el vapor de agua presenta una presión parcial pequeña, entonces el aire estará saturado de vapor de agua cuando, a una temperatura dada su presión parcial sea igual a su presión de saturación (P_s), a esa temperatura. De la misma manera, el aire estará saturado cuando a una presión parcial (P_v) cualquiera, su temperatura sea igual a su temperatura de saturación a dicha presión. A esa temperatura se le llama temperatura o punto de rocío (T_r), porque representa la temperatura a la que se condensa el vapor de agua. Por tal razón, la humedad en el aire va a depender de la diferencia entre la temperatura del aire y su T_r . A una temperatura dada, la temperatura de rocío será menor cuanto menos húmedo este el aire. En contraste, cuando el aire está cerca de su saturación, su temperatura y la de rocío serán casi la misma (Singh, 2009).

2.9.1 INDICES DE HUMEDAD

Se denominan índices de humedad a las diferentes expresiones para cuantificar o expresar la cantidad de vapor de agua presente en el aire húmedo. Para nuestro estudio utilizaremos:

2.9.1.1 Humedad Relativa (HR)

Es la relación existente entre la presión parcial de vapor de agua y la presión de saturación del vapor de agua, a la misma temperatura de bulbo seco del aire.

$$HR = \frac{p_v}{p_s} \times 100\% \quad (2.1)$$

Entonces, cuando la presión parcial de vapor es igual a la presión de saturación se obtiene un 100% de humedad. En la medida que la humedad relativa se aleje del 100%, el aire estará más seco. Como se sabe que la presión de saturación aumenta con la temperatura, la humedad relativa

disminuirá en la misma proporción. Lo que es igual, a cuando la temperatura del aire sea mayor el aire va a tener una humedad relativa menor, así tenga la misma cantidad de vapor de agua. Al contrario, cuando mayor sea la temperatura más difícilmente se producirá la saturación.

2.9.1.2 Humedad Específica (HS)

La humedad específica es una relación de humedad que algunas veces es también llamada contenido de humedad. Es definida como la relación de la masa del vapor de agua por unidad de masa de aire seco. Las unidades comúnmente utilizadas son kg agua/kg aire seco.

$$HS = \frac{m_{agua}}{m_{aire\ seco}} \quad (2.2)$$

En el diagrama psicométrico su escala de valores la podemos ubicar en el margen vertical derecho y los valores van desde 0.00 a 0.033 en las unidades antes mencionadas. La humedad específica también puede ser expresada en términos de las fracciones molares y a través de estas, en términos de sus presiones parciales (Singh, 2009).

$$HS = 0.622 \frac{P_{agua}}{P_{aire\ seco}} = 0.622 \frac{P_{agua}}{P_{total} - P_{agua}} \quad (2.3)$$

Donde, P_{total} = presión barométrica o presión total del aire húmedo, en kPa.

2.9.1.3 Instrumentos de Medición

El higrómetro es el instrumento utilizado para medir la humedad relativa del aire y se utilizan de acuerdo al objetivo de la medición. Los principales modelos de higrómetros son:

1. Tipo Psicrómetro. Específico para la humedad atmosférica.
2. De condensación. Específico para humedad atmosférica.
3. De absorción. Específico para condiciones climáticas y utiliza sustancias químicas.
4. Digitales. Tecnología de avanzada usada en laboratorios, medicina y demás campos. Realiza mediciones en décimas de grados y permite guardar en la memoria los datos medidos.
5. Electrónicos. Los cuales se les denomina termo-higrómetros, porque también se usan para medir temperaturas. Son los utilizados en la presente investigación. Está compuesto por un medidor conectado a una sonda de capacitancia con un polímero o un material dieléctrico plástico, con una constante dieléctrica fija entre 2 a 15. La humedad hace que el dieléctrico se dilate, distanciando así las placas con una consecuente variación de la geometría de la sonda y la reducción de su capacitancia. Estas variaciones de capacitancia, a su vez, causan una modulación de frecuencia en función de la humedad relativa. La frecuencia se convierte entonces en voltaje, que se convierte en un valor de humedad relativa y se observa en una pantalla (Equipos y Laboratorios de Colombia, 2013).

CAPÍTULO 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se abordará una revisión de las principales variables involucradas en el proceso de secado de café pergamino referente a la presente investigación que son: temperatura, humedad relativa, flujo o caudal del aire, inversión de flujo del aire de secado y calidad del grano. De igual manera, se complementará con una revisión de los estudios tomados de base para realizar la investigación, los cuales cubren los elementos teóricos en los que se fundamenta la actual tesis. Los artículos son de reconocidos autores sobre el secado de café pergamino a nivel mundial, pero que sirven de base para aplicar los resultados de la investigación en la industria cafetalera puertorriqueña.

3.1. TEMPERATURA DEL AIRE DE SECADO (TS)

La temperatura es la medida de la energía térmica de una sustancia. Para su medición se utilizan los termómetros y sus unidades tienen diferentes escalas de medición. Para el caso de esta investigación su medición se realizó con los mismos sensores utilizados para medir las HR, ya que ellos cumplen las dos funciones. Las unidades reportadas y utilizadas en la presente investigación fueron grados Celsius (°C).

La temperatura del aire de secado es considerada el parámetro de mayor flexibilidad en el secado y tiene influencia directa en la razón y en la eficiencia del secado, así como en la calidad final del producto. La temperatura óptima y recomendada para el secado de café pergamino es 50°C. (Roa, 1999). La utilización de temperaturas inferiores durante el secado, generan problemas de sobrecostos por aumentar los tiempos de proceso. En cuanto a la calidad del grano, se pueden

presentar secados deficientes, pérdidas de sabores y contribuir a la proliferación de ciertos hongos y mohos durante el almacenamiento.

Al contrario, cuando se utilizan temperaturas superiores pueden causar endurecimientos en la superficie de los granos, evitando o demorando la salida de la humedad. Lo que se relaciona con un mayor consumo de combustible o energía necesaria para el proceso. En cuanto a los efectos en la calidad del grano, se presentan daños en la apariencia, pérdida de peso por sobrecalentamiento. Además, la expulsión de ácidos grasos por ruptura del embrión, produce sabores amargos en la bebida. Al aumentar la temperatura de secado se produce un aumento en la razón de secado (Puerta Quintero, 1999).

Orozco et al.,(2007) desarrollaron un modelo termodinámico para determinar el flujo másico de aire y el caudal que debe suministrar un ventilador en el secado de café pergamino, con un porcentaje contenido de humedad entre 48 a 55%, para reducirlo hasta un rango entre 10 a 12% y utilizando temperaturas de secado entre 45 y 55°C. Aunque el estudio se centra en determinaciones del flujo másico y el caudal de aire usado para secar café pergamino, es de importancia la recomendación respecto a las temperaturas de secado, las cuales coinciden con las utilizadas en esta investigación.

Hernández-Díaz et al., (2008), también han estudiado el fenómeno de la transferencia de calor y masa durante el proceso de secado de granos de café. Para lo cual proponen un modelo de transferencia de calor y masa utilizando coordenadas esferoidales prolatos (achatadas) con la ayuda del método de la pendiente. De esa forma determinan la difusión media efectiva del agua dentro del grano en función principalmente de la temperatura. A pesar de ser con café verde, el fenómeno tiene similitud con el secado del café pergamino y sobre todo que las temperaturas

usadas fueron entre 45 a 60°C; temperaturas recomendadas normalmente para secado de café pergamino.

Las propiedades aerodinámicas sobre las formas del grano de café también fueron estudiadas por Afonso et al., (2007). Para el estudio, se utilizaron las siguientes condiciones: flujo de aire 13 m³/min.m², temperatura de secado de 40°C y humedad relativa de 50%. Estudiaron dos variedades de café tipo cereza. Determinaron que a mayor contenido de humedad, mayor será la densidad y el volumen del grano de café y por consiguiente se ven más afectadas las propiedades aerodinámicas. En los resultados se evidenciaron aumentos en la velocidad y una reducción en sus coeficientes de arrastre. Lo que interesa a esta investigación, es el hecho de que, aunque no se estudió el coeficiente de arrastre, si es un factor que se influenció por el efecto de las tres diferentes temperaturas usadas para determinar los tiempos de secado y los consumos de energía. De ese estudio se puede inferir que la temperatura en el aire de secado afecta las propiedades del grano y se presentará un efecto en los tiempos de secado del café.

Berbert et al., (1994) presentaron un estudio que tuvo como objetivo desarrollar un modelo matemático, basado en el modelo original de Thompson. Usaron la simulación de un secado de café con la inversión del flujo de aire en una capa fija para luego verificar la exactitud comparando los valores predichos contra los obtenidos experimentalmente por otros autores. Se realizaron simulaciones usando tres temperaturas de secado 50, 60 y 70°C, y tres diferentes niveles de intervalos de tiempo de inversión de aire: 3, 4 y 6 horas. Usaron una razón de flujo de 15 m³/min.m² y una capa de grano de 0.90 m de espesor. Los autores determinaron que la inversión de la dirección del flujo de aire a bajas temperaturas de secado presenta como resultado altos índices de uniformidad en la humedad final de la capa del grano. Por ejemplo, la variación mínima en el

contenido de humedad fue obtenida cuando se invirtieron las direcciones de flujo cada 3 y 6 horas a 50°C.

Al final del proceso de secado toda la capa de grano tiene un contenido de humedad entre 0.140 y 0.158 b.s. Para la temperatura de 50°C, al invertir el flujo cada 3, 4 y 6 horas, dió como resultados aumentos de energía específica consumida. Los resultados anteriores son comparados con el método convencional de secado con una sola dirección de aire. Además, se observó una reducción de 72% en la diferencia del contenido de humedad final cuando el flujo fue invertido cada 3 horas a 50°C, comparado con el método de secado de una sola dirección. Lo importante de este estudio para la presente investigación es que a medida que se usa una menor temperatura se espera un incremento en el consumo de energía durante el proceso de secado. Por otro lado, el estudio deja ver la preocupación de los efectos en la calidad del grano secado cuando se realiza con aire de secado a 70°C.

Otro importante aporte al respecto por Berbert et al., (1994) es que, mediante la utilización de dos niveles de temperatura de secado 50 y 70°C, y un flujo de aire de 15 m³/min.m²; valores generalmente usados en secado de café en capa fija. El estudio estuvo enfocado en encontrar el conjunto de las condiciones de secado para obtener una reducción en el gradiente de humedad a través de la profundidad de la capa de grano. Sin embargo, las diferencias en los contenidos de humedad en los diferentes depósitos utilizados no presentaron diferencias significativas, pero el estudio determinó que las temperaturas altas (70°C) reducen las diferencias de humedad en la capa de grano por aproximadamente 50%. Esta poca desigualdad puede afectar la calidad del café después del tostado. Por otro lado, el estudio confirma que las bajas temperaturas de secado (50°C) son consideradas más adecuadas para secado en módulos de capa fija con inversión de flujo en

intervalos de 3 y 6 horas. Los periodos de inversión de aire también ayudan a prevenir daño por acumulación de condensación en la parte superior de la capa de grano.

Parra-Coronado et al., (2008) validó los modelos de simulación matemática (modelos de Thompson y MSU) para los diferentes secadores de café existentes en Colombia y pudo determinar las mejores condiciones de operar los secadores con base en las condiciones específicas para cada proceso de secado. Con lo anterior pudo determinar el tiempo de secado, el tiempo de inversión del flujo de aire, la capacidad dinámica del secador y la eficiencia térmica global estimada con el fin de obtener café pergamino seco con contenidos de humedad entre 10 a 12%.

En la segunda parte de este estudio se determinaron las condiciones y recomendaciones para la operación eficiente de los secadores de café tipo pergamino. Con respecto a la temperatura del aire de secado para el estudio debe ser 50°C, la que posteriormente varía a 40°C. También indica, que los tiempos de secado logrados son para la primera temperatura de 17 a 20 horas y para la segunda de 23 a 32 horas. Es decir, que se aumenta la variación en los tiempos de secado al utilizar la temperatura más baja. Otras condiciones del experimento fueron: contenido de humedad inicial del grano fue 55% b.h., contenido de humedad promedio final de secado 11% b.h., temperatura inicial del café 21.0°C y capas de grano entre 0.4 a 0.1 m.

Queiroz et al., (2001) implementaron un programa en Visual Basic 6.0 utilizando el modelo de Thompson, el cual inicialmente se desarrolló en el año 1968 aplicado al secado de maíz. El objetivo fue simular un proceso de secado para café tipo pergamino en un lecho fijo pero utilizando diferentes flujos de aire para observar los efectos en la calidad final. La principal preocupación del productor de café es la calidad final, pero ésta se ve afectada por factores como el método de

secado, la temperatura del aire de secado, la humedad relativa del ambiente, la uniformidad del secado en la capa de grano y el tiempo de secado.

Otro factor de preocupación es el consumo de energía para retirar el contenido de humedad hasta el cual se debe almacenar el grano. Por ser tan complejos el diseño y el análisis de la calidad, así como el consumo de energía, es necesario utilizar modelos matemáticos. Estos ayudan a predecir el contenido de humedad en equilibrio, el calor de vaporización, el calor específico y el efecto de estos en la capa de grano. Por ejemplo, secado en lechos fijos, donde se pueden definir condiciones del proceso e inclusive cambios en valores de humedad relativa y recirculación de aire de secado. Lo relevante del mismo estudio fue que utilizó temperaturas de 45, 50 y 60°C. Las anteriores temperaturas respaldan la elección de las tres utilizadas para ver el efecto de ellas combinadas con las humedades relativas sobre el tiempo de secado y sus consumos.

Bennamoun et al., (2003) diseñaron y estudiaron el desempeño de un pequeño secador solar, para productos agrícolas (cebollas). Las máximas utilidades se aplicaron cuando hubo deficiencias de calor solar, porque el equipo tiene acoplado una pequeña unidad de calentamiento para el aire. Establecieron los balances de masas y calor para el equipo durante el proceso de secado. Los resultados demostraron que el secado de productos se ve afectado por la temperatura del aire, las características del producto, pero también se presenta un efecto directo sobre la capa superior del producto.

Básicamente, se estudiaron dos estados para el secado del equipo: cuando la temperatura que entrega el colector de calor es 50°C y cuando la temperatura que entrega el colector es menor de 50°C, siendo necesario utilizar la unidad calefactora para lograr la temperatura deseada. Los autores recalcan que el producto secado se afecta esencialmente por la temperatura y por la

proximidad con la superficie del equipo. El aumento de temperatura por encima de 50°C reduce considerablemente el tiempo de secado, pero afecta la calidad. Es de gran importancia el estudio porque recalca la importancia principal de la temperatura en el proceso de secado.

3.2. HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DE SECADO

En la investigación, resulta de gran importancia el estudio de esta variable porque a diferencia de la temperatura de secado, no se ha profundizado sobre sus efectos en el proceso de secado de café pergamino. Mucho menos, se ha profundizado sobre la influencia del contenido de humedad en el aire de secado y tampoco en los procesos de secado de café pergamino bajo las condiciones climatológicas de Puerto Rico.

Correa et al., (2001) demostraron la importancia del contenido de humedad del grano para ayudar a determinar las condiciones de secado y almacenamiento. Esta condición se ve definida a partir de un eficiente proceso de secado. Durante el proceso de almacenamiento, las presiones de vapor dentro del grano así como las de alrededor de estos tienden a equilibrarse. El contenido de humedad del grano tiene un efecto directo en el proceso de respiración de este. También, la humedad relativa del aire tiene efecto sobre la manera como se desarrolla el proceso de respiración en el grano. En el estudio, construyeron curvas de adsorción, mediante el desarrollo de un modelo matemático que simuló el proceso de secado.

El estudio, principalmente para café tipo pergamino, usó temperaturas de 30, 40, 50 y 60°C y humedades relativas de 30, 40, 50 y 60%. El estudio concluyó que el equilibrio del contenido de humedad se puede predecir en función de la humedad relativa con la ayuda de unas ecuaciones

combinadas. Siendo importante este hecho porque la respiración del grano depende de su contenido de humedad como también de la humedad relativa circundante.

El equilibrio del contenido de humedad es importante a la hora de secar café tipo pergamino. Afonso et al., (2001) obtuvieron curvas de secado para capas de grano delgadas usando una unidad acondicionadora de aire de secado (AMINCO-AIRE). Usaron temperaturas de 30, 40, 50 y 60°C, y humedades relativas de 30, 40, 50 y 60%. El flujo de aire utilizado para atravesar la capa de grano fue $0.22 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$. Usando la ecuación de Page se ordenaron los datos para determinar las ecuaciones. Luego se obtuvieron los equilibrios de los contenidos de humedad.

Lo anterior se determinó para varias clases de café pero especialmente para café pergamino. Al final, la comparación entre los valores calculados y experimentales de las razones de humedad mostradas por las ecuaciones de Page, presentan buenos resultados cuando se predicen las curvas de secado. El estudio señala que se monitoreó el contenido de humedad del grano mediante el método del horno hasta que las muestras llegaran a un peso constante. No se menciona la frecuencia del muestreo pero al ver la cantidad de puntos en las gráficas se infiere que por lo menos fueron reportadas cada hora.

Lo importante para esta investigación son los comportamientos de las curvas de las temperaturas y humedades relativas usadas, donde se observan los tiempos gastados para cada una. Es importante el comportamiento de las curvas a medida que disminuyen las humedades relativas porque vemos marcado el aumento en el tiempo de secado. A pesar de ser un estudio basado en un modelo y de usar humedades relativas altas (40, 50 y 60%), que no son comunes en el ambiente, el estudio nos permite ver el efecto de la humedad relativa sobre el tiempo de secado. En la

presente investigación, se utilizaron humedades relativas menores de 40%, valores que están dentro de los rangos del aire ambiental de Puerto Rico.

Correa *et al.*, (2006) realizaron un trabajo para verificar el efecto de la temperatura en el proceso de secado de café cereza y determinar un coeficiente de difusión de humedad durante su procesamiento bajo diferentes condiciones de aire de secado. El coeficiente de difusión fue determinado a través de una solución analítica de acuerdo a la segunda ley de Fick. En este estudio también podemos observar las razones de humedad a medida que pasa el tiempo bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa. Los coeficientes de difusión efectivos encontrados para el grano de café fueron: 2.91×10^{10} , 3.57×10^{10} y $4.96 \times 10^{10} \text{ m s}^{-1}$ para temperaturas del aire de secado de 40, 50 y 60°C, respectivamente.

Para Gautz *et al.*, (2006) el secado mecánico con aire forzado calentado mediante el quemado de un combustible, es lo más utilizado en el proceso de secado de café pergamino. El mayor gasto generado por el proceso de secado es el valor del combustible para obtener el aire seco. Además es la opción más común entre los pequeños procesadores. En el desarrollo de su trabajo propusieron deshumidificar el aire de secado usando una bomba de calentamiento mecánico para lograr altos niveles de calidad en el café. El secado se debe efectuar tan pronto se cosecha el grano, para evitar deterioro por reacciones enzimáticas y presencia de microorganismos.

A pesar del alto costo de implementación del sistema, comparada con los costos de producir energía por otras formas, puede ser menor cuando el agua retirada se puede recircular en el sistema como vapor de agua. También concluyeron que el sistema sólo consume una cuarta parte de la energía usualmente utilizada cuando quema propano. Para optimizar su uso y obtener mayor eficiencia, dado que se puede aprovechar el vapor mediante recirculación, se pueden secar varias

capas al mismo tiempo. Del estudio se deduce, que al secar (deshumidificar) el aire de secado la presencia de la humedad relativa disminuye, por tal razón los tiempos de secado van a disminuir considerablemente, así como el consumo de combustibles y por tal motivo se conseguirán ahorros económicos en el proceso.

3.3. FLUJO DE AIRE DE SECADO

Uno de los factores más importantes a considerar durante el diseño e implementación de sistemas de secado mecánico para granos de café es la resistencia del flujo de aire a través de la capa de grano. La resistencia al flujo de aire está relacionada a la caída de presión en los sistemas de secado mecánico y depende de muchos factores como el contenido de humedad del grano, el flujo volumétrico de aire, la profundidad de la capa de grano, la forma del grano y su densidad. Agullo y Marenia (2005), estudiaron los factores que afectan la resistencia del flujo de aire en el volumen de café pergamino de la variedad Arábica y caracterizó la resistencia usando los modelos de Shedd, Hukill-Ives y uno empírico usando variables experimentales.

El estudio concluyó que la resistencia al flujo de aire es directamente proporcional al tamaño de la capa de grano y al flujo volumétrico de aire, pero también directamente proporcional al contenido de humedad. La cantidad de flujo de aire tiene un gran efecto en la caída de presión, seguida por el contenido de humedad y la densidad del grano. La importancia de esto en esta investigación, representa el hecho que el flujo va a ser constante, se comienza con una capa fija de grano y sólo se monitorea el contenido de humedad a través del tiempo.

Parra-Coronado et al., (2008), en la segunda parte de su estudio determina condiciones y recomendaciones para el trabajo eficiente de los secadores de café tipo pergamino. Con respecto

al caudal de aire de secado utilizado, fue de 10 a 40 $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^2$. Posteriormente, durante los ensayos, fue incrementándolos de 5 $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^2$.

Los caudales mínimos recomendados por CENICAFÉ (Roa et.al., 1999) para secado del café pergamino en capas estáticas es de 25 m^3/min por metro cúbico de café pergamino ó 66 m^3/min por tonelada de café pergamino seco. Aunque además hacen recomendaciones de caudales por área expuesta al secado (20 $\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$ para capas de 0.80 metros y 10 $\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$ para capas de 0.40 metros) indican que es preferible utilizar los valores por volumen ocupado por el grano o por tonelada de café pergamino seco.

3.4. INVERSIÓN DE FLUJO DE AIRE DE SECADO

Esta variable es de gran importancia en el secado de café pergamino, aunque en la presente investigación no se contempló su estudio. Se considera su análisis porque su efecto es directo sobre la calidad del café y por tener el equipo construido, la capacidad de invertir el flujo de aire de secado.

Boyce, (1967), investigó si el secado de café pergamino puede ser desarrollado en capas estáticas sin mezclado durante el secado. Encontró que el altísimo gradiente de humedad final puede ser tolerado sólo si al final del secado todo el contenido de la cama es mezclado. Esto es debido a que los altos y bajos contenidos de humedad de los granos igualan rápidamente sus contenidos de humedad. Determinó que la energía requerida para operar el ventilador, por libra de agua evaporada, permanecerá relativamente constante. Como sería de esperarse, si la razón de secado es alta, el tiempo total del secado se vería reducido, lo que representaría una ligera reducción en el consumo energético del ventilador.

La capa de grano que utilizó para el experimento fue de 12 pulgadas y café tipo pergamino inicialmente con 58% de contenido de humedad. Lo anterior es de importancia en el estudio, porque no se utilizó la inversión de flujo a pesar de contar el equipo con esa condición, el contenido de humedad del grano se pudo controlar y minimizar el gradiente del contenido de humedad en la muestra final de café. Lo anterior se verificó, realizando mediciones de % de contenido de humedad en diferentes puntos de la capa de grano (fondo, medio y superficie).

Orozco et al., (2007) desarrollaron un modelo termodinámico para determinar el flujo másico de aire y el caudal que debe suministrar un ventilador en el secado de café pergamino, con contenido de humedad entre 48 a 55%, para reducirlo hasta un rango entre 10 a 12% y utilizando temperaturas de secado entre 45 y 55°C. Utilizando las anteriores condiciones se conocieron temperaturas de aire y agua, para la entrada y la salida. Luego se estimaron valores de C_p para el agua 1,872 kJ/kg °K, entalpía de vaporización, h_{fg} 2,442.3 kJ/kg y de igual manera un C_p del aire de secado 1,005 kJ/kg °K. Con la ayuda de estos datos, se expresó el flujo másico en función de la masa de café a secar y la eficiencia del secado.

Al final se obtuvieron valores que fueron tabulados. Por ejemplo, para secar una masa de café de 1,250 kg es necesario un flujo másico de aire 0.70 kg/seg y un caudal de aire normal de 0.583 m³/seg, para secarlo en un periodo de 24 horas, siendo la eficiencia del ventilador del 100%. El estudio recomienda un esquema de una instalación típica de secado. Además, se determinaron los poderes caloríficos para diferentes combustibles usados para poder hacer los estimados de consumo de combustible y calcular el flujo así como el caudal necesarios.

Berbert et al., (1994), presentaron un estudio que demuestra las bondades de someter el grano secado en capa estática a la inversiones periódicas de flujo. Se puede observar que el efecto

de invertir el flujo de aire de secado mejora el índice de uniformidad del contenido de humedad final de la masa de grano secada, lo cual mejora la calidad del grano. El estudio también afirma, que a una misma temperatura de secado el consumo de energía disminuye a medida que se aumentan los intervalos de inversión del flujo de aire.

López Fontal (2006) plantea que los secadores de tipo estático para secar café pergamino presentan problemas de uniformidad en el contenido de humedad final del grano, donde se pueden encontrar niveles de humedad finales entre 6 a 15 %. En su investigación se desarrolló una alternativa de secado mediante la fluidización, que consiste en convertir un lecho de partículas sólidas en un flujo de partículas suspendidas y expandidas que presentan muchas de las características de un líquido, utilizando tres temperaturas diferentes 42, 46 y 49 °C contra 26, 21 y 19 % de humedad relativa.

Al secar de 55 a 12% de contenido de humedad fue la variable de medición. Utilizó una capa estática de 15cm. Los tiempos estuvieron por 7 horas para el mejor proceso (temperatura alta y humedad relativa baja) y 8 horas para el más lento. Al graficar los resultados se obtuvieron curvas típicas del secado de café pergamino. Lo importante de los resultados es que los tratamientos tuvieron gradientes máximos menores de 1% y coeficientes de variación menores del 3% en el contenido de humedad del grano secado.

3.5. CALIDAD DEL CAFÉ PERGAMINO

La calidad del café pergamino es un conjunto de atributos que se pueden calificar de acuerdo a sus cualidades o defectos. Estos, dependen en mayor o menor medida de las variables que intervienen en el proceso de secado. La calidad es importante en esta investigación, porque se

realizaron evaluaciones sensoriales a los granos de café pergamino obtenidos de las pruebas bajo estudio.

Borem *et al.*, (2008) propusieron demostrar que el secado de café pergamino a temperaturas entre 40 y 60°C no representan peligro alguno de deterioro por daño en la ruptura de la membrana plasmática. Para los experimentos utilizaron temperaturas de secado de 40, 50 y 60°C con un flujo de aire de 0.33 m³/min.m². Para los granos secados a 60°C, mediante microscopía de transmisión electrónica se observaron cuerpos oleosos fusionados en el endospermo que dieron lugar a grandes gotas alojadas en los espacios entre las células, indicando una ruptura de las vesículas y la membrana del plasma. Para los mismos granos, pero con microscopía electrónica de barrido, se observó ruptura de las células al encontrarse ocluidos los espacios entre ellas, lo que indica que hubo una fuga de protoplasma.

En cambio, para los granos secados a 40 y 50°C no se observó ningún cambio en la integridad de la membrana plasmática y sus vesículas. El contenido celular interno se encontró intacto y lleno de material celular. Además, el espacio entre la membrana plasmática y la pared celular estaba vacío. Lo anterior evidencia que temperaturas de secado por encima de 50°C van a afectar la calidad del café pergamino. Además hay presencia de sustancias indeseables como ácidos grasos, en la superficie del grano.

Respecto a la posibilidad de preservar la calidad y presentar alternativas en cuanto al ahorro de energía es de interés el aporte de Guimaraes *et al.*, (1998), quienes proponen un método combinado de altas temperaturas y secado con aire natural en dos fases. Para café despulpado, se bajó el contenido de humedad desde 53 – 65% hasta 14%, con una razón de flujo de aire de 8 m³/min.m². En la primera etapa del secado se utilizó un sistema de calentamiento para alcanzar

temperatura de 50°C, con el propósito de reducir el porcentaje de humedad hasta aproximadamente 26%. En la segunda etapa del secado se utilizó aire natural (sin calefacción) para bajar el contenido de humedad hasta 14%.

En el estudio se determinaron curvas de secado para el café en la capa de grano. Estas fueron producto del comportamiento a través del tiempo versus temperatura y tiempo versus presión estática a todo lo profundo de la capa de grano. La combinación de las dos alternativas ayuda a mejorar la calidad del café secado. Esta depende del diseño del sistema, la profundidad de la capa y la efectiva operación del ventilador de secado. También, se puede asegurar que al combinar los dos sistemas se ahorra energía considerablemente. Definitivamente, los resultados indican que es posible reducir humedad desde 26% hasta 14% con aire natural sin suplemento calórico. Por el contrario, se asegura que tratar de reducir humedad por arriba de 26% con aire natural, no es recomendable porque presenta riesgos para la calidad final del café.

3.6. DIFERENCIAS DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA

Según los objetivos propuestos en la investigación, ésta consistió en estudiar el efecto de las condiciones ambientales (temperatura y la humedad del aire) sobre los tiempos de secado, el consumo de energía y la calidad del café pergamino secado en esas condiciones. La investigación realizada se distingue porque el parámetro de humedad específica del aire de secado fue controlado de acuerdo con la temperatura ambiental y a la humedad real en Puerto Rico durante la época de cosecha. Las referencias al efecto de la humedad de aire encontradas en la literatura son de carácter circunstancial (la humedad del momento que se realizó el estudio) o de simulación matemática. Algunos autores han utilizado niveles altos de humedad relativa en sus simulaciones los cuales no

concuerdan con las obtenidas en la zona cafetalera. Los resultados de ésta investigación son resultado de una medición directa y no basados en modelos matemáticos.

Con el secador construido se logró monitorear continuamente el contenido de humedad del grano de acuerdo a su pérdida de peso. Todos los experimentos se llevaron a cabo por 36 horas, sin necesidad de suspender o de tener que extraer parte de la muestra bajo proceso para medir el contenido de humedad. Esta característica del secador, permite minimizar el error por cambios de las condiciones en la muestra asociadas con abrir la cámara o con la manipulación de la misma. También se logró, que el flujo de aire de secado estuviera trabajando durante las 36 horas de proceso bajo las temperaturas y humedades específicas requeridas para los experimentos con variaciones dentro del error de los instrumentos utilizados. Para tales fines, se logró obtener niveles de humidificación en el flujo de aire de secado y su registro a lo largo del proceso.

La aportación de la investigación fue encaminada a medir el efecto de las condiciones ambientales sobre los tiempos de secado y los gastos por consumo energético con el fin de desarrollar en el futuro un sistema de control que minimice su efecto sin afectar la calidad del grano. Estas variables inciden directamente en la parte económica del beneficiado de café y pueden a ayudar a mejorar el procesamiento del café y a la reactivación de la industria cafetalera.

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para la realización de la investigación fue necesario el diseño, construcción y validación de un secador que fuera capaz de:

1. Registrar y reportar la variación (disminución) del contenido de humedad de la muestra sometida a secado en función de la pérdida (disminución) de su masa.
2. Lograr lo anterior, sin necesidad de parar el proceso, abrir el equipo o retirar porciones de la muestra sometida a secado, para realizar análisis.
3. Lograr niveles de temperaturas de secado (TS) del orden de 45, 50 y 55°C, así como niveles de humedad específica (HS) en el aire de secado con valores de 0.014, 0.018 y 0.022 kg de agua/kg de aire seco.
4. Mantener, TS dentro de un rango de variación de ± 0.5 °C y HS dentro de un rango de variación de ± 0.0005 kg agua/kg aire seco.
5. Permitir la inversión del flujo del aire de secado en cualquier momento del proceso.

En la Figura 8 se muestra el secador construido y su cámara interior. La construcción se realizó en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Agrícola y Biosistemas del Recinto Universitario de Mayagüez. Una vez finalizada su construcción, se instaló en las facilidades del Laboratorio de Empaque del Departamento. El manual de operación del equipo está contenido en el Apéndice A.



(A)



(B)

Figura 8. Secador de laboratorio utilizado para los experimentos (A) y su cámara interior (B).

4.1 SECADOR Y SUS COMPONENTES

La Figura 9 presenta un esquemático de los componentes principales del secador tipo laboratorio que se construyó.

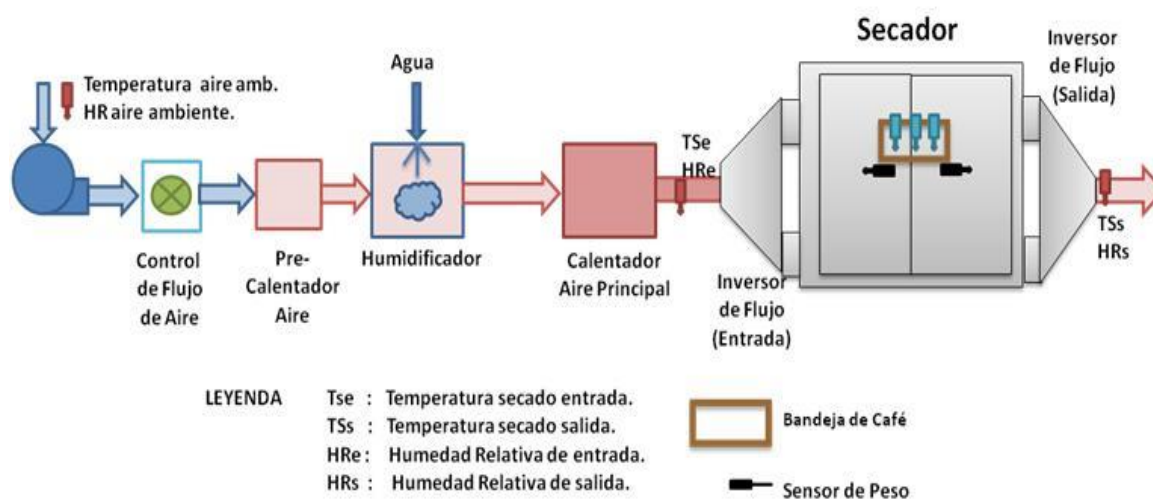


Figura 9. Esquemático de los componentes principales del secador de laboratorio utilizado en el experimento.

La estructura del secador es metálica y la cámara de secado está recubierta con espuma aislante de 2.54 cm de espesor al igual que toda la tubería externa. A continuación se describen los sistemas principales del secador utilizado en la investigación.

4.1.1 GENERACIÓN Y CONTROL DE FLUJO

Está compuesto por un ventilador (Fantech, modelo FR100), ensamblado a una tubería flexible de aluminio de 4 pulgadas de diámetro con un sistema de control que permite regular la cantidad de flujo de aire hacia el secador.

4.1.2 CALENTAMIENTO DEL AIRE

Consta de un conjunto de resistencias eléctricas (Vulcan, 350 watts), controladas por potenciómetros (Dart Controls inc., Series 55AC), para calentar el aire que es dirigido al secador. Se utiliza una resistencia eléctrica para obtener la temperatura del aire que es estudiada (Calentador de aire 1). El calentador principal cuenta con una resistencia de igual capacidad para alcanzar la temperatura de secado (Calentador de aire 2).

4.1.3 HUMIDIFICACIÓN DE AIRE

Se utiliza una tubería vertical de Cloruro de Polivinilo (p.v.c), en la cual se instalaron un par de boquillas metálicas (modelo 8001, Capacidad de 0.38 litros/minuto a 275,790.3 Pa), para atomizar agua sobre el flujo de aire que sale del primer calentador para alcanzar la humedad relativa bajo estudio. El funcionamiento de estas boquillas está controlado individualmente por un

par de electroválvulas tipo solenoide y estas, a su vez, se controlan desde el software con el objetivo de mantener los niveles de humedad estudiado a través del proceso. El agua que no es acarreada por el aire es recogida y dirigida a una reserva (tanque plástico), para ser utilizada nuevamente. Además, una bomba de funcionamiento continuo (Craftsman, 372.85 vatios de potencia), es utilizada para elevar la presión del circuito hidráulico y lograr un mayor grado de atomización de la gota que sale por las boquillas. El sistema también cuenta con una válvula reguladora de alta presión (Plumb-pro, modelo 01345), que trabaja a 137.9 kPa y llaves de paso para regular diferentes flujos dentro del sistema.

4.1.4 SECADOR

Este utiliza un recipiente metálico con área seccional rectangular y fondo perforado (malla) removible sostenido por un par de sensores de peso para colocar la muestra de café pergamino. El recipiente está localizado dentro de un armario metálico con interior modificado para inducir y maximizar el flujo de aire de secado a través de la muestra (Figura 10). El área seccional por la cual fluye el aire de secado es de 645.2 cm^2 y la altura de la muestra de café pergamino fue de aproximadamente 4.45 cm. Se utilizó material aislante para reducir la pérdida de calor en la cámara de secado.



Figura 10. Interior del secador con bandeja metálica para muestras.

4.1.5 SISTEMA DE INTERCAMBIO DE FLUJO DE AIRE EN EL SECADOR

Consta de un mecanismo de válvulas metálicas de compuertas para ductos (Cut-off), que fueron accionadas manualmente para cambiar la dirección del aire de secado a través de la muestra de café pergamino. Se utiliza un juego de 2 compuertas por cada dirección de flujo y todas están instaladas en la tubería antes del secador.

4.1.6 INSTRUMENTACIÓN

Cuenta con un conjunto de sensores localizados en puntos claves para monitorear el proceso. Los sensores utilizados son:

4.1.6.1 Temperatura y Humedad Relativa

Sensor combinado que toma lecturas simultáneas de temperatura y humedad relativa del aire. Estos sensores (Omega, modelo HX94A), están incrustados en la tubería de aire y localizados uno en la entrada y otro en la salida de la cámara de secado (Figura 11). Se utiliza un tercer sensor para medir la temperatura y humedad relativa del ambiente donde se encuentra trabajando el secador a la toma de aire cerca al ventilador. Presentan exactitudes de $\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\pm 2\%$ para las mediciones de temperaturas y humedades relativas respectivamente.



(A)



(B)

Figura 11. Instalación del sensor de temperatura y humedad relativa del aire en el ducto (A) y vista interior (B).

4.1.6.2 Peso

Sensores localizados dentro de la cámara de secado y sobre los cuales reposa el recipiente que contiene la muestra de café pergamino (Omegadyne, modelo LC501, con capacidad de 0 –

45.36 kg). Se utilizan para determinar el porcentaje de humedad de la muestra por pérdida de peso. Presentan una exactitud de 0.03%.

4.1.6.3 Anemómetro

El sensor utilizado para medir la velocidad del aire fue un anemómetro de paletas plásticas, de fabricación China, modelo HHF-802, con un diámetro de 72 milímetros. Este sensor fue localizado dentro de la tubería de aire, posterior a la cámara de secado, con la finalidad de determinar el flujo volumétrico del aire. El flujo de aire se determina utilizando el área transversal del ducto donde se localiza el anemómetro.

4.1.6.4 Detectores Termo Resistivos (RTD)

Colocados dentro del recipiente que contiene la muestra y son tres (Omega, modelo PR-10-2-100-1/8-12-E). Están a la misma profundidad, pero uno a la izquierda, otro a la derecha y el tercero al centro (Figura 12). Se utilizan para monitorear la temperatura de la masa de café pergamino sin necesidad de abrir la cámara durante el proceso.



Figura 12. Posiciones de detectores termo-resistivos en la bandeja.

4.1.7 ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos está compuesto por un módulo de medición eléctrico (National Instrument), conectado a un computador (Dell, modelo Optiflex 980), que tiene instalado el software de programación gráfica LabVIEW. Se utilizó el sistema CompactDAQ con módulos de voltaje, de relé y de puente eléctrico. Su función principal fue adquirir, procesar y almacenar las lecturas de todos los sensores instalados en el secador (Figura 13).

Al comenzar la prueba, hay que proveerle al sistema el contenido de humedad (base húmeda) inicial y final de la muestra. El sistema es capaz de calcular la cantidad de agua que necesita evaporar de la muestra para alcanzar el contenido de humedad final deseado. Además, la programación cuenta con unos indicadores de cómo está funcionando el sistema y se puede apreciar gráficamente las medidas obtenidas de los sensores.

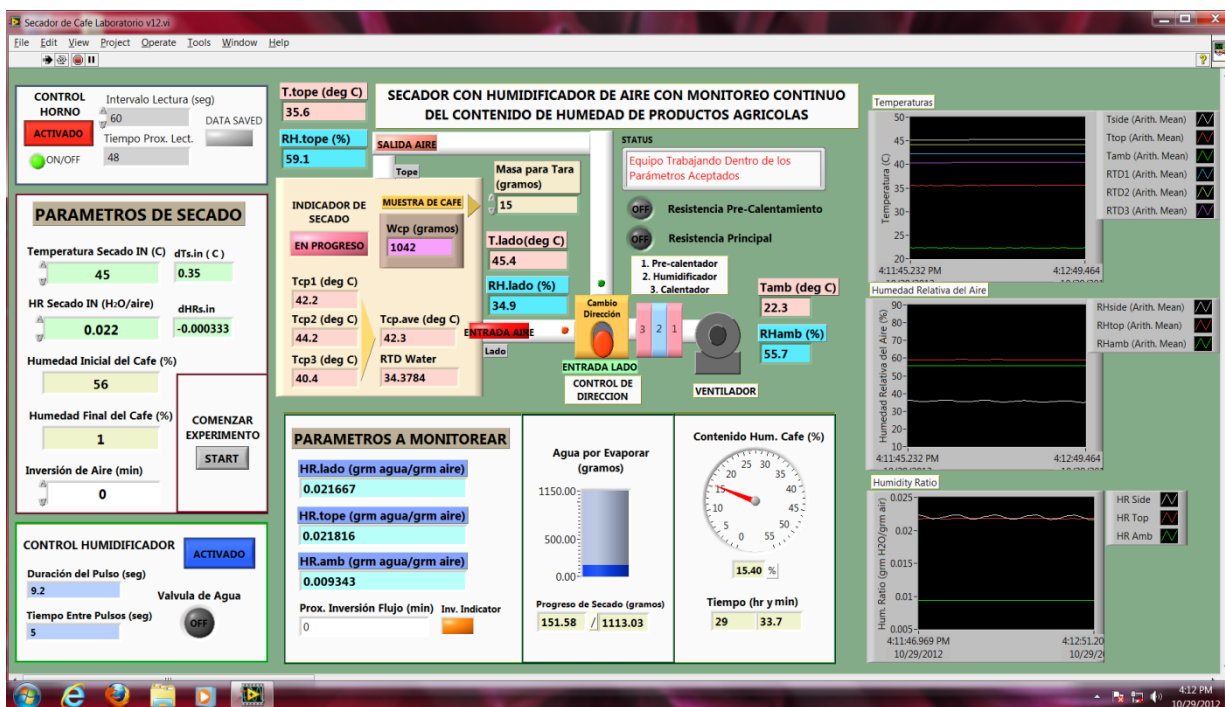


Figura 13. Diagrama de pantalla de programación LabVIEW.

4.2 VALIDACIONES AL EQUIPO

Las validaciones al equipo se realizaron en dos etapas. La primera parte consistió en una calibración de los sensores y realizar pruebas para medir las capacidades de trabajo de los demás elementos. Con lo anterior, se aseguró que los componentes del secador trabajaron adecuadamente y se observó una relación entre las lecturas y los valores reales.

Los detectores termo resistivos se compararon con termómetros de mercurio debidamente calibrados y realizando mediciones a temperatura ambiente, agua caliente, así como al agua fría. Los sensores de temperatura del aire se compararon con los mismos termómetros de mercurio pero midiendo aire ambiente y aire caliente hasta 100°C. Para la calibración de la humedad relativa de los sensores se utilizaron los mismos termómetros de mercurio aplicando el método del psicrómetro y sus respectivas ecuaciones. Para este fin, un termómetro se utilizó para medir la

temperatura de bulbo seco y el otro termómetro se cubrió con una mecha de algodón empapada de agua para medir la temperatura de bulbo húmedo. Al conocer las temperaturas de ambos termómetros, la humedad relativa puede determinarse con ayuda de la carta psicométrica o con las ecuaciones matemáticas para éste propósito (Medrano, 2003). Estos valores se compararon con los obtenidos por los sensores y se realizaron los ajustes necesarios para que presentaran concordancia.

Los sensores de peso se calibraron verificando sus lecturas contra objetos de pesos conocidos o medidos previamente en balanzas con más precisión. El ventilador de aire fue puesto a trabajar por diferentes tiempos a diferentes niveles para determinar los diferentes flujos que puede entregar. La bomba y la válvula reguladora de presión se colocaron a trabajar para asegurar que alcanzara los niveles de humedad específica requeridos por el experimento. Además, se utilizó este procedimiento para obtener información de diferentes boquillas con respecto a los volúmenes y niveles de aspersión logrados de acuerdo a las posiciones dentro del humidificador.

Una vez construido el secador e instalados los sensores y demás equipos, se realizaron otras calibraciones y una serie de pruebas para validar definitivamente el secador con su sistema de adquisición de datos, las cuales se describen a continuación:

Para calibrar la temperatura de los sensores de aire, los detectores termo-resistivos para la masa de café y unos termómetros digitales localizados en diferentes puntos del equipo, se utilizaron termómetros de mercurio calibrados. Se hicieron lecturas de temperaturas en los puntos de ebullición (100°C) y de congelación (0°C) del agua para los detectores termo-resistivos. Además, se les hicieron correcciones en sus lecturas por programación corrigiendo sus ecuaciones de trabajo. A los sensores de aire se les hicieron ajustes a sus lecturas manualmente utilizando un flujo de aire caliente, girando los potenciómetros de sus interiores usados para este fin, según el

manual de usuario. Las lecturas fueron también comparadas con las obtenidas utilizando un detector termo-resistivo ultra preciso (Omega, modelo P-L-A-1/4 6-0-P-3) para aire y con registrador de datos (Hobo U23 Pro v2) a varios niveles de temperatura en el rango de 25 a 55°C.

Para calibrar la humedad relativa de los sensores, se utilizó el método de la solubilidad de diferentes sales (Vernier, 2010). El método consiste en colocar los sensores en un recipiente hermético en presencia de una cantidad equivalente a una mano llena de una determinada sal y unas cuantas gotas de agua para facilitar su solubilidad. Como todas las sustancias químicas tienen determinadas sus valores de solubilidad a una determinada temperatura, al cabo de aproximadamente 2 horas las lecturas del sensor de aire deben coincidir con el valor de la humedad relativa producida al solubilizarse completamente la cantidad de sal.

La primera sal debe tener un valor alto de solubilidad, es decir cercano a 75%. Para este caso se utilizó cloruro de sodio (Sigma), la cual tiene un valor de 75.29%. Si existe diferencia se procede a manipular el potenciómetro interno del sensor correspondiente a valores altos hasta llevarlo a la lectura verdadera. Luego se realiza el mismo procedimiento pero utilizando un compuesto con un valor bajo de solubilidad, es decir cercano al 10% y manipulando el potenciómetro interno correspondiente para calibrar los valores bajos de humedad relativa. Para este caso se utilizó cloruro de litio (Sigma), la cual tiene un valor de 11.30%. El método recomienda repetirlo varias veces y desde luego hacer las correcciones manuales hasta que las lecturas sean confiables. Las lecturas fueron también comparadas con las obtenidas utilizando un registrador de datos (Hobo U23 Pro v2) a varios niveles de humedad relativa.

La humedad específica fue calculada utilizando los sensores de temperatura y humedad relativa del aire. Para esto fue necesario calcular la presión de saturación del vapor en el aire (p_{ws}) a la temperatura de bulbo seco (T) en K utilizando la siguiente ecuación (ASABE, 2011):

$$p_{ws} = R \cdot e^{\left(\frac{(A+B \cdot T+C \cdot T^2+D \cdot T^3+E \cdot T^4)}{F \cdot T-G \cdot T^2}\right)} \quad (4.1)$$

Donde, $R=22105649.25$, $A=-27405.526$, $B=97.5413$, $C=-0.146244$, $D=0.12558 \times 10^{-3}$, $E=-0.48502 \times 10^{-7}$, $F=4.34903$, y $G=0.39381 \times 10^{-2}$.

La presión del vapor de agua en el aire (p_w) puede expresarse en función de la humedad relativa (HR) según ASABE (2011):

$$p_w = \frac{HR \cdot p_{ws}}{100\%} \quad (4.2)$$

La humedad específica se calcula utilizando la presión del vapor de agua en el aire (p_w) y la presión atmosférica (p_a) corregida por elevación (h). Las presiones están en la unidad de Pascales y la altura en metros (McQuiston, 1994):

$$p_a = 101,325 - 11.53 \cdot h \quad (4.3)$$

$$HS = \frac{0.6219 \cdot p_w}{p_a - p_w} \quad (4.4)$$

Los sensores de peso instalados en el interior de la cámara de secado fueron calibrados con el equipo en funcionamiento tomando lecturas de sólidos previamente pesados en otras balanzas. Se realizaron correcciones en la programación para también minimizar el efecto de las vibraciones

y del flujo de aire al pasar a través de la bandeja de granos. La programación provee además de un valor de tara de manera que el usuario pueda corregir la lectura previa a comenzar el experimento.

El monitoreo del contenido de humedad durante el proceso de secado se basó en el principio de que la muestra de café pergamino fue perdiendo peso según el agua del grano se evaporó y fue acarreada por el aire. Para verificar la validez del monitoreo por peso, se realizaron varias pruebas de calibración utilizando un analizador de humedad – tipo balanza (Sartorius, modelo MA35) (Figura 14). La verificación se realizó tomando muestras de 3.0 gramos de café pergamino al comienzo y al final del proceso de secado. El contenido de humedad final del grano obtenido por el analizador de humedad fue comparado con los contenidos de humedad determinados utilizando los sensores de peso del secador.



Figura 14. Analizador de humedad (Balanza Sartorius MA35).

La balanza Sartorius, trabaja simulando la determinación del porcentaje de contenido de humedad (X_h) por el método gravimétrico. Al colocar la muestra en el equipo, éste le determina la masa total (M) y luego por calcinación, mediante la aplicación rayos infrarrojos, la deseca

completamente (M_s). La diferencia en masa corresponde al contenido de agua de la muestra (M_A). Tomando los datos inicial y final de los pesos de la muestra y mediante su programación utiliza la siguiente fórmula:

$$X_h = \frac{M_A}{M} \times 100\% = \frac{M - M_s}{M} \times 100\% \quad (4.5)$$

Esta fórmula también fue utilizada para calcular el contenido de humedad de la muestra durante el proceso de secado en el equipo utilizando los sensores de peso.

Con el equipo se realizaron pruebas de secado con café pergamino almacenado a 5 °C y al vacío, para determinar los niveles de eficiencia del equipo así como su capacidad de trabajo. En ellos se determinarían tiempos de secado en granos con humedad de 55% hasta obtener 10 -12 % de humedad. Por otro lado, se obtuvo la confianza de trabajar con el equipo y sus diferentes componentes por tiempos de 36 horas. Este tiempo correspondió al más largo, por ser el obtenido para la combinación de temperatura baja (45°C) con la humedad alta ($SH = 0.022$), para llegar a 12% su contenido de humedad. Es preciso aclarar, que aunque los otros procesos utilizaron menos tiempos para llegar al 12% su contenido de humedad, se continuaron secando todos hasta 36 horas. Lo anterior, fue con el objetivo de contar con curvas de secado que tuvieran la misma duración y facilitar la comparación entre los nueve procesos.

Para la selección del caudal de aire de secado se utilizó inicialmente la recomendación de CENICAFÉ (Roa et.al., 1999) de $25 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^3)$. Para un volumen de muestra de café pergamino de 0.00287 m^3 , el caudal mínimo debía de ser $0.072 \text{ m}^3/\text{min}$. Al realizar las pruebas preliminares, el tiempo de secado resultó ser muy lento por lo que se utilizó un caudal mayor al recomendado. Utilizando la prueba de 45°C y 0.022 de HS como referencia para la condición de secado más

lenta, se determinó utilizar un caudal de $0.65 \text{ m}^3/\text{min}$ para lograr llevar el contenido de humedad de la muestra de café pergamino a 12% en un periodo de 36 horas. El caudal de $0.65 \text{ m}^3/\text{min}$ equivale a $0.17 \text{ m}^3/\text{sec}\cdot\text{m}^2$ de área expuesta al secado la cual es similar a la utilizada por Afonso et.al. (2001) de $0.22 \text{ m}^3/(\text{sec}\cdot\text{m}^2)$.

Se realizaron varias pruebas en las que se validó la eficiencia del equipo para mantener un flujo contante entre 0.64 a $0.68 \text{ m}^3/\text{min}$, durante el tiempo de proceso. Además, se logró alcanzar y mantener la temperatura de secado trabajando dentro de un rango de $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y la humedad específica de entrada a la cámara de secado dentro de un rango de $\pm 0.0005 \text{ kg agua/kg de aire seco}$. Con todas las pruebas anteriores se pudo corroborar el funcionamiento adecuado del sistema en cuanto a la capacidad de registrar, procesar y almacenar toda la información originada en el secador y sus componentes.

4.3 PRUEBAS DEFINITIVAS

4.3.1 MUESTRAS DE CAFÉ

Para la experimentación se utilizó café pergamino lavado de la especie *Coffea arabica* proveniente de un beneficiado comercial ubicado en el pueblo de Mayagüez, en los límites con el pueblo de Añasco en tres diferentes fechas del mes de septiembre (11, 19 y 26 de 2013), y se rotularon como lote 1, 2 y 3. Cada lote consistió de 22.68 kg los cuales se utilizaron para realizar todos los tratamientos de la repetición. El transporte hacia la universidad tomó 20 minutos.

Para la preservación del café pergamino hasta el momento que se realizaron las pruebas se procedió a verificar su peso, se vació la muestra en un recipiente plástico para homogeneizarla

manualmente, se pesaron porciones de 2.25 kg y se sellaron (doble) al vacío. Posteriormente, fueron colocadas en pailas plásticas con sus tapas herméticas y almacenadas en un cuarto frío en las facilidades del Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos del Recinto Universitario de Mayagüez a temperatura de refrigeración de 5°C. Con una muestra de la porción restante del grano, realizamos análisis de contenido de humedad al lote.

Previo al proceso de secado, se procedió a sacar la muestra de la unidad de refrigeración, retirarla de la bolsa al vacío, colocarlas en una paila plástica pequeña y dejarla a temperatura ambiente. A continuación, se sometió a un lavado con agua de la llave por dos minutos y un escurrido en un colador plástico, para retirar por completo el mucílago, cascarillas así como granos sobrenadantes y presencia de taninos. El agua a temperatura ambiente, también contribuye en el objetivo principal de este proceso, el cual es lograr atemperar la muestra hasta 26°C. Esta temperatura que es medida con un termómetro digital, es lograda aproximadamente al cabo de 2 horas y es la temperatura ambiente promedio para montar el grano en la bandeja del secador.

El peso de la muestra a montar en la bandeja del secador fue de 2,000 gramos. Una vez terminado el proceso, la muestra resultante fue retirada de la canastilla (Figura 15) y pesada. Una cantidad de aproximadamente 50 gramos fue guardada y rotulada en un recipiente plástico para determinarle el porcentaje de humedad con el analizador de humedad y poder verificar el peso final reportado por el equipo. La muestra restante, se guardó en bolsas de papel y posteriormente en bolsas plásticas debidamente rotuladas e identificadas. Finalmente, se almacenaron en pailas plásticas con tapas herméticas.



Figura 15. Canasta y soporte metálico usado en el secador.

4.3.2 OTROS ASPECTOS IMPORTANTES DE LAS PRUEBAS DEFINITIVAS

Para el estudio del efecto de las condiciones climatológicas en Puerto Rico sobre el proceso de secado de café pergamino se consideraron los factores de temperatura y humedad relativa del aire en el interior del secador. Para cada uno de los factores del estudio se utilizaron tres niveles y cada condición experimental fue replicada tres veces, es decir una por cada lote. La variable respuesta fue el tiempo que le tomó a la muestra de café pergamino llegar a una humedad de equilibrio de 12 %. Aunque es preciso aclarar, que en estas pruebas el grano fue sometido a un tiempo de 36 horas. También es necesario anotar que, con pruebas preliminares se obtuvieron tiempos aproximados en cada caso, para llegar al 12% de contenido de humedad en el grano.

Se tomaron en consideración las condiciones ambientales en la zona cafetalera de Puerto Rico, los niveles de temperatura del aire (temperaturas ambientales) y humedades relativas más comunes. Datos climáticos obtenidos de un beneficiado de café en Mayagüez, durante la época de cosecha, entre los meses de septiembre a noviembre del año 2011 (Figura 16), muestran los diferentes niveles de humedad específica. Se observó que el nivel más bajo correspondía a 0.013,

el más común 0.018 y el nivel más alto 0.022. Por tal razón se procedió a establecer como niveles de humedad específica los valores de 0.014, 0.018 y 0.022 kg agua/kg aire seco.

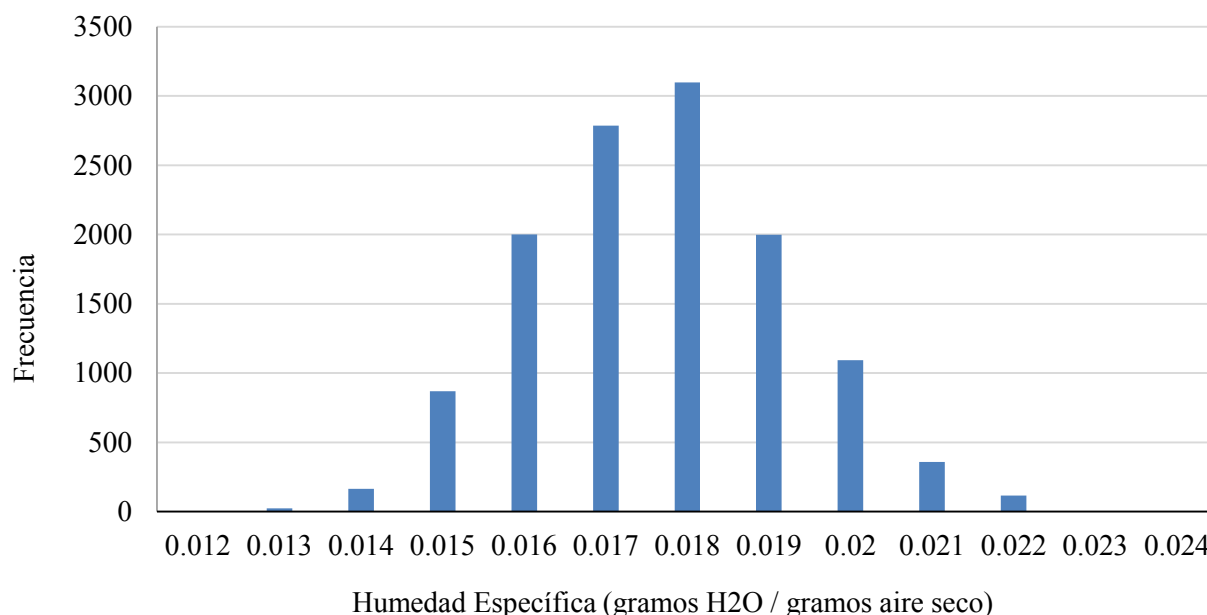


Figura 16. Histograma de los diferentes valores de humedad específica en beneficiado de café Mayagüez en los meses de septiembre a noviembre.

Los tres niveles de temperaturas de aire de secado correspondieron a 45, 50 y 55°C. La primera es según la revisión bibliografía una temperatura deficiente para el secado de café pergamino, además de estar asociada a problemas de calidad en el grano sometido a esta temperatura. La tercera temperatura corresponde a una excesiva, la cual está asociada con problemas de calidad por daños en el interior del grano a secar. La segunda corresponde a la temperatura límite de secado para café pergamino (Borem et al., 2008).

El flujo de aire al secador se estableció inicialmente tomando como base las recomendaciones del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ) en Colombia. Posteriormente, al realizar pruebas para el tamaño de la muestra bajo estudio y las limitaciones del sistema de control

de flujo del secador, se determinó que era necesario aumentar el flujo de aire de secado. Además, Ciro-Velásquez, (2000) discute y demuestra que utilizar flujos tan pequeños, hacen excesivos los tiempos necesarios para lograr niveles de secado de 12% de humedad en el grano. Por tal razón, el secado no funciona para secadores tipo laboratorio. Otra consideración respecto al flujo de aire a utilizar, es que éste no es una variable objetivo del estudio. Al utilizar un valor constante para todas las pruebas de secado, consideramos que no tiene efecto significativo en los resultados. Al contrario, ayudó a lograr los niveles de humedad en tiempos razonables. El flujo de aire a través de la capa de grano fue de $13.45 \text{ m}^3/\text{min}$.

Otra variable de salida fue la medición del consumo de energía por las resistencias durante los diferentes procesos de secado. Para este fin se utilizó un medidor (Intertek, modelo P4460.01), comercialmente denominado KILL A WATTS EZ. La unidad de medición reportada por el equipo fue kWh. A este aparato, conectado a la fuente de poder, estuvieron insertados los conectores de los dos reguladores de las resistencias. El registro de la energía consumida se midió desde el momento exacto que comenzó el proceso hasta el momento en que se dio por terminado.

La caracterización del proceso de secado se realizó midiendo el contenido de humedad en la muestra a través del tiempo. El contenido de humedad de la muestra de café se monitoreado utilizando los sensores de peso. Además, se midió el porcentaje de humedad de la muestra al comienzo y al final del proceso. Con un analizador de humedad Sartorius MA35, que fue calibrada para café pergamino.

El peso de la muestra utilizada para determinar el porcentaje de humedad fue de 3.0 gramos, la cual se fragmentó previamente, con un molinillo de café eléctrico (Hamilton Beach, modelo

80365). El resultado fue reportado por el aparato entre 18 a 25 minutos para muestra húmeda y entre 10 a 14 minutos para muestra seca. El equipo reportó los resultados con dos cifras decimales.

4.3.3 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

La caracterización del proceso de secado se realizó utilizando dos factores con tres niveles cada uno. Los factores estudiados fueron la temperatura y la humedad específica del aire de secado. Por lo anterior, el arreglo del modelo experimental es 3^2 , se muestra en la Tabla 1. Cada condición experimental fue replicada tres veces para asegurar la reproducibilidad de los resultados. La reproducibilidad de sólo tres para cada combinación o prueba fue determinada por lo largo de cada experimento a través del tiempo, 36 horas. Como lo explicamos anteriormente, cada replica fue desarrollada con lotes de café diferentes y el orden de las pruebas, para su realización fue determinado al azar (Tabla 2).

Tabla 1. Diseño experimental.

VARIABLES	NIVELES
HS DEL AIRE DE SECADO.	3
TS DEL AIRE DE SECADO.	3
MODELO FACTORIAL.	3x3
NÚMERO DE LOTES.	3
NÚMERO DE PRUEBAS.	27

Las lecturas de datos obtenidos por el programa LabVIEW, se capturaron en una hoja de datos. Posteriormente, la información fue depurada para organizar y ordenar los datos y realizar la corrección de masa. Esta corrección fue necesaria, porque durante los ensayos preliminares y las pruebas, se evidenció que los datos de masa presentaban una desviación o aumento. Esto debido al efecto producido por el aumento de temperatura en los sensores de peso.

Tabla 2. Orden de las pruebas del experimento al azar por lotes.

LOTE #1			LOTE # 2.			LOTE # 3.		
Orden	TS.	HS.	Orden	TS.	HS.	Orden	TS.	HS.
1	55	0.018	1	50	0.022	1	45	0.018
2	55	0.014	2	50	0.018	2	50	0.018
3	45	0.014	3	55	0.018	3	55	0.014
4	50	0.014	4	55	0.022	4	45	0.014
5	55	0.022	5	55	0.014	5	55	0.018
6	50	0.018	6	45	0.014	6	50	0.014
7	45	0.018	7	50	0.014	7	50	0.022
8	50	0.022	8	45	0.022	8	55	0.022
9	45	0.022	9	45	0.018	9	45	0.022

4.4 EVALUACIÓN DEL CAFÉ PERGAMINO

Posterior a las pruebas definitivas, se realizaron 5 pruebas con muestras de un lote de café diferente (lote # 4). El café proveniente de la Estación Experimental de Adjuntas, llegó el día 29 de octubre y pesó 29.2 kg. Las pruebas se realizaron con el propósito de caracterizar y evaluar el café seco. Se tomó como testigo la combinación de 50°C y un HS de 0.018, por ser la temperatura recomendada para el secado y el HS el más común en la temporada de secado. Las otras cuatro combinaciones corresponden a los que representaron los extremos: 55°C con 0.014 y 0.022 de HS y por otro lado 45 °C con 0.014 y 0.022 de HS.

A las muestras obtenidas se les evaluó la apariencia del grano (tal cual), mediante la aplicación de un panel sensorial (Visual). El atributo a seleccionar fue la “preferencia” por un grupo de 20 panelistas previamente adiestrados, mediante una charla de 30 minutos. A cada muestra se le había asignado un código aleatorio de 3 dígitos para identificar los 5 diferentes tratamientos.

Estas mismas muestras fueron piladas en las instalaciones de la Estación Experimental de Adjuntas con el equipo de pilado eléctrico (Quantic L-200) (Figura 17), y tostadas en las instalaciones del Laboratorio de Empaque del Departamento de Ingeniería Agrícola y Biosistemas, con el equipo (Gene Café, modelo CBR-101A) (Figura 18). Las cinco muestras se sometieron a un tostado tipo New York City el cual requirió de 16 minutos a 250°C. Se prepararon pequeñas cantidades tanto de granos pilados como de granos tostados y se efectuaron evaluaciones sensoriales a ambos grupos. Solo se percibió apariencia (visual) de los granos, pero en el caso del grano tostado se evaluó el aroma por parte de 20 panelistas adiestrados, mediante instrucciones previas. El atributo a seleccionar fue la “preferencia”. Cada muestra tenía asignado en código de 3 dígitos.



Figura 17. Equipo Quantic L-200 para pilado eléctrico de granos de café pergamino.



Figura 18. Tostador de café Gene Café, modelo CBR- 101A.

4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos obtenidos de las dos variables de salida (tiempo de secado y consumo de energía) se analizaron estadísticamente utilizando Análisis de Varianza (ANOVA), mediante el programa estadístico INFOSTAD V 3.0. Cuando los efectos de las variables resultaron ser significativos ($p \leq 0.05$) se utilizó la prueba de Tukey para la comparación de las medias.

4.6 LIMITACIÓN DEL SISTEMA

Uno de los problemas que surgió durante la validación del equipo fue la variación de las lecturas de los sensores de peso al aumentar la temperatura de la cámara de secado. Lo anterior, resulta evidente cuando se colocó una masa sólida de metal en la bandeja de muestras y los sensores de masa registraron un aumento continuo según aumentaba la temperatura (Figura 18). Según se pudo observar en la Figura 19, el comportamiento de los sensores es a todos los efectos uno lineal por lo que se puede aplicar un factor de corrección por temperatura (C_{Temp}). Para calcular éste factor se utilizó la temperatura de secado promedio ($TS_{promedio}$) debido a que los sensores de

masa se encuentran localizados en un punto medio entre el sensor de temperatura de entrada (TS_e) y el de salida (TS_s).

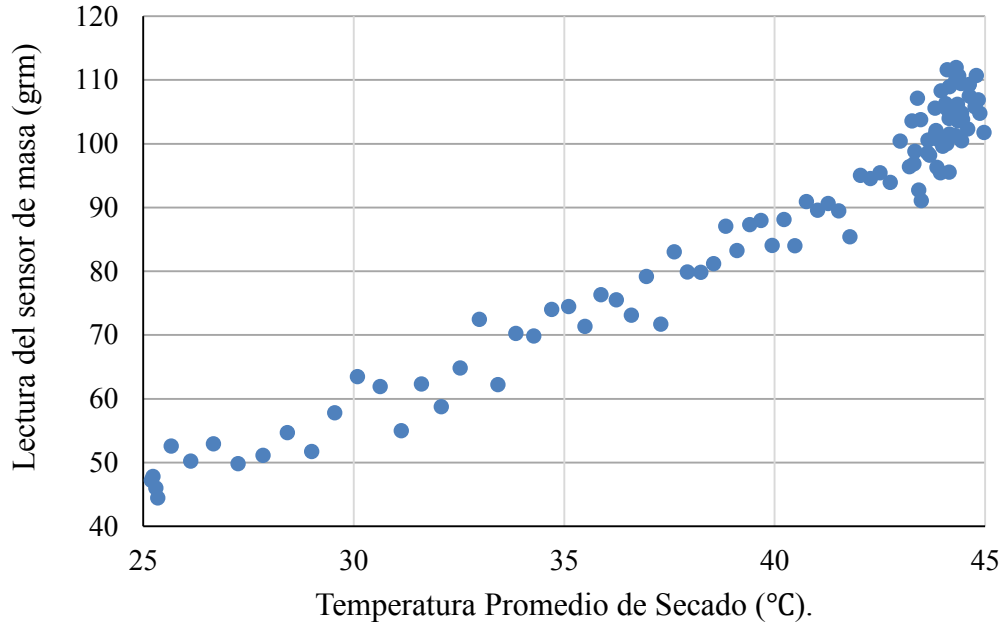


Figura 19. Efecto de la temperatura de secado en los sensores de masa. Precalentamiento de la prueba TS50-HS0.018 del Lote 1.

Para corrección de los datos y eliminar la interferencia producida por la temperatura sobre los sensores se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$M_{corregida} = M_{sensor} - C_{Temp} \times (TS_{promedio} - TS_{promedio\ inicial}) \quad (4.6)$$

$$C_{Temp} = \frac{\Delta M_{final}}{\Delta T} = \frac{M_{sensor} - M_{balanza}}{TS_{promedio.final} - TS_{promedio.inicial}} \quad (4.7)$$

$$TS_{promedio} = \frac{TS_e + TS_s}{2} \quad (4.8)$$

Aplicando el factor de corrección (C_{Temp}) a las lecturas de los sensores de masa, se puede apreciar en la Figura 20 como el efecto de la temperatura es minimizado cuando se utilizó la fórmula 3.6. Aunque se realizaron varios intentos para minimizar el efecto de la temperatura sobre los sensores, no fue posible eliminarlo de todo por lo que fue necesario utilizar éste factor de corrección.

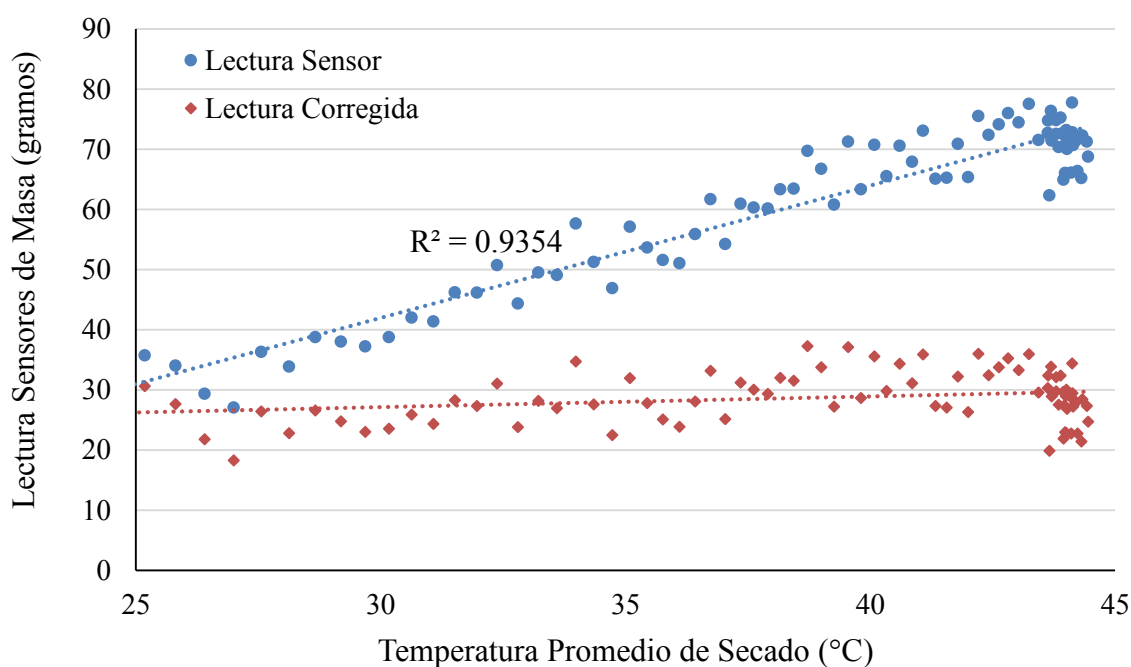


Figura 20. Lecturas de los sensores de masa y lectura corregida con factor de temperatura durante el precalentamiento. Prueba TS50-HS0.018. Lote 2.

En el caso de los experimentos, la variación de las temperaturas no era tan marcada como el proceso de precalentamiento. Se utilizó la masa final de la muestra medida con una balanza para calcular el factor de corrección. La Figura 21 muestra uno de los experimentos realizados en el que se puede apreciar el efecto del factor de corrección por temperatura en las lecturas de los sensores de masa. Se utilizó la masa corregida para el cálculo del contenido de humedad de la muestra.

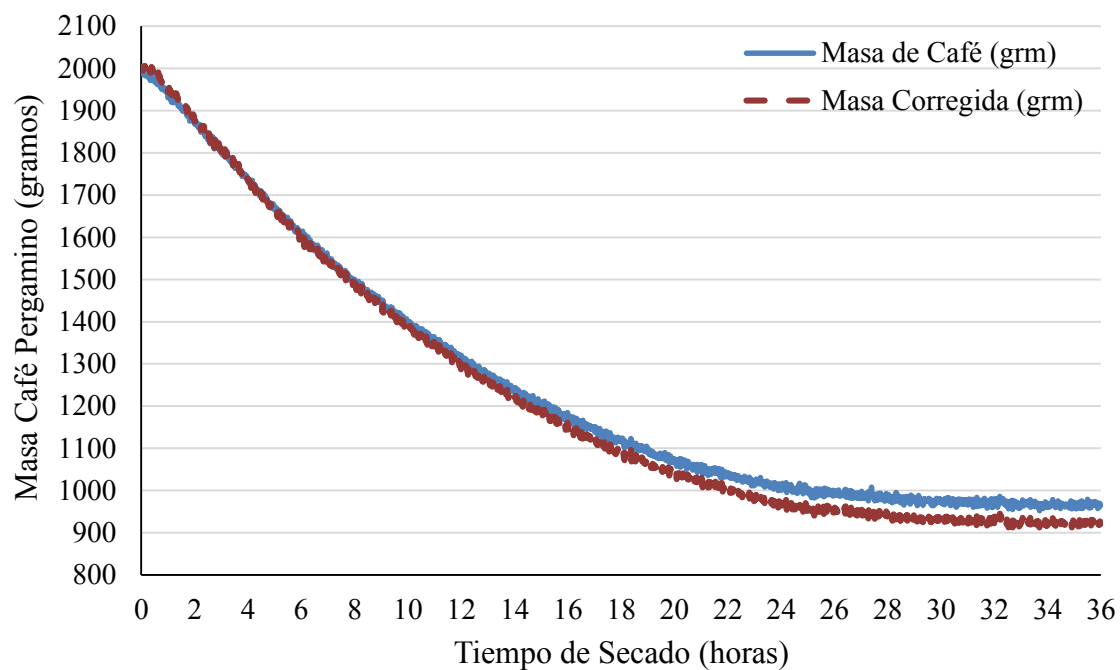


Figura 21. Lecturas de los sensores de masa y lectura corregida con factor de temperatura durante el experimento. Prueba TS50-HS0.018. Lote 2.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados del desarrollo de la fase experimental además de sus respectivos análisis y discusiones. Las gráficas y tablas de resultados presentadas para ser analizadas en el presente capítulo provienen de los datos obtenidos como resultados de las 27 pruebas de secado de café pergamino. Para observar las diferencias entre tratamientos, se promediaron los resultados de los diferentes lotes. Con estos promedios se tomaron datos cada 15 minutos y se graficaron los resultados, obteniendo curvas que caracterizan los diferentes tratamientos aplicados al café pergamino. Para obtener el tiempo de secado y el consumo de energía de cada tratamiento, se utilizó el valor correspondiente a un 12% de contenido de humedad.

Antes de iniciar el análisis y discusión de los resultados, es preciso demostrar la eficiencia del equipo en cuanto a la confiabilidad de mantener las condiciones experimentales por 36 horas. Específicamente, respecto a las dos variables de entradas involucradas en el estudio: TS y HS del aire de secado.

En la Figura 22 se puede observar el comportamiento de las temperaturas que intervienen en el proceso registrado por el equipo. Pero en este caso, lo que se resalta es el comportamiento de la TS de entrada para un proceso de 50°C. Mediante este comportamiento se puede observar la capacidad del equipo de suplir la temperatura deseada dentro de los límites de trabajo. En la Figura 23 se observa el comportamiento de las HS que intervienen en el proceso registrado por el equipo. En ella, se resalta el comportamiento de la HS de entrada para un proceso de 0.018. Este comportamiento refleja la capacidad del equipo de suplir los niveles de HS deseados dentro los límites de trabajo a lo largo del proceso.

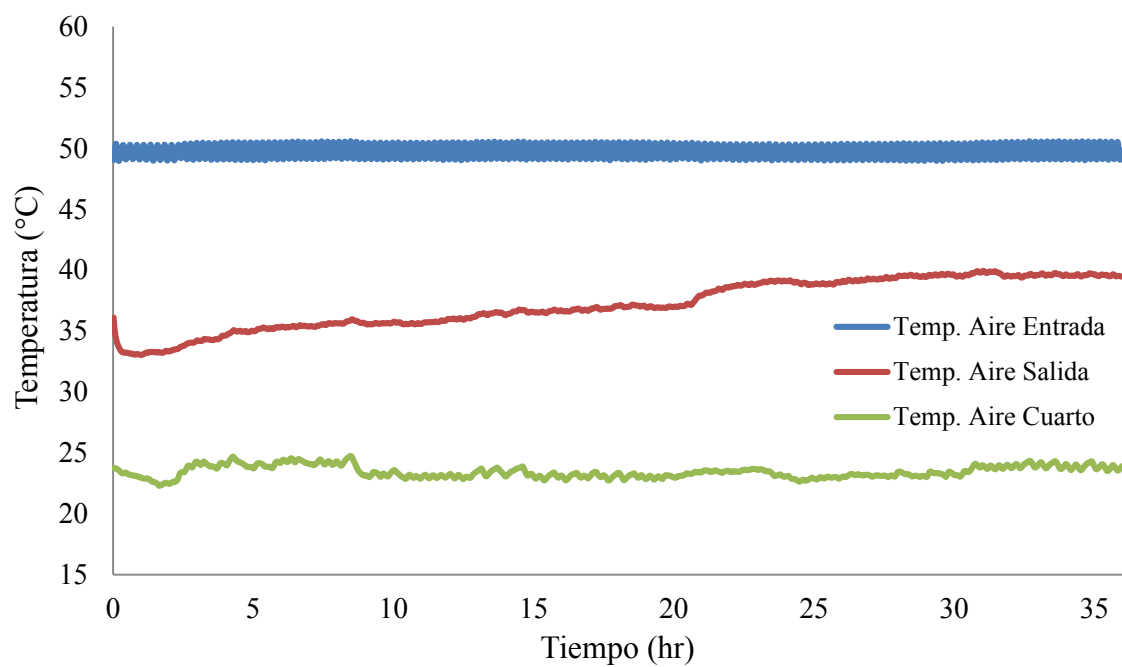


Figura 22. Comportamiento de temperaturas en equipo durante el proceso.

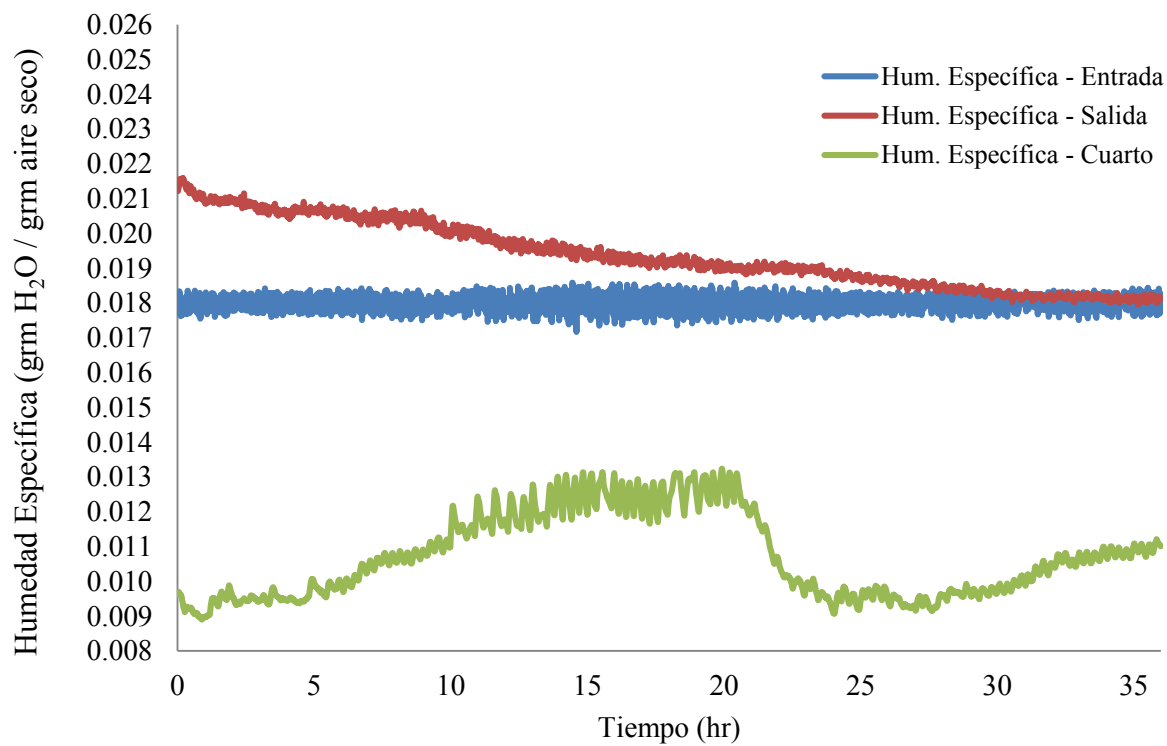


Figura 23. Comportamiento de humedades específicas en equipo durante el proceso.

La temperatura de secado deseada para el proceso, presenta un comportamiento lineal, pero con una pequeña oscilación alrededor de ese valor. Esto se debe, a la configuración de trabajo de las resistencias que producen el calor, las cuales a la vez están prendiendo y apagando, mediante las órdenes de sus respectivos controladores. Igual comportamiento sufre la humedad específica de secado. En este caso, se debe a la intermitencia de trabajo de las boquillas dentro del humidificador, que a su vez están comandadas por las electroválvulas que le ordenan los tiempos de humectación y lapsos de espera.

En la Tabla 3 se encuentran tabulados los valores correspondientes a la TS promedio del aire de secado para cada tratamiento en los tres diferentes lotes. También, se encuentran los respectivos resultados de las desviaciones estándar. Al observar los datos, se encuentra que todas las TS promedio del aire de secado presentan valores parecidos a los de las tres diferentes TS, establecidas para la investigación.

Tabla 3. Temperaturas de entrada promedio y desviaciones estándares por experimento.

Temp. Deseada.	HS	Lote 1		Lote 2		Lote 3	
		Promed.	Desv. Estándar	Promed.	Desv. Estándar	Promed.	Desv. Estándar
45°C	0.014	44.85	0.46	44.98	0.44	45.00	0.44
	0.018	44.95	0.45	44.93	0.40	44.95	0.42
	0.022	44.96	0.43	44.91	0.37	45.02	0.52
50°C	0.014	49.73	0.37	49.90	0.32	49.88	0.45
	0.018	49.71	0.49	49.84	0.40	49.87	0.30
	0.022	49.83	0.43	49.84	0.35	49.83	0.43
55°C	0.014	54.75	0.32	54.93	0.27	54.95	0.22
	0.018	54.63	0.46	54.90	0.24	54.99	0.20
	0.022	54.44	1.12	54.96	0.32	54.76	0.50

Otro motivo de confiabilidad lo expresan los resultados de sus respectivas desviaciones estándares que son datos pequeños y muy homogéneos. El valor de desviación estándar 1.12 corresponde al procedimiento de 55 °C con 0.022 HS, el cual presentó aproximadamente 2 horas con un flujo de aire por encima de lo establecido, por error en la manipulación del controlador del ventilador.

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las HS promedio de entrada y los resultados de sus respectivas desviaciones estándares. Se observan todos los valores de HS dentro de los establecidos para los procesos de secado y valores bien pequeños para sus respectivas desviaciones estándar, lo que demuestra uniformidad en los datos.

Tabla 4. HS de entrada promedio y sus desviaciones estándares por experimentos.

HS	Temp. (°C)	Lote 1		Lote 2		Lote 3	
		Promed.	Desv. Estándar	Promed.	Desv. Estándar	Promed.	Desv. Estándar
0.014	45	0.0140	0.0001	0.0140	0.0002	0.0140	0.0001
	50	0.0140	0.0002	0.0140	0.0002	0.0140	0.0002
	55	0.0140	0.0001	0.0140	0.0002	0.0140	0.0002
0.018	45	0.0180	0.0003	0.0180	0.0002	0.0180	0.0002
	50	0.0180	0.0002	0.0180	0.0003	0.0180	0.0002
	55	0.0180	0.0003	0.0180	0.0002	0.0180	0.0002
0.022	45	0.0220	0.0003	0.0220	0.0003	0.0220	0.0003
	50	0.0220	0.0004	0.0220	0.0003	0.0220	0.0002
	55	0.0220	0.0004	0.0220	0.0004	0.0220	0.0003

5.1 ANÁLISIS DE MASA Y REDUCCIÓN DE MASA

La Figura 24 muestra la gráfica correspondiente a los diferentes tratamientos promediados donde se observa el comportamiento de la masa a través del tiempo de proceso. Es decir, el comportamiento de los 2,000 gramos iniciales de muestra a lo largo de las 36 horas de proceso de secado bajo las diferentes condiciones de temperaturas y humedades específicas. Como se puede observar, las curvas presentaron marcadas diferencias entre ellas mismas, dado por las diferencias en temperatura y contenido de humedad en el aire se secado.

Las tres primeras curvas en bajar a niveles de 900 gramos son las de una mayor temperatura, es decir 55°C. Con lo anterior, se pone en evidencia el efecto de una mayor temperatura en el secado más rápido del café. Dada su mayor capacidad de transferencia de energía, para lograr desplazar la humedad presente en el interior del grano. De acuerdo a Bennamoun et al., (2008), esto es un proceso capa por capa y que al final busca evaporar el agua del grano logrando alcanzar la temperatura final del grano y un contenido de humedad en equilibrio. Al aumentar la temperatura del aire de secado se produce un aumento en la razón de secado, lo cual se traduce en una disminución de los tiempos de secado (Parra-Coronado et al., 2008).

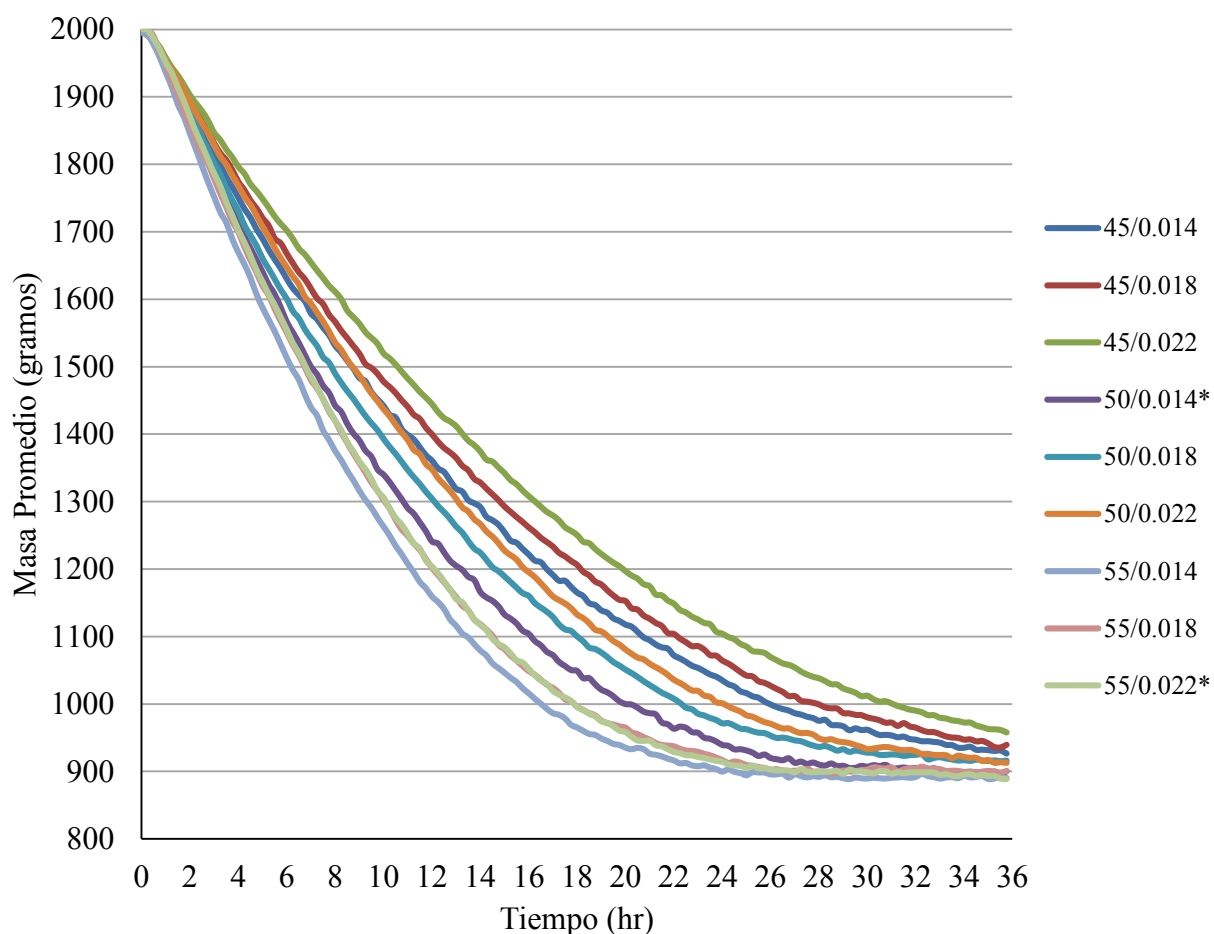


Figura 24. Promedio masa del café a través del tiempo de secado.

El efecto del mayor contenido de humedad en el aire de secado va a incidir aumentando el tiempo de secado, porque hace necesario un mayor esfuerzo por parte del sistema mecánico para secar también el contenido de agua que arrastra el aire de secado. Los resultados aquí presentados comparan a los resultados obtenidos por Afonso et al., (2001) donde se pueden apreciar las curvas de los diferentes HS a diferentes temperaturas, corroborando lo aquí expresado.

El tratamiento con la mayor temperatura y el nivel más bajo de humedad específico (55°C y 0.014 HS) es el que presenta un menor tiempo para llegar a niveles de 900 gramos de masa. Por el contrario, la curva que representa la temperatura más baja y el más alto contenido de humedad

(45°C y 0.022 HS) es la que presenta un tiempo mayor para lograr niveles de masa de 900 gramos. La masa de 900 gramos representa el contenido de masa seca en el grano, por lo que se entiende que la curva describe la pérdida de humedad a lo largo del proceso. Es lo máximo hasta donde la curva puede bajar y es donde se hace completamente horizontal.

En la Figura 25 se observa la gráfica que describe el comportamiento de la disminución porcentual de la masa de los diferentes tratamientos promediados a través del tiempo. Para estas pruebas, el 100% de la masa correspondió a 2,000 gramos. El porcentaje de base seca del café estuvo entre 40 a 45 % del peso total de la muestra, en los diferentes lotes utilizados para las pruebas. En la Figura 25 se puede ver, que el primer tratamiento en lograr un nivel de 55 a 57 % en reducción del porcentaje de masa fue el de mayor temperatura y un nivel de humedad específica más baja (55°C y 0.014 HS). Este nivel de reducción se logró en 24 horas.

Por el contrario, el tratamiento que presenta un tiempo mucho mayor que 36 horas para lograr un nivel de 56 a 57 % en reducción del porcentaje de masa, es el de menor temperatura y mayor HS (45 °C y 0.022 HS). A este le siguieron los de su misma temperatura (0.018 y 0.014 HS). Esta reducción porcentual de masa la podemos asociar con la reducción del contenido de agua y de acuerdo con Ramírez-Martínez et al., (2010) está determinado por los coeficientes de difusión de agua en el grano. Su estudio nos permite ver el comportamiento del contenido de agua a través del tiempo para dos diferentes temperaturas y vemos que el coeficiente de la mayor temperatura es mayor, por tal razón su curva gasta menos tiempo en el proceso de secado.

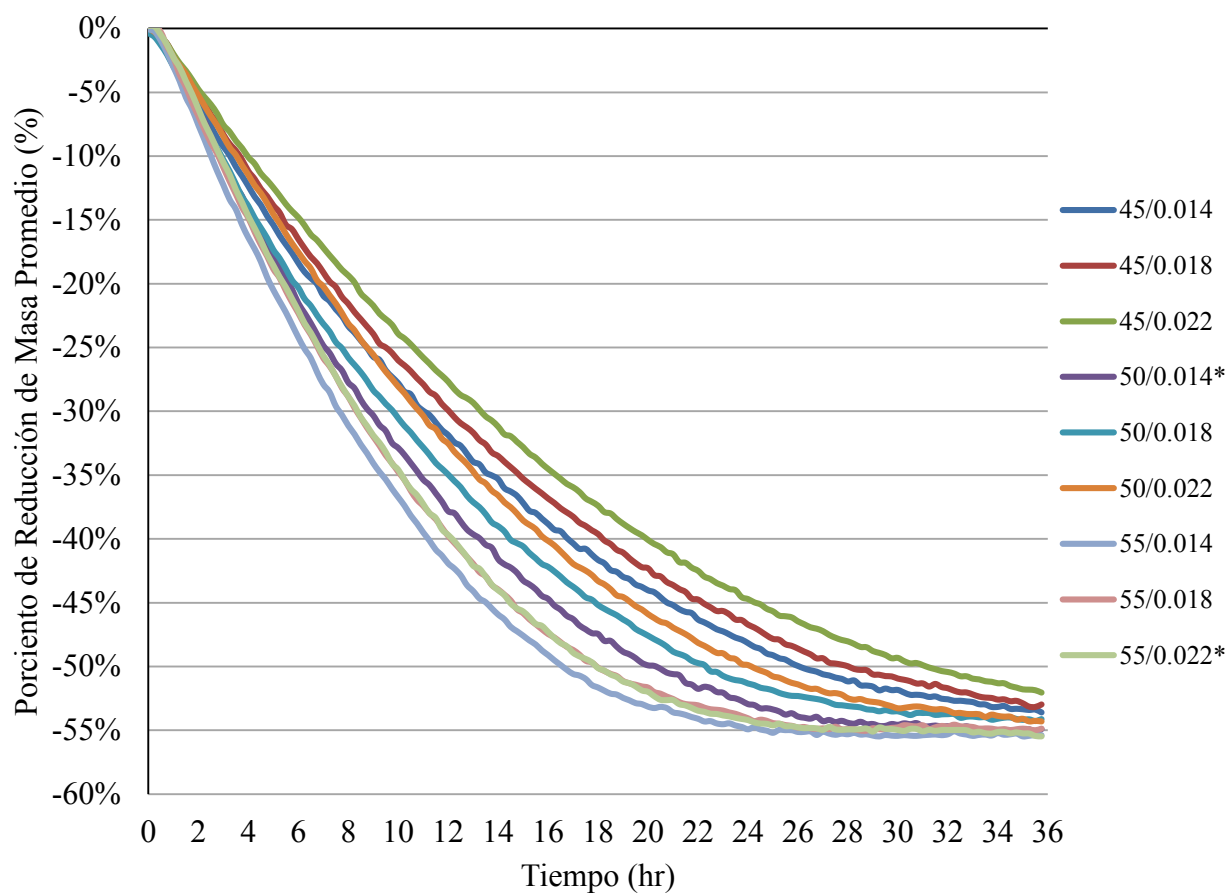


Figura 25. Reducción porcentual promedio de masa del café a través del tiempo.

5.2 ANÁLISIS DE TEMPERATURA DEL GRANO

En la Figura 26 se observa la gráfica correspondiente a las curvas de temperaturas promedios registradas en el centro de la muestra de café pergamino a lo largo del proceso de secado para los diferentes procesos bajo investigación. En las curvas se pueden identificar tres etapas a lo largo de las 36 horas de proceso. La primera corresponde al inicio hasta las 2 a 3 primeras horas, la segunda llega hasta donde se alcanza la temperatura en el centro de la masa del grano y la tercera va hasta cuando termina el proceso (36 horas).

Se pueden apreciar tres grupos de curvas, donde cada grupo está determinado por las TS. Al final se observa que la temperatura en el centro de la masa del grano para estos tres tratamientos, se logra a partir de las 17 a 18 horas de proceso. De lo anterior, se puede determinar que el grano, en el centro de su masa, soportó una temperatura promedio de 55°C por 18 horas de proceso.

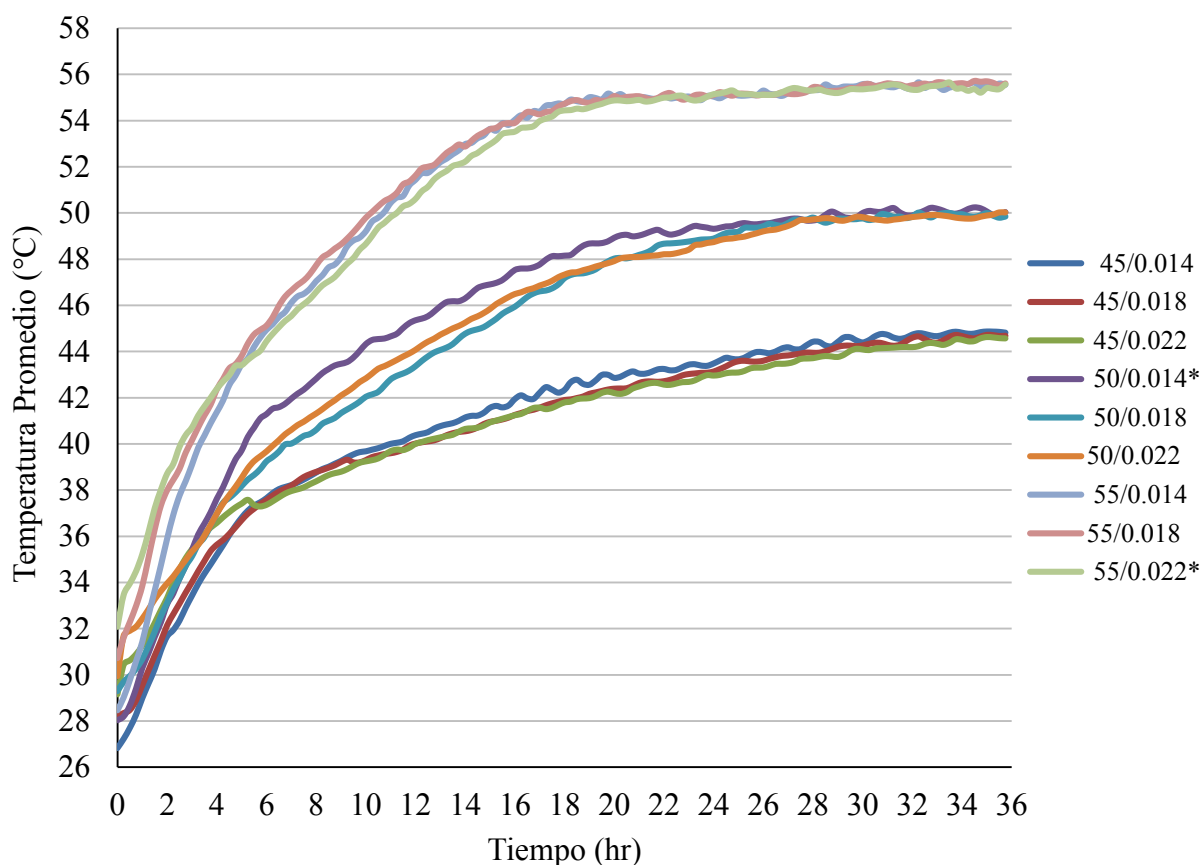


Figura 26. Temperaturas promedio masa del grano de café a través del tiempo.

El grupo intermedio de curvas de la gráfica corresponden a los tres tratamientos promedios de la TS de 50°C, con sus HS. Esta temperatura se logra en un tiempo promedio 26 horas. Lo cual representa una diferencia en horas mucho mayor respecto al tiempo, para el grupo anterior. De

acuerdo a lo anterior, el centro de la masa de grano soportó unas 10 horas la temperatura de 50°C, a lo largo de las 36 horas de proceso.

El grupo de las curvas de TS de 45°C y sus HS, logran la temperatura en el centro de la masa del grano, a las 34 horas. Lo cual es muy cercano a las 36 horas de procesamiento, soportando esa temperatura por 2 horas. Según *Ciro-Velásquez et al., (2010)* el comportamiento de la temperatura del grano y la transferencia de su humedad se rigen por los conceptos del comportamiento de la capa fina de granos durante el secado. Durante las primeras horas de secado se presentan grandes gradientes de temperaturas, pero a medida que se llega al equilibrio térmico en la masa de grano se favorece la transferencia de masa hacia el exterior del grano.

Por otro lado, *Srivastava et al., (2002)* en su estudio investigó este comportamiento pero con respecto a diferentes capas de grano, el efecto que se observa en sus resultados es igual al comportamiento de las curvas de la Figura 25. En esta investigación, al dejar constante la capa de grano no se presentó una caída de temperatura ni ningún efecto adverso a la temperatura del grano. Por tal razón, solo se puede ver el efecto de las tres diferentes temperaturas usadas hasta lograr un equilibrio térmico en la masa del grano.

5.3 ANÁLISIS CONTENIDO DE HUMEDAD

La Figura 27 representa la gráfica de las curvas de los contenidos de humedad promedios a través del tiempo para los diferentes procesos bajo investigación. Lo cual expresa la dificultad del secado para continuar evacuando agua, desde el interior de los granos. Proceso, que de acuerdo a la literatura, a medida que se acerca al final del contenido de humedad presente en el grano, va a ser más difícil y más lento de desalojar. Esto se confirma porque *Chandrasekar et al., (1999)* en

sus conclusiones afirma que a mayor contenido de humedad presente en el grano aumenta la conductividad térmica, pero en este caso al disminuir la humedad presente disminuye la conductividad y por ese hecho la razón de secado disminuye considerablemente.

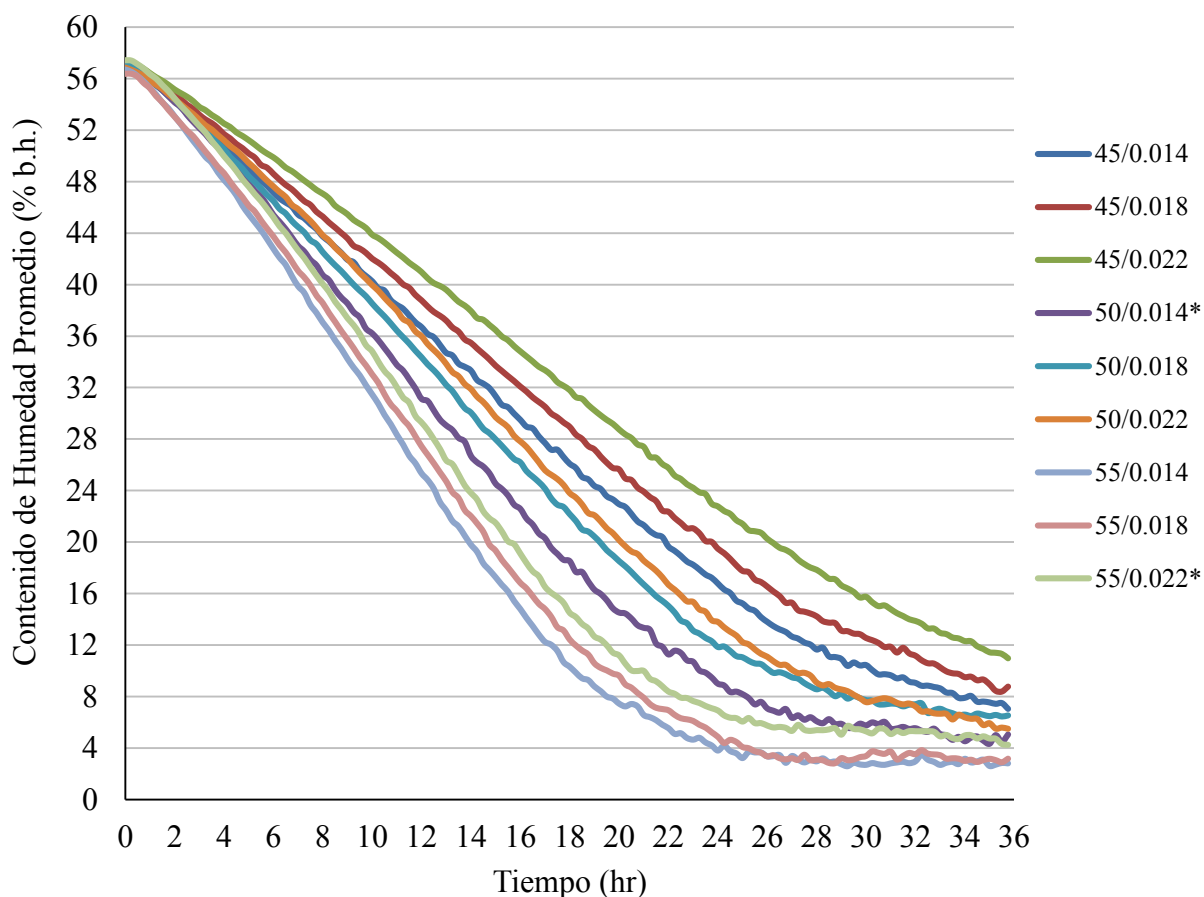


Figura 27. Contenido de humedad promedio en el grano a través del tiempo.

Otro hecho importante que se observa en las diferentes curvas de la gráfica es el punto de corte con la línea que muestra el 12% de contenido de humedad. Este valor representa el máximo permitido para almacenamiento de café pergamino y además se toma como parámetro de calidad para comercializarlo. En todas las curvas es diferente dadas las condiciones de las dos variables que afectan principalmente los tratamientos de secado, las cuales son motivo principal de esta investigación. La primera curva en llegar a la línea de 12% de contenido de humedad es la de 55°C

con un HS de 0.014, la segunda es la de la misma temperatura con 0.018 HS y la tercera para la de igual temperatura y 0.022 HS.

Según la gráfica, los tiempos gastados por las tres curvas anteriores para lograr ese contenido de humedad fueron en su orden: 17, 18 y 19 horas. Las tres siguientes curvas en lograrlo fueron las de 50 °C con HS en su orden de 0.014, 0.018 y 0.022. Sus tiempos gastados, en su orden para tal fin fueron: 21, 24 y 25 horas. Las tres últimas curvas y en su orden, corresponden a las de temperatura de 45°C con sus respectivos HS: 0.014, 0.018 y 0.022 y sus tiempos fueron: 27, 30 y 34 horas.

Se deduce, que en un proceso de secado, una mayor temperatura reduce el tiempo necesario para bajar el contenido de humedad hasta lo deseado, en este caso 12%. Por el contrario, a medida que se utilizan temperaturas más bajas se ve el efecto al aumentarse el tiempo necesario para reducir el contenido de humedad del grano hasta 12%. En el caso de la utilización de la temperatura intermedia (50°C), que es la máxima recomendada para el secado mecánico de café pergamino, los tiempos se encuentran dentro de lo expresado por la literatura resultante de diferentes estudios. Para Pérez-Alegría et al., (2001) usando temperatura de 55 °C para secar grano de 56% de contenido de humedad hasta 11% necesitaron 27 horas de proceso.

Por otro lado, el efecto producido por el HS se observó entre las tres curvas de una misma temperatura. Para las diferentes curvas de las tres temperaturas, se miró el hecho de lograr primero los niveles de 12% de contenido de humedad, por las de 0.014 HS seguida por la de 0.018 y 0.022. Aquí se demostró que independiente de la temperatura utilizada, una menor humedad específica presente en el flujo del aire de secado va a favorecer el proceso, porque disminuye el tiempo de secado. Para este caso, el tiempo fue mucho menor.

5.4 ANÁLISIS TIEMPO DE SECADO

La Tabla 5 presenta los resultados de los tiempos de secado en horas para los diferentes tratamientos investigados. El tiempo de secado se define como el tiempo que transcurre desde que se colocó la muestra en el equipo hasta que la misma alcanzó un contenido de humedad de 12%. Se les aplicó un análisis de varianza con el fin de mirar si presentan diferencias significativas entre TS y entre los diferentes niveles de HS. Además, cada tratamiento fue promediado por lote para graficar los mismos.

Tabla 5. Tiempos de secado para alcanzar un contenido de humedad de 12% para los diferentes tratamientos y lotes.

LOTE	HS.	Tiempo de secado para $X_h = 12\%$ (horas)		
		TS = 45°C	TS = 50°C	TS = 55°C
1	0.014	29.00	21.75	17.00
	0.018	28.75	23.75	18.00
	0.022	32.25	27.00	20.25
2	0.014	25.75	21.25	17.00
	0.018	28.25	23.25	17.00
	0.022	34.50	23.00	18.00
3	0.014	28.50	22.00	17.50
	0.018	34.75	25.00	20.25
	0.022	36.00	26.00	21.00

La Figura 28 muestra los tiempos de secado promediado por tratamiento. Se puede apreciar que los tiempos son mayores corresponden a la temperatura baja (TS = 45°C) y a la humedad específica alta (HS = 0.022). El tiempo de secado mayor fue de 34.5 horas y el menor fue de 17.17 horas.

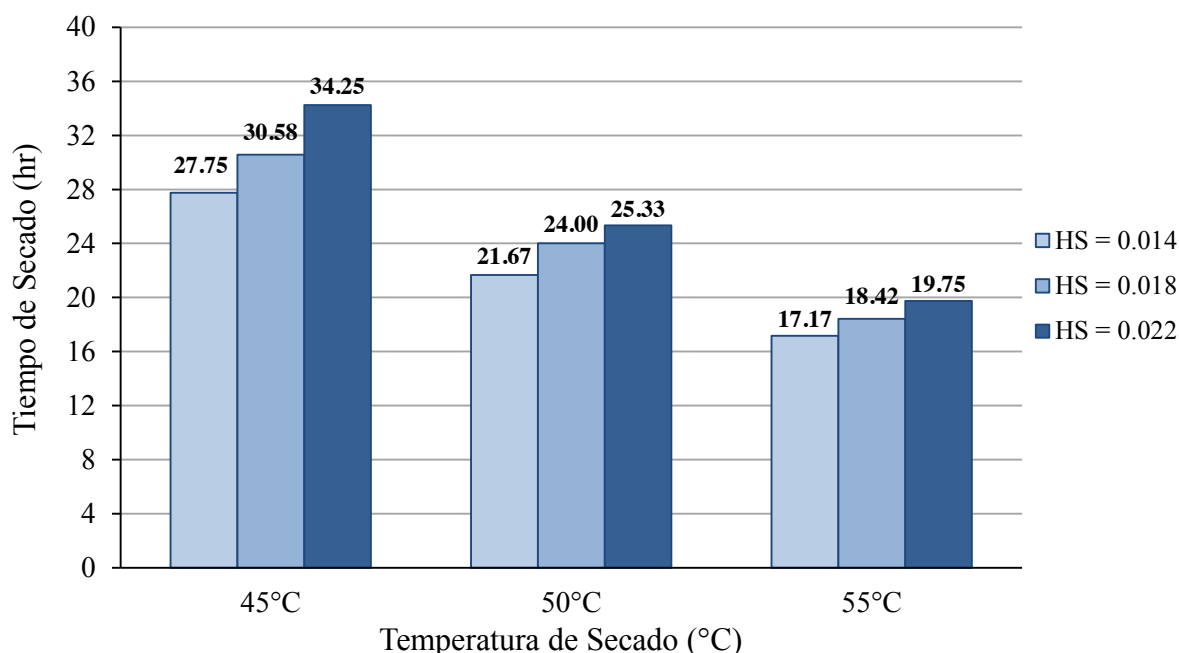


Figura 28. Tiempos de secado de café pergamino a diferentes HS. – Promedio lotes.

El efecto de aumentar la HS de 0.014 a 0.018 generó un incremento adicional de 2.8 horas, representado en un 10.2%. Pero, el efecto de aumentar la HS de 0.014 hasta 0.022 generó un incremento adicional de 6.5 horas, representando un aumento en el tiempo de secado de 23.4%. Para la TS de 50°C con una HS de 0.014, gastó 21.7 horas el proceso de secado. El efecto de incrementar el HS de 0.014 a 0.018 y 0.022 representó un aumento adicional en los tiempos de 2.3 y 3.7 horas, expresados en incrementos de 10.8 y 16.9% respectivamente. Para la TS de 55°C con una HS de 0.014, gasto solo 17.2 horas. El efecto de incrementar las HS de 0.014 a 0.018 y 0.022, representó un incremento adicional en los tiempos de secado de 1.3 y 2.6 horas, expresado en unos incrementos de 7.3 y 15% respectivamente.

Lo anterior, deja ver el efecto de la humedad específica del aire de secado es mayor cuando se utiliza la temperatura de 45°C. Pero, por ser una baja TS se espera que no afecte enormemente la calidad del grano. Al contrario, en el uso de TS de 50 y 55°C, la humedad específica tiene un efecto menor, pero puede verse afectado el grano.

En la Figura 29, se pueden ver que los resultados del análisis indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tiempos de secado para las tres temperaturas utilizadas en el secado del café. Cada barra del diagrama tiene una letra diferente para cada temperatura. Se aprecia en el gráfico que la menor temperatura gasta mayores tiempos en el secado.

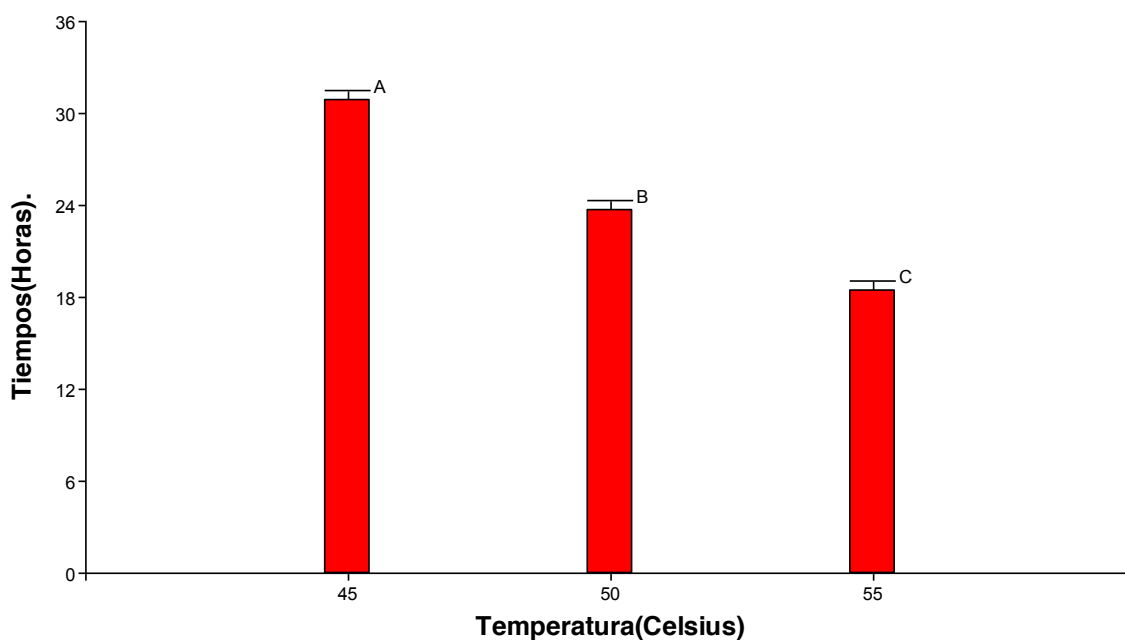


Figura 29. Análisis estadístico del efecto de la temperatura del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino.

La Figura 30 representa el diagrama de barras de los resultados obtenidos en el análisis de varianza de los tiempos de secado con respecto a los tres niveles de HS utilizados en esta investigación. En el diagrama se puede apreciar que, no hay diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tiempos para los HS de 0.014 y 0.018. Tampoco hay diferencias significativas entre los

tiempos para los HS de 0.018 y 0.022. Pero si hay diferencias significativas entre los tiempos de secado de los HS de 0.014 y 0.022 (extremas).

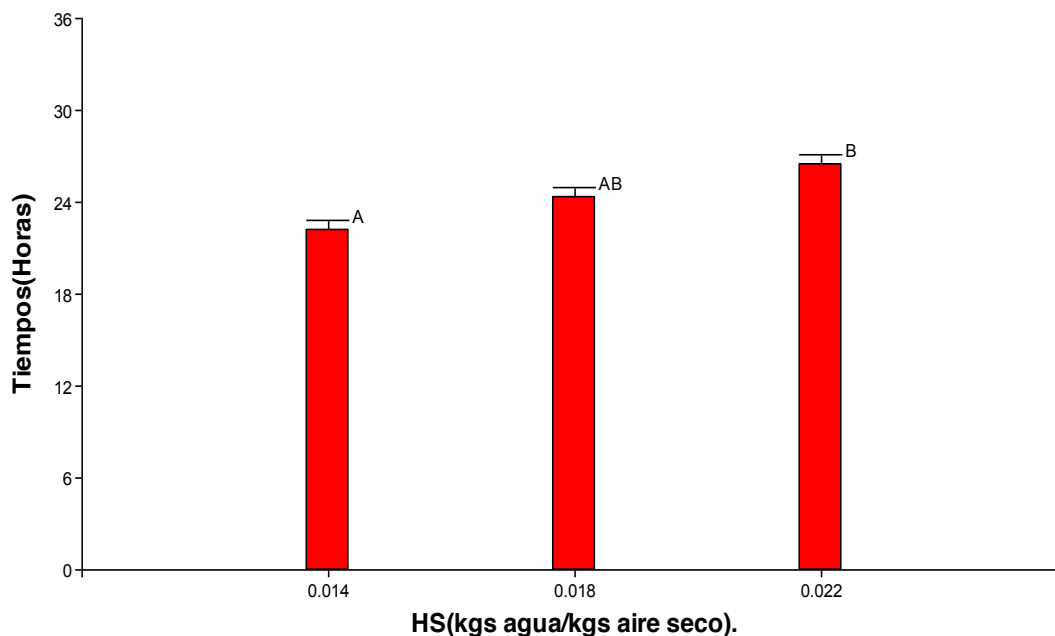


Figura 30. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino.

En la Figura 31 se observan los resultados del análisis estadístico del efecto de las humedades específicas sobre los tiempos de secado para una temperatura 45°C. En los resultados se observaron diferencias significativas entre los tiempos de las humedades específicas de los extremos. Lo que permite ver el efecto de utilizar HS 0.014 contra HS 0.022 a una temperatura baja. En la Figura 32 se observan los resultados del análisis estadístico del efecto de las humedades específicas sobre los tiempos de secado para una temperatura de 50°C. En los resultados se observa que sólo se presenta diferencia significativa entre los tiempos de las HS de los extremos analizados.

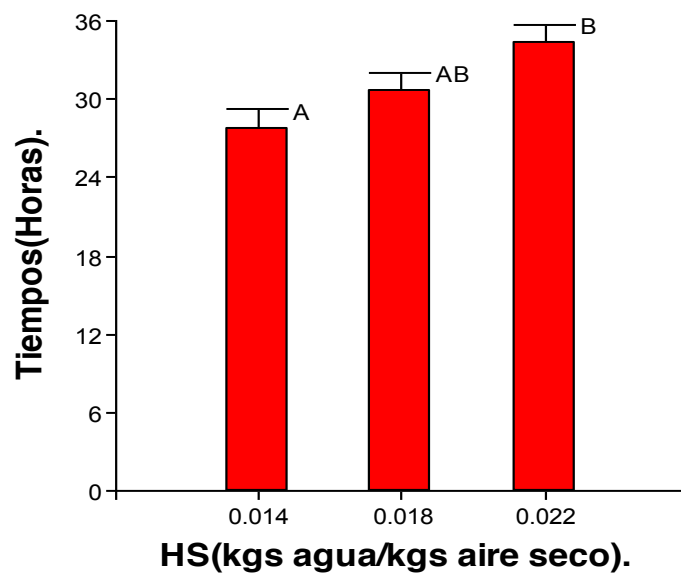


Figura 31. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino a temperatura de secado de 45°C.

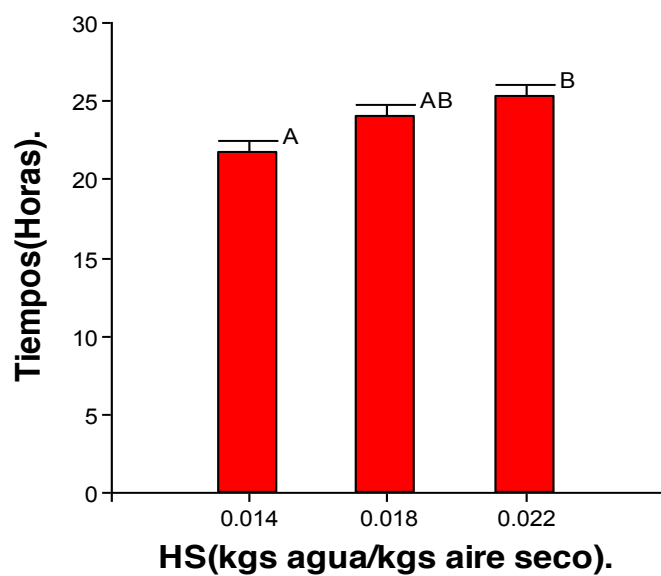


Figura 32. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino a temperatura de secado de 50°C.

En la Figura 33 se observan los resultados del análisis estadístico del efecto de las humedades específicas sobre los tiempos de secado a temperatura de 55°C. Los resultados expresan que no se presentan diferencias significativas entre los tiempos de las tres diferentes HS. Es decir, que a temperaturas altas, los tiempos de secado gastados en el secado no se verán afectados significativamente debido al uso de HS diferentes.

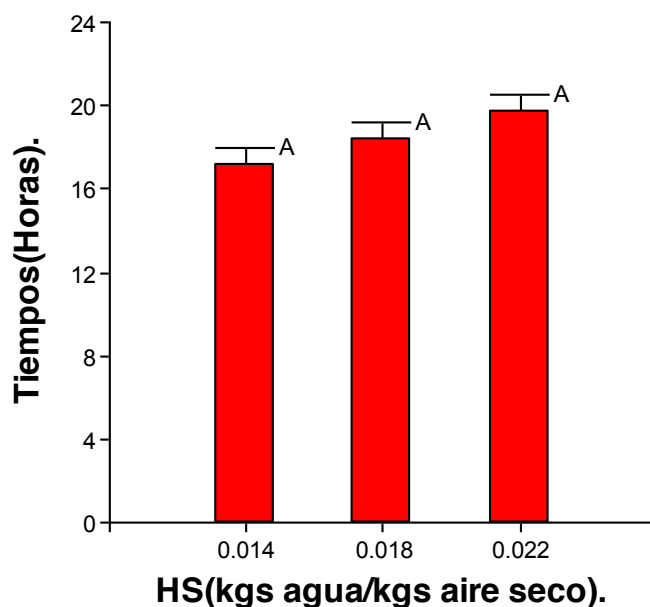


Figura 33. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino a temperatura de secado de 55°C.

La Figura 34 representa los resultados obtenidos en el análisis de varianza de los tiempos de secado, con respecto a la interacción de las variables TS y HS, utilizados en la investigación. Las TS de 50°C son los tratamientos (combinaciones) de mejor consistencia dentro del diagrama. Pero, las combinaciones extremas con letras A y F, presentan diferencias significativas entre ellas. Según los resultados aquí expresados, no habría diferencias significativas entre los tiempos gastados al utilizar los tratamientos del centro del diagrama, situación que no afectaría un proceso

de secado de café. Las diferencias sí serían significativas al comparar los tiempos, cuando se utilizan algunas de las combinaciones de los extremos. Pero, en general se puede expresar que no se presentó una diferencia significativa en los resultados de éste análisis estadísticos.

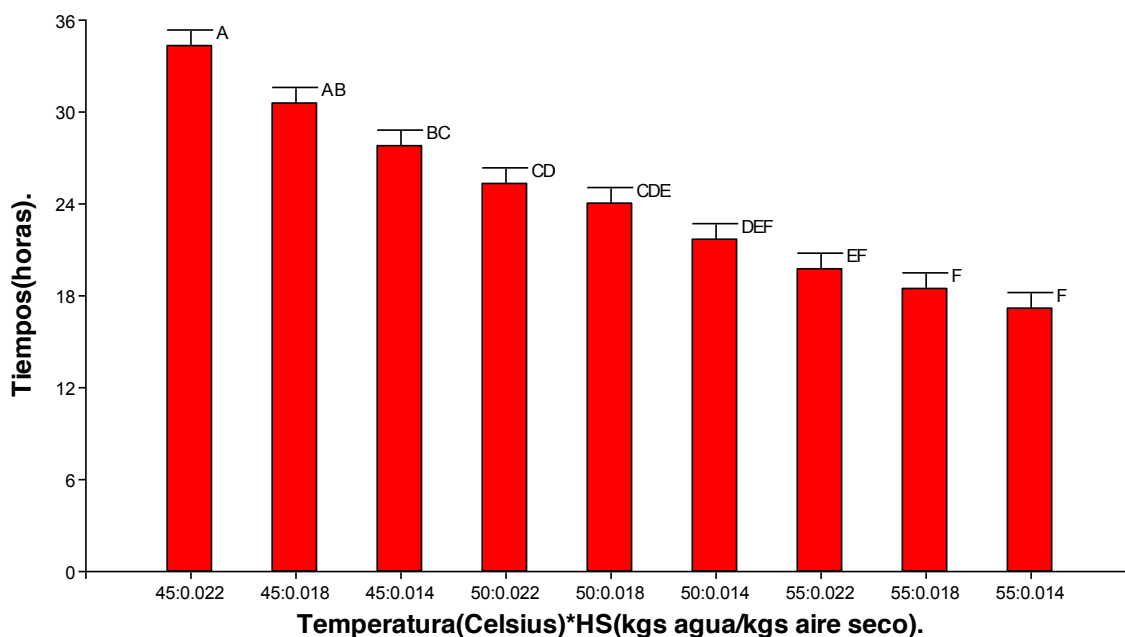


Figura 34. Análisis estadístico del efecto de la interacción de la temperatura y humedad específica del aire de secado en el tiempo de secado de café pergamino.

Con relación a los tres anteriores resultados estadísticos es preciso aclarar que los efectos de la temperatura y la HS, coinciden con la investigación y las conclusiones dadas por Burmester et al., (2009) quien afirma que la velocidad del proceso de secado está influenciada principalmente por la temperatura del aire de secado. En nuestro caso se puede ver bien definido el comportamiento de las tres temperaturas utilizadas y sus efectos. La temperatura del aire de secado debe aumentarse gradualmente pero teniendo en cuenta la sensibilidad del grano, para no afectar su calidad. Por otro lado, no recomienda un aumento en la velocidad del aire de secado porque se saturaría y no ayudaría a disminuir los tiempos de secado. El otro efecto importante es el de la

humedad relativa, al disminuirla en el aire de secado aunque mínima, va a tener una influencia en la reducción de los tiempos de secado. Lo anterior, se puede apreciar en los gráficos y diagramas.

5.5 ANÁLISIS CONSUMO DE ENERGÍA

La Tabla 6 presenta los resultados de los consumos de energía en kilovatios - hora (kWh), para los diferentes tratamientos investigados. El consumo de energía fue medido hasta que el contenido de humedad de la muestra (base húmeda) alcanzó el 12%. Se les aplicó un análisis de varianza a los datos obtenidos, con el fin de observar la presencia de diferencias significativas entre las TS y las HS.

Tabla 6. Consumo de energía (kWh), para diferentes tratamientos.

LOTE	HS.	Consumo energético (kWh).		
		TS = 45°C	TS = 50°C	TS = 55°C
2	0.014	9.51	9.18	8.75
	0.018	11.12	10.79	9.40
	0.022	14.07	10.98	9.58
3	0.014	10.43	9.45	8.96
	0.018	13.61	11.84	10.63
	0.022	13.90	12.10	11.24

La Figura 35 nos muestra los diferentes consumos de energía promediado por tratamiento. Se puede apreciar que, al igual que los tiempos de secado, los mayores consumos energéticos corresponden a la temperatura baja (TS = 45°C) y a la humedad específica alta (HS = 0.022). El consumo energético mayor fue de 13.9 kWh y el menor fue de 8.75 kWh.

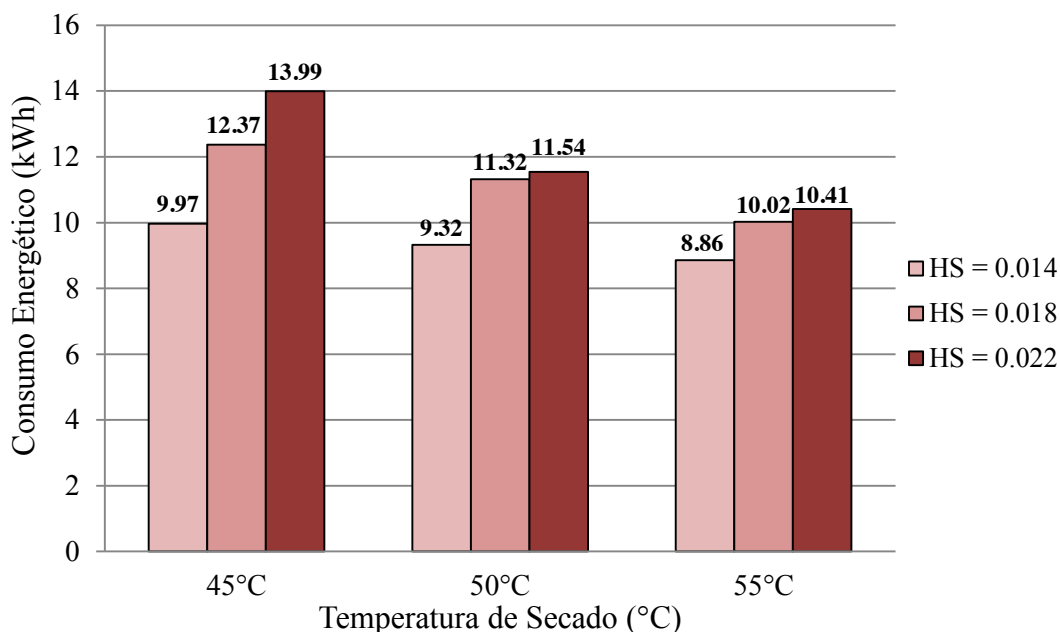


Figura 35. Consumo energía de secado café pergamino a diferentes HS. – Promedio Lotes.

Se puede notar que, los consumos para las tres temperaturas son mayores para la TS de 45°C. El efecto de aumentar la HS de 0.014 a 0.018 resulta en un consumo adicional de 2.4 kWh de energía, el cual representa un 24.1% de aumento para esa temperatura de secado. Mientras que, para aumentar la HS de 0.014 a 0.022 se encuentra un consumo adicional de 4.0 kWh, el cual representa un incremento del 40.3%. Bajo una TS de 50°C, el efecto de aumentar las HS de 0.014 a 0.018 y 0.022 aumenta el consumo en 2.0 y 2.3 kWh, lo que representa 21.5% y 23.8% respectivamente, teniendo en cuenta que el consumo total para 0.014 es 9.32 kWh. Para una TS de 55°C, el efecto de variar las HS de 0.014 a 0.018 y 0.022 gastan 1.16 y 1.55 kWh adicionales, lo que representa aumentos de 13.1 y 17.5% respectivamente.

En la Figura 36, se presentan los resultados obtenidos. En el diagrama se puede apreciar que no hay diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los consumos para las temperaturas de 45°C y 50°C. Tampoco, hay diferencias significativas entre los consumos de energía para las

temperaturas de 50°C y 55°C. Pero, si hay diferencias significativas entre los consumos de las temperaturas de 45°C y 55°C (extremas). El efecto de utilizar la temperatura baja en el secado, generó un mayor consumo de energía, el cual fue mucho menor, cuando se utilizó la temperatura más alta.

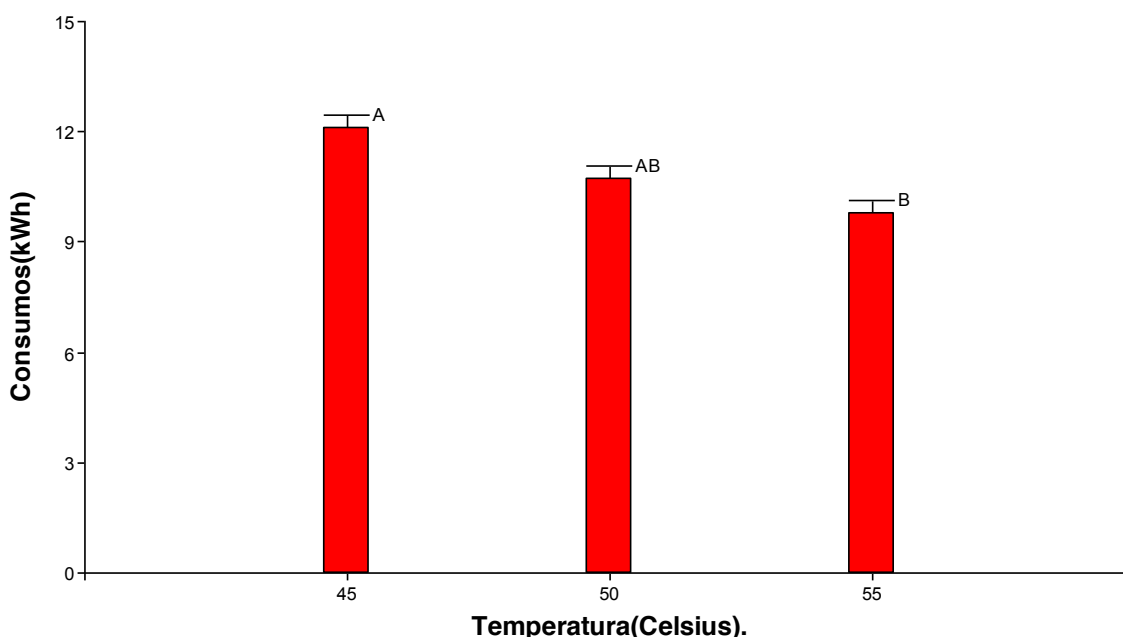


Figura 36. Análisis estadístico del efecto de la temperatura del aire de secado en el consumo energético de secado para café pergamino.

La Figura 37 deja ver los resultados correspondientes al análisis en particular de los consumos con respecto a las diferentes HS. El análisis de varianza para esta variable, indica diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los consumos de energía para los HS de 0.014 y los de 0.018 y 0.022. Pero no presentó diferencias significativas entre los consumos de los HS de 0.018 y 0.022. Esto se entiende al tener la letra A en la HS 0.014 y la letra B, para los HS de 0.018 y 0.022. El efecto de utilizar la HS menor generó un menor y muy diferente consumo, comparado con el efecto producido, cuando se utilizaron las dos HS más altas.

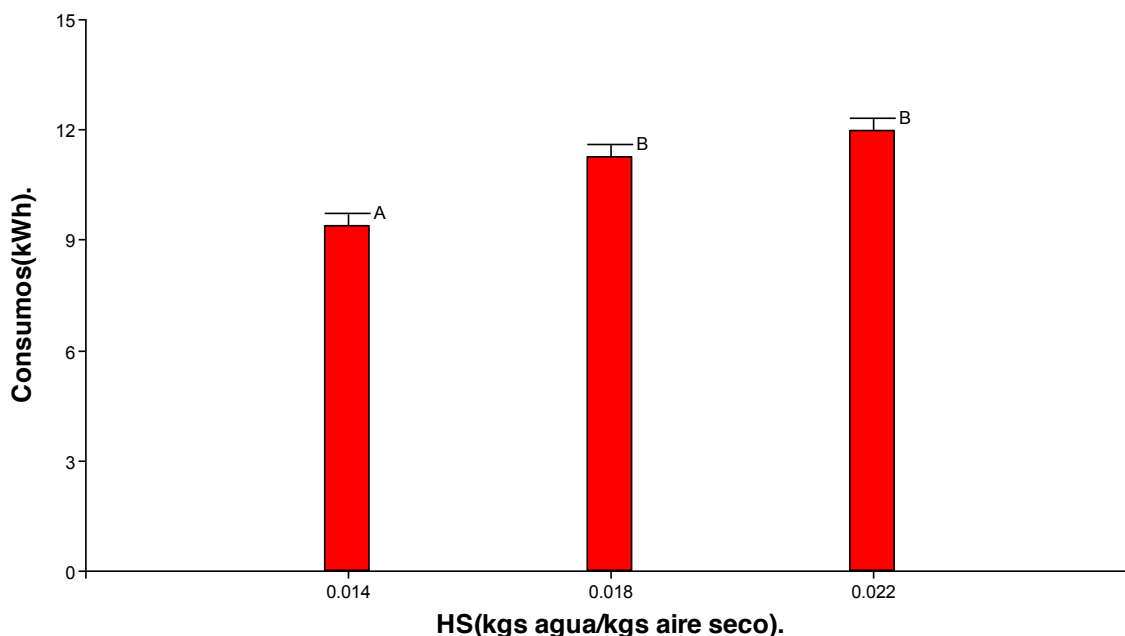


Figura 37. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el consumo energético de secado para café pergamino.

En la Figura 38 se observan los resultados del análisis estadístico del efecto de las humedades específicas sobre los consumos energéticos a temperatura de 45°C. Los resultados no expresan diferencias significativas entre los consumos a esa baja temperatura. En la Figura 39 se observan los resultados del análisis estadístico del efecto de las humedades específicas sobre los consumos a temperatura de 50°C. En los resultados se aprecia que no hay diferencia significativa entre los consumos para las diferentes HS usadas en esa temperatura.

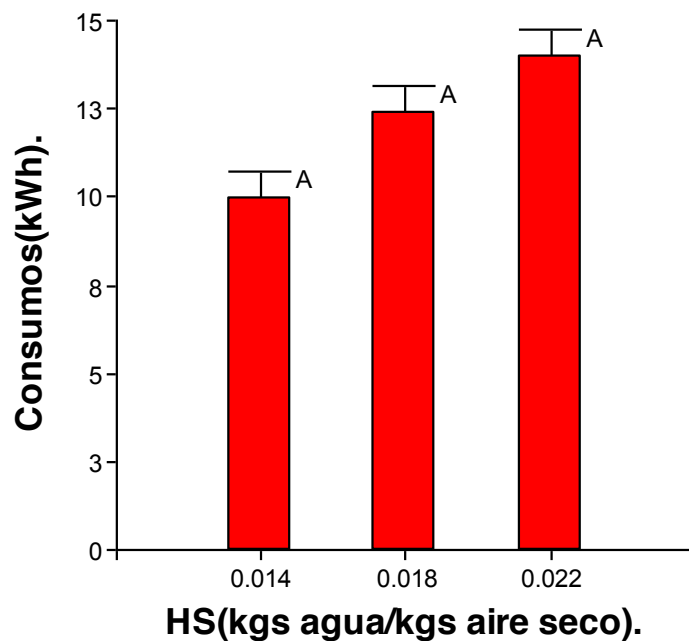


Figura 38. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el consumo energético para café pergamino a temperatura de secado de 45°C.

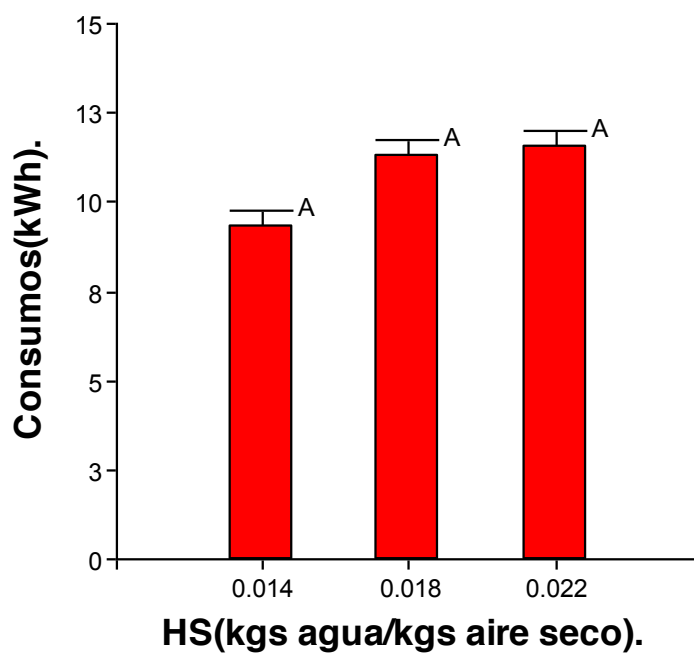


Figura 39. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el consumo energético para café pergamino a TS = 50°C.

En la Figura 40 se observan los resultados del análisis estadístico del efecto de las humedades específicas sobre los consumos energético a temperatura de 55°C. Los resultados expresan que no hay diferencia significativa entre los consumos de las diferentes HS usadas a esa temperatura. Para los tres análisis correspondientes a las tres temperaturas por separado presentan el mismo resultado. Es decir, que las HS no tienen un efecto significativo sobre los consumos de una misma temperatura y sólo se ve el efecto sobre ellos cuando se varía la temperatura de secado.

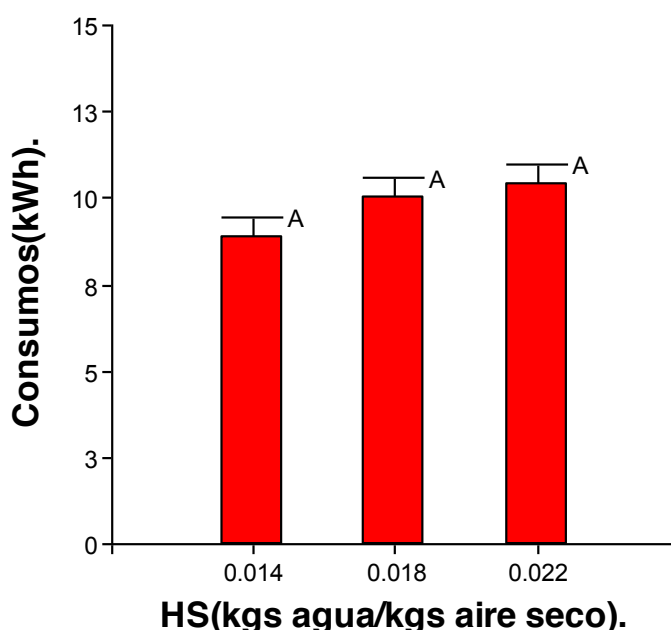


Figura 40. Análisis estadístico del efecto de la humedad específica del aire de secado en el consumo energético para café pergamino a temperatura de secado de 55°C.

La Figura 41 presenta los resultados obtenidos en el análisis de varianza de los consumos de energía con respecto a la interacción de las variables TS y HS utilizados en el secado de café en la investigación. Se pueden apreciar los resultados del análisis de varianza para la interacción de estas variables ($p \leq 0.05$), donde se presentan las diferencias y no diferencias significativas entre

los diferentes consumos analizados. En los casos del tratamiento 50°C y HS 0.018, al igual que al de la barra para 50°C y 0.022 HS se puede notar la presencia de tres letras diferentes en cada una.

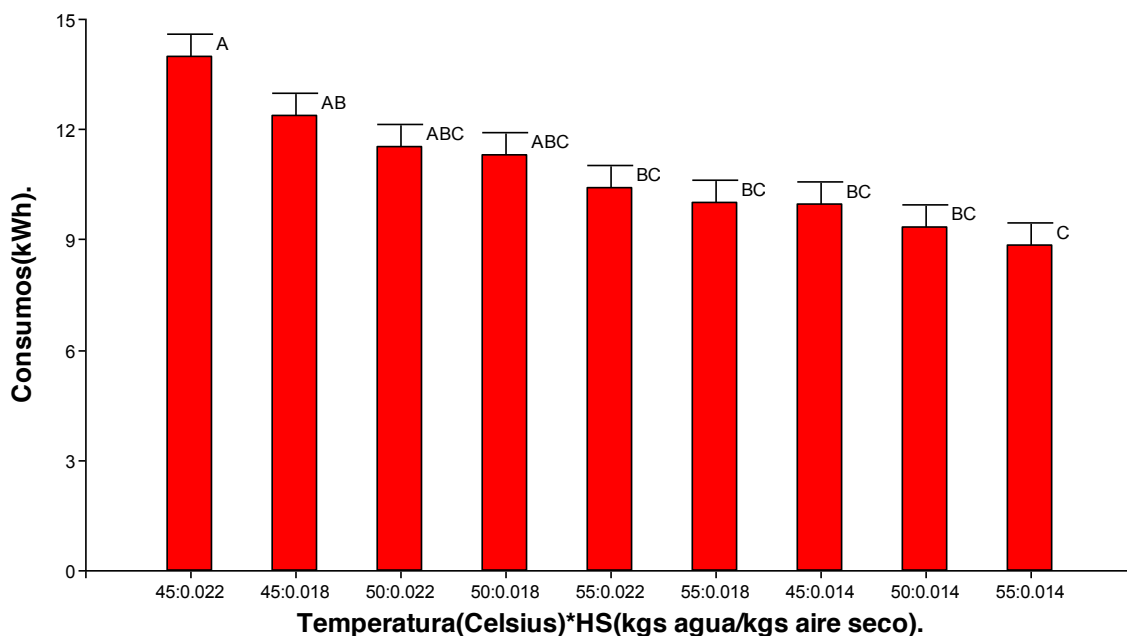


Figura 41. Análisis estadístico del efecto de la interacción de la temperatura y humedad específica del aire de secado en el consumo energético para café pergamino.

Las anteriores, son las dos interacciones que presentan menos diferencias significativas con otras interacciones y especialmente entre ellas dos no presentan diferencias significativas. Las mayores diferencias para los consumos se presentaron cuando, se utilizaron los tratamientos de los extremos del diagrama. Pero, cuando se utilizaron tratamientos de los ubicados en la parte central del gráfico, sus efectos sobre los consumos gastados no fueron muy diferentes.

Al observar lo anterior, se puede deducir que en los procesos de 45°C, los consumos aumentan porque se da un aumento en los tiempos de secado. Por el contrario, en los otros dos grupos de TS (50 y 55°C), los consumos se disminuyen porque se acortan los tiempos de proceso.

Para cada bloque de temperatura los consumos siguen el mismo orden con respecto a su HS, lo cual se encuentra directamente relacionado con el efecto causado por la presencia en menor o mayor cantidad de humedad en el flujo de aire de secado.

Según Afonso et al. (2001), en las gráficas obtenidas mediante simulación de modelos para café pergamino, las humedades no presentan efecto en el uso de las bajas temperaturas, pero sí en las altas temperaturas. Para su modelación, el estudio se realizó con humedades relativas de 30, 40, 50 y 60 % y las temperaturas de 30, 40, 50 y 60°C. Las humedades relativas utilizadas en el modelo están muy por encima de las condiciones ambientales y específicamente de Puerto Rico. En la Tabla 7, se muestra la humedad relativa equivalente a la humedad específica para cada tratamiento de esta investigación las cuales estuvieron en el rango de 14.2% a 36.2%.

Tabla 7. Tratamientos (TS, HS) y las humedades relativas necesarias para alcanzarlos.

Tratamientos		
TS(°C)	HS (kg agua/kg aire seco)	RH (%)
45	0.014	23.3
45	0.018	29.8
45	0.022	36.2
50	0.014	18.1
50	0.018	23.1
50	0.022	28.1
55	0.014	14.2
55	0.018	18.1
55	0.022	22.0

Los resultados obtenidos en la presente investigación dejan ver que las humedades específicas, si tienen efecto sobre las bajas temperaturas de secado y afectan significativamente los tiempos de secado y los consumos energéticos de los procesos de secado de café pergamino.

5.6 DETERMINACIÓN DE LA RAZÓN DE SECADO Y DE CONSUMO ENERGÉTICO

Los datos obtenidos de un proceso de secado experimental son normalmente obtenidos con M , que es la masa total del sólido húmedo (materia seca + agua) a diferentes tiempos (en horas) en un periodo de secado. Los datos pueden ser convertidos para expresarse como razón de secado. Lo primero es calcular el contenido de humedad base seca (X_s) mediante la ecuación:

$$X_s = \frac{M - M_s}{M_s} = \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de materia seca}} \quad (5.1)$$

Luego, se debe determinar el contenido de humedad de equilibrio (X^*) para las condiciones de secado constante y por último, el contenido de humedad libre (X) es calculado para cada valor. El contenido de humedad libre es el contenido de humedad por encima del contenido de humedad de equilibrio. Las unidades para X^* son kg humedad equilibrio/kg materia seca. Para el X las unidades son kg agua total/kg materia seca y se obtiene utilizando la siguiente ecuación.

$$X = X_s - X^* \quad (5.2)$$

Usando los datos calculados con la ecuación anterior se grafica el contenido de humedad libre en función de tiempo (Figura 42). Para obtener la curva de la razón de secado, se dibujan las pendientes de las tangentes para luego medirlas y obtener los valores de dX/dt a diferentes valores de t . Según la teoría (Geankoplis, 1993), la razón de secado se calcula con la ecuación:

$$R = -\frac{L_s}{A} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (5.3)$$

Donde R es la razón de secado en $\text{kg de agua}/(\text{hr} \cdot \text{m}^2)$, L_s es la materia seca en kg y A es el área de la superficie expuesta al secado en m^2 . El área de superficie expuesta en los experimentos realizados fue de 0.0645 m^2 . La masa de materia seca varió de acuerdo al contenido de humedad inicial de la muestra y estuvo en el rango de 0.86 kg a 0.90 kg .

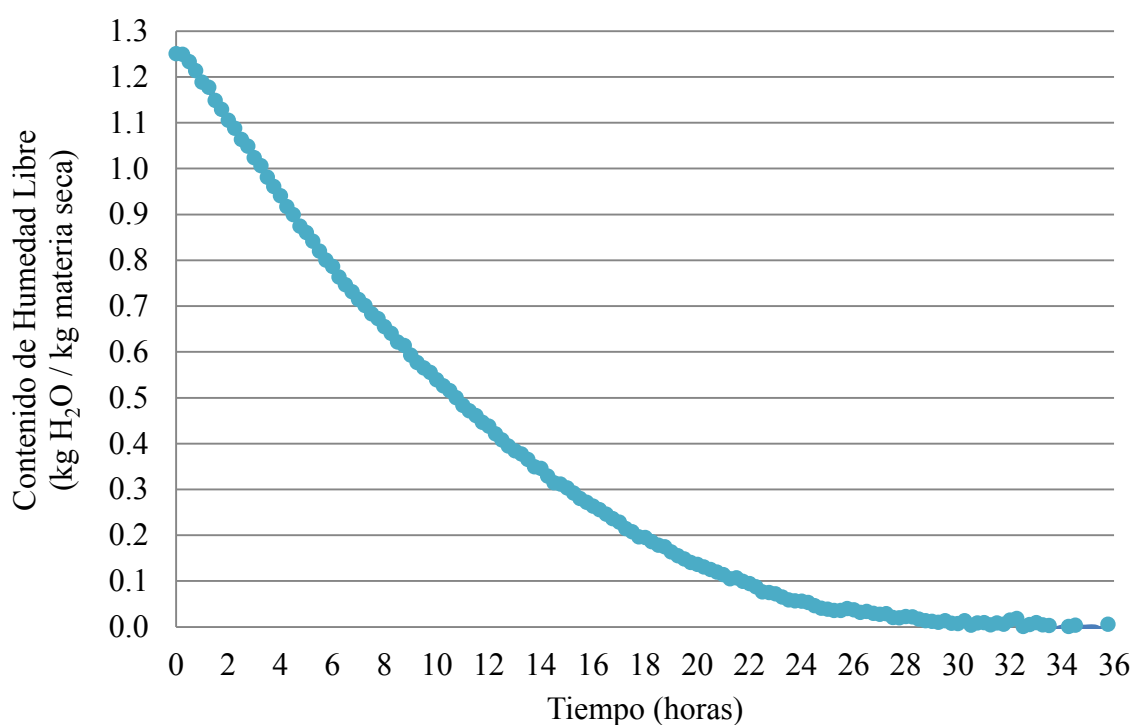


Figura 42. Comportamiento Prueba TS=50 y HS=0.018.

La Figura 43 muestra la curva de la razón de secado en función del contenido de humedad libre en la cual se puede observar el comportamiento de la razón constante y de caída del proceso de secado. La razón constante se determina asumiendo que se presenta una saturación adiabática y mediante la ecuación:

$$R_c = \frac{h}{\lambda_{\omega}} (T - T_{\omega}) \cdot (3600) \quad (5.4)$$

Donde R_c es la razón de secado en kg agua/h.m^2 , h es el coeficiente de transferencia por convección en $\text{W/m}^2 \text{ K}$ para flujo perpendicular al área de superficie, λ_{ω} es la entalpía del aire a temperatura de saturación en kJ/kg , T es la temperatura de bulbo seco en K y T_{ω} es la temperatura de bulbo húmedo en K .

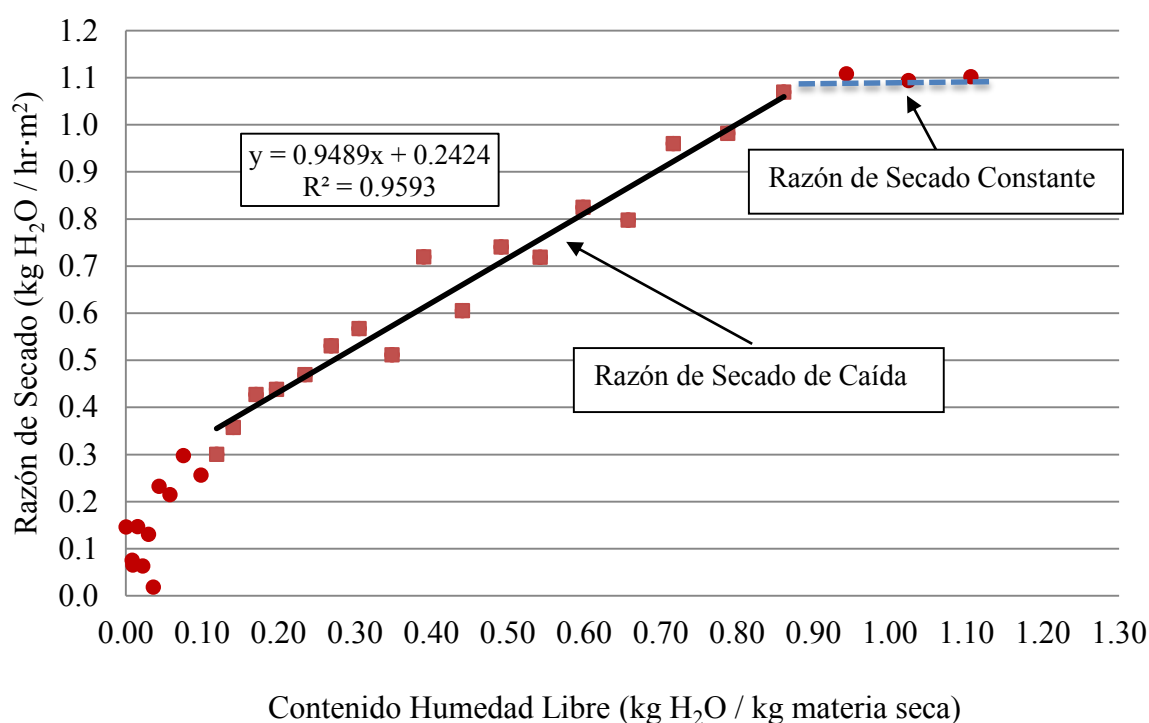


Figura 43. Curva de Razón de Secado para $TS = 50$ y $HS = 0.018$.

Para un flujo perpendicular a la superficie de secado, el valor de h se calcula con la ecuación $1.17G^{0.37}$, donde G corresponde a la velocidad de masa del aire en kg/h m^2 . Esta ecuación es válida para velocidades del aire entre 0.9 a 4.6 m/s (Geankoplis, 1993). Para determinar λ_{ω} , que es la entalpía del vapor a la temperatura de bulbo húmedo, en kJ/kg , se usa el diagrama psicométrico y las tablas de vapor. Se determinaron los R_c para cada tratamiento pero sus valores discreparon de

los obtenidos por el método gráfico. Esto se puede atribuir a que la velocidad del aire en los experimentos realizados fue de 0.17 m/s en promedio, la cual está por debajo del especificado por la ecuación para calcular el valor del coeficiente de transferencia.

Se utilizó el método gráfico para obtener los valores de la razón de secado constante para cada uno de los nueve tratamientos. El valor de R_c corresponde al identificado por la línea horizontal entrecortada en la Figura 43. La razón de secado de caída se determinó realizando una regresión lineal a la sección de la curva que va desde el final del periodo constante hasta un contenido de humedad libre de 0.13 porque este valor corresponde al 12% de contenido de humedad base húmeda del grano. El valor de la pendiente de la línea recta de la gráfica, según se muestra en la Figura 43, corresponde a la razón de secado de caída.

La razón de consumo energético se define como la cantidad de energía necesaria (kWh) para evaporar 1 kg de agua por cada kg de materia seca de la muestra ($kWh/(kg H_2O/kg m.s.)$). Las razones de consumo de secado para la etapa de secado constante y de caída se determinan utilizando la curva de consumo energético en función del contenido de humedad libre de la muestra según se ilustra en la Figura 44. Para determinar la razón de consumo energético, es necesario determinar los rangos de contenido de humedad libre de la etapa de razón de secado constante y la de caída. Usando de ejemplo el tratamiento de TS = 50 y HS = 0.018 (Figura 43), se puede observar que la razón de secado constante se encuentra entre $X=1.20$ y $X=0.85$ aproximadamente; la razón de secado de caída se encuentra entre $X=0.85$ y $X=0.10$ aproximadamente. Este procedimiento se utilizó para cada tratamiento del experimento en el Lote 2.

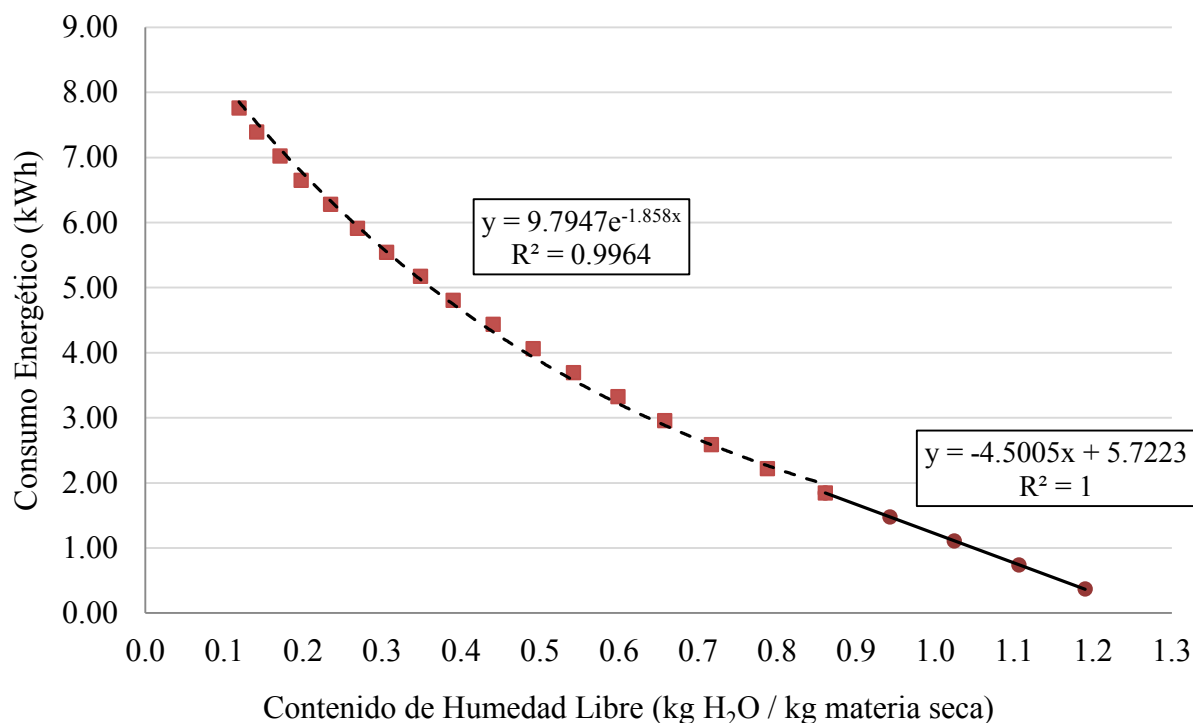


Figura 44. Consumo energético de la razón constante y de caída para prueba TS=50/HS=0.018 del Lote 2.

Una vez se establecen los rangos de X para cada etapa, se procede a realizar una regresión para cada una. La etapa de razón de secado constante utiliza regresión lineal y la etapa de secado de caída utiliza regresión exponencial según se observa en la Figura 44. El valor de la pendiente de la línea corresponde a la eficiencia de la etapa de razón de secado constante; el valor del exponencial de la curva corresponde a la eficiencia de la etapa de razón de secado de caída. La Tabla 8 resume los valores de la razón de secado y sus respectivas eficiencias energéticas para cada etapa.

En la Tabla 8 se puede observar que la razón de secado constante varía en un rango de 0.85 a 1.40 kgH₂O/h·m² en los tratamientos, sin embargo tiende a aumentar levemente conforme aumenta la temperatura de secado y disminuye la humedad específica del aire de secado. El mismo patrón tuvo la razón de secado de caída cuyos valores estuvieron en el rango de 0.64 a 1.18

$\text{kgH}_2\text{O}/\text{h}\cdot\text{m}^2$. Valores de razón de secado altos indican que el tratamiento remueve mayor cantidad de agua por unidad de tiempo y de área expuesta de secado.

Tabla 8. Valores de razones de secado constante y de caída con sus consumos para Lote # 2.

Tratamiento	Constante		De Caída	
	Razón de Secado	Razón de Consumo	Razón de Secado	Razón de Consumo
TS - HS	$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg m.s.}}$	$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg m.s.}}$
45 - 0.014	1.00	5.12	0.90	1.94
45 - 0.018	0.95	5.41	0.77	1.94
45 - 0.022	0.85	6.21	0.64	1.90
50 - 0.014	1.20	4.34	1.11	1.83
50 - 0.018	1.10	4.50	0.95	1.86
50 - 0.022	0.95	5.27	0.88	1.86
55 - 0.014	1.40	3.69	1.18	1.70
55 - 0.018	1.30	3.90	0.98	1.61
55 - 0.022	1.25	3.95	1.01	1.70

Al evaluar la razón de consumo de la etapa constante, se puede observar que utilizar temperaturas de secado altas (55°C) resulta en un consumo menor de energía para evaporar una cantidad similar de agua en la muestra de café pergamino que cuando se utilizan temperaturas bajas (45°C). Esto implica que para la primera parte del secado, resulta más eficiente utilizar temperaturas altas, independientemente de la humedad específica del aire. A pesar de que elevar la temperatura del aire a 55°C requiere mayor energía que elevarla a 45°C , al tener la razón de secado mayor, las temperaturas altas compensan en tiempo de secado y por ende en consumo energético. Es importante destacar que aunque las temperaturas altas reducen el consumo

energético, se debe cuidar el no exceder la temperatura del grano sobre los 50°C para no afectar su calidad.

Los valores de la razón de consumo en la etapa de caída no mostraron mucha variación con la temperatura y la humedad específica del aire. Esto indica que durante la segunda etapa de secado puede utilizarse temperaturas de secado más bajas para no afectar la calidad del grano.

5.7 ANÁLISIS ORGANOLÉPTICO

En la Tabla 9 se presenta la correspondencia de las variables TS y HS, para los 5 tratamientos utilizados para realizar los análisis sensoriales, con el objetivo de observar los efectos de las variables en la calidad del grano. Los tratamientos A, D, C y E corresponden a los tratamientos extremos en cuanto a TS y HS utilizados durante la investigación. El tratamiento B que fue el de temperatura de secado 50°C con humedad específica 0.018, por ser el valor medio de las variables bajo estudio.

Tabla 9. TS y HS para 5 tratamientos usados en el análisis sensorial.

Tratamientos	Temperatura (°C).	Humedad Específica (kg agua/kg aire seco)
A	55	0.014
B	50	0.018
C	45	0.014
D	55	0.022
E	45	0.022

Los datos estadísticos y resultados de los análisis sensoriales se encuentran el Apéndice C. Las pruebas sensoriales se le realizaron a los granos en tres estados: café pergamino seco, café pilado (café oro) y café tostado.

5.7.1 ANALISIS CAFÉ PERGAMINO SECO

En la Figura 45, se observan los granos de los 5 tratamientos utilizados para realizar las pruebas sensoriales. En la Tabla 10, se observan los resultados para la prueba efectuada al café pergamino seco. Se puede inferir que el tratamiento E fue el de mejor preferencia pero no fue significativamente diferente a C, D y B. Se puede notar que los tratamientos de $TS = 45$ presentan buena apariencia al igual que el tratamiento control y el de $TS = 55$ pero con una $HS = 0.022$. En cuanto al tratamiento A, se nota que su apariencia no fue aceptada por los panelistas y esto concuerda con sus condiciones de proceso, al provenir de una alta $TS = 55$ y un $HS = 0.014$, las que se consideran condiciones agresivas para secado de café.



Figura 45. Granos de café pergamino utilizados para las pruebas sensoriales.

Tabla 10. Resultados de sensorial a café pergamino.

Tratamiento	TSe/HSe	Rango	Grupos
E	45/0.022	139	c
C	45/0.014	125	bc
D	55/0.022	122	bc
B	50/0.018	113	bc
A	55/0.014	101	a

5.7.2 ANÁLISIS CAFÉ – PILADO (CAFÉ ORO)

Los resultados de esta prueba se encuentran consignados en la Tabla 11 y en la Figura 46, se observan los granos pilados usados para las pruebas sensoriales. Lo más relevante respecto ellos es que los tratamientos D, A, C y E reportaron mejor preferencia que el tratamiento B. Para este análisis sensorial, el tratamiento B corresponde al tratamiento control (TS 50 y HS 0.018). Por otro lado, el que presentó mejor preferencia fue el tratamiento D, que siguiendo la literatura no debería tener las mejores cualidades porque es producto de una alta temperatura, pero con una humedad específica alta.

Tabla 11. Resultados sensorial de granos pilados.

Tratamiento	TSe/HSe	Rango	Grupos
D	55/0.022	132	a
A	55/0.014	131	a
C	45/0.014	124	a
E	45/0.022	117	a
B	50/0.018	96	b

También, se observó que no hay diferencia significativa entre los 4 tratamientos diferentes al B, pero si hay diferencia significativa entre el B y los otros 4 tratamientos. De lo observado se deduce que, a pesar de ser el tratamiento B un grano de buena aceptación por ser de un tratamiento intermedio, una vez retirado su pergamino no presenta buena aceptación por parte de los

evaluadores. Lo que conlleva a asegurar que no se alcanza a percibir la influencia en la calidad del grano al evaluarlos sin el pergamino.



Figura 46. Granos pilados utilizados para las pruebas sensoriales.

5.7.3 ANÁLISIS CAFÉ TOSTADO

En la Figura 47, se observan los granos de café tostado utilizados para realizar las pruebas sensoriales. Los resultados de esta prueba se encuentran en la Tabla 12. Lo más importante respecto a los resultados es que no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos B, C, D y E, pero sí de estos con el tratamiento A. También, se observó que no hubo diferencia significativa entre C, D, E y A, pero sí hay de estos con B. Es decir, que la diferencia significativa solo se presentó entre B y A. El tratamiento B fue el de mejor aceptación y el de menor aceptación

fue A, lo cual concuerda con los resultados de los granos pergamino. Los evaluadores prefirieron todos los tratamientos menos el A.



Figura 47. Granos de café tostado utilizados para las pruebas sensoriales.

Tabla 12. Resultados sensorial de café tostado.

Tratamiento	TSe/HSe	Rango	Grupos
B	50/0.018	134	a
C	45/0.014	122	ab
D	55/0.022	122	ab
E	45/0.022	116	ab
A	55/0.014	106	b

Por lo que se observó en los resultados, los granos de café tostado no se afectan por los distintos tratamientos del estudio y solo en una menor medida en el tratamiento A (TS 55, HS 0.014), condiciones que se consideran agresivas para secar grano de café. Estos resultados

concuerdan con los obtenidos al evaluar los granos con pergamino, donde el tratamiento A es el que los evaluadores no prefieren y tiene su explicación en sus condiciones de tratamiento. Es necesario aclarar, que en el caso del tostado se tuvieron en cuenta aspectos como el aroma, la presencia de partículas aceitosas en el grano y los demás parámetros que se analizaron en los granos pilados y sin pilar.

Se puede anotar respecto a los tres análisis anteriores que la calidad se afecta por el uso de temperaturas por arriba de $TS = 50$, ya que como se observa y concuerda con los resultados, para los panelistas en general, los granos tratados a $TS = 55$ no fueron de su agrado.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

De la investigación se pueden expresar las siguientes conclusiones:

- Se construyó y validó un secador para café pergamino tipo laboratorio, con el cual se simularon las condiciones ambientales de Puerto Rico, referentes a temperatura y humedad específica de secado. El secador tiene la capacidad de monitorear continuamente el contenido de humedad de la muestra sometida a proceso de secado, en función de la pérdida de peso. Las temperaturas de secado de los experimentos (45, 50 y 55°C) se mantuvieron durante las pruebas con rangos de variación de ± 0.5 °C. La humedad específica del aire de secado (0.014, 0.018 y 0.022 kg agua/kg aire seco) se mantuvo durante los experimentos con un rango de variación de ± 0.0005 kg agua/kg aire seco.
- La temperatura de secado (TS) tuvo un efecto significativo en el tiempo que tardó la muestra de café pergamino en alcanzar un contenido de humedad de 12%. A medida que se aumentó la temperatura, los tiempos de secado disminuyeron. Se concluye que para el flujo utilizado en el experimento, aumentar la temperatura de secado, reduce el tiempo del proceso.
- La temperatura de secado (TS) presentó un efecto significativo en el consumo energético del proceso para alcanzar el contenido de humedad de 12% solamente para los niveles extremos de 0.014 y 0.022. Siendo TS = 50°C la temperatura máxima que debe alcanzar el grano, el aumentar la temperatura de secado a 55°C no tiene efecto significativo en el consumo energético. Se concluye que para el flujo utilizado en el experimento, no resulta adverso para el consumo energético elevar la temperatura a 55°C. Sin embargo, se debe evitar que el grano exceda los 50°C.
- La humedad específica del aire de secado (HS) presentó un efecto significativo en los tiempos de proceso para alcanzar el contenido de humedad de 12% solamente para los niveles extremos de 0.014 y 0.022. Siendo HS = 0.018 la condición climatológica más común, el reducir la humedad específica a 0.014 no tiene efecto significativo en el tiempo de secado. Se concluye que para el flujo utilizado en el experimento, no resulta costo-efectivo remover la humedad del aire de secado para reducir el tiempo.

- La humedad específica del aire de secado (HS) presentó un efecto significativo en el consumo energético del proceso para alcanzar el contenido de humedad de 12% solamente para el nivel de 0.014. Los niveles de 0.018 y 0.022 no mostraron diferencia significativa en el consumo. Siendo $HS = 0.018$ la condición climatológica más común, el reducir la humedad específica a 0.014 tendría un efecto significativo positivo al reducir el consumo energético de secado.
- La razón de consumo para la etapa constante fue menor al utilizar temperaturas de secado altas (55°C) que cuando se utilizan temperaturas bajas (45°C). Esto implica que para la primera parte del secado, resulta más eficiente utilizar temperaturas altas, independientemente de la humedad específica del aire. A pesar de que elevar la temperatura del aire a 55°C requiere mayor energía que elevarla a 45°C , al tener la razón de secado mayor, las temperaturas altas compensan en tiempo de secado y por ende reducen el consumo energético.
- Los valores de la razón de consumo en la etapa de caída no mostraron mucha variación con la temperatura y la humedad específica del aire. Esto indica que durante la segunda etapa de secado puede utilizarse temperaturas de secado más bajas para no afectar la calidad del grano.
- La evaluación organoléptica y estadística de los granos de café determinó que hay un claro efecto de las temperaturas de secado y las humedades específicas, sobre la calidad de los tres grupos de granos estudiados. En los resultados de los análisis de los granos de café pergamino seco, pilados y tostados, los panelistas expresaron que los granos procesados a temperaturas altas y humedades específicas bajas no contaron con su preferencia. Se puede concluir que utilizar temperaturas de secado altas afecta negativamente la preferencia visual de los granos.

CAPÍTULO 7. RECOMENDACIONES

Con el ánimo de aportar en el presente campo del secado de café pergamino en Puerto Rico, se proponen futuros estudios donde se aproveche el uso del secador tipo laboratorio construido en la presente investigación:

- Estudiar el efecto de variar la velocidad de flujo del aire de secado utilizando diferentes niveles de HS para observar su incidencia en los tiempos de secado, en los consumos de energía y la calidad.
- La realización de estudio para secado de café pergamino, variando la inversión de flujos ya que el equipo cuenta con un sistema adecuado para ese fin y en la presente investigación a pesar de hacer diferentes pruebas involucrando esa variable no se tomó en cuenta.
- Realizar estudios para secado de café pergamino involucrando diferentes alturas de la capa de grano, para ver su efecto en la eficiencia y consumo energético.
- Estudios combinando diferentes temperaturas y HS pero durante el mismo proceso de secado.
- Realizar investigaciones a procesos de secado para otro tipo de alimentos como por ejemplo cereales y frutas, para los cuales el equipo debe comportarse eficientemente.
- Cambiar la tubería de PVC del equipo de secado por una de metal resistente a corrosión que permita realizar pruebas a mayores temperaturas.

BIBLIOGRAFÍA

- Afonso Junior, P.C.; Correa, P.C.; Queiroz, D. 2001. Thin Layer Drying Equations for Natural Coffee and Parchment Coffee. The Society for Engineering in Agricultural, Food and Biological Systems. Paper Number 01-6026. Sacramento, California.
- Afonso Junior, P.C.; Correa, P.C.; Queiroz, D. 2007. Aerodynamic Properties of Coffee Cherries and Beans. Biosystems Engineering. N°98. Pages 39 – 46.
- Agullo, J. N.; Marenza, M. O. 2005. Airflow Resistance of Parchment Arabica Coffee. Biosystems Engineering. 91(2), 149-156.
- American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). 2011. Standards and Practices Data: Psychrometric Data. ASAE D271. 2 Apr 1979 (R2010). Pages 22-29.
- Anacafé. 2005. Manual de Beneficiado Húmedo del Café. www.anacafe.org
- Bennamoun, L.; Belhamri, A. 2003. Design and Simulation of a Solar Dryer for Agricultural Products. Journal of Food Engineering. N° 59. pp 259 – 266.
- Bennamoun, L.; Belhamri, A. 2008. Mathematical Description of Heat and Mass Transfer during Deep Bed Drying: Effect of Product Shrinkage on Bed Porosity. Applied Thermal Engineering # 28. Pages. 2236 – 2244.
- Berbert, P.A.; Queiroz, D.M.; Silva, J.S.; Pinheiro, J.B. 1994. Simulation of Coffee Drying in a Fixed Bed with Periodic Airflow Reversal. Journal Agricultural Engineering Research. N° 60. 167 – 173.
- Berbert, P.A.; Queiroz, D.M.; Silva, J.S.; Pinheiro, J.B. 1994. Drying of Coffee (*Coffea Arabica L.*) in fixed Bed with a Simulated Periodic Airflow Reversal. Journal Agricultural Engineering Research. N°59 . 195 – 202.
- Borem, F. M.; Marquez, E M.; Alves, E. 2008. Ultrastructural Analysis of Drying Damage in Parchment Arabica Coffee Endosperm Cells. Biosystems Engineering. Vol. 99, Issue, pp 62-66.
- Boyce, D.S. 1967. Further Investigation into Single – Stage Drying of Parchment Coffee. Journal Agricultural Engineering Research. N° 12(2). pp 115 – 118.
- Burmester, K.; Eggers, R. 2009. Heat and Mass transfer during the Coffee Drying Process. Journal of Food Engineering. # 99. Pag. 430 – 436.

- Chandrasekar, V.; Viswanathan, R. 1999. Physical and Thermal Properties of Coffee. Journal Agricultural Engineering Reserch. # 73. Pag. 227 – 234.
- Ciro-Velásquez, H. J.; Abud-Cano, L. C.; Pérez-Alegría, L. R. 2010. Simulación Numérica de Secado de Café en Capa Delgada usando Volúmenes de Control. Dyna # 163. Pag. 270 – 278.
- Ciro-Velásquez, H.J. 2000. Secado de Café en Capa Profunda con Inversión Periódica de Flujo. Tesis Maestría Ingeniería Mecánica. Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.
- Correa, P. C.; Queiroz, D. M.; Afonso, P.C. 2001. Equilibrium Moisture content for Natural Coffee and Parchment Coffee. The Society for Engineering in Agricultural, Food and Biological Systems. Paper Number 01 – 6025. Sacramento, California.
- Correa, P. C.; Resende, O.; Meneses Ribeiro, D. 2006. Drying Characteristics and Kinetics of Coffee Berry. Revista Brasileira de Agroindustriais. Campina Grande. V 8, n 1,p. 1-10.
- Departamento de Agricultura de Puerto Rico. Oficina de Estadísticas Agrícolas.2010. Anuario 2010. Tabla 26.
- Equipos y Laboratorios de Colombia, S.A.2013. Manual de Funcionamiento de Psicrómetros. www.equiposylaboratorios.com
- Espinosa, E.; Flores, I. 2011. Evaluación del Pre-secado de Café Pergamino en Pre-secadores solares tipo Domo. Tesis Universidad Nacional de Ingeniería. Sede Norte. Nicaragua.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Fedecafé). 2004. Defectos del Café. Manual de Compras Para Pergamino con Factor de Rendimiento. www.fedecafe.com.co
- Flórez Ortega, C. 2011. Informe Empresa del Café 2011 – 2012. Colegio Ciencias Agrícolas. Estación Experimental Agrícola Rio Piedras, Puerto Rico.
- Gautz, L.; Nelson, B. 2006. Energy and Economy Effectiveness of a Dehumidifier for Small Scale Coffee Drying. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Paper Number 061145. Portland Oregon.
- Geankoplis, Cristie J. 1993. Transport Processes and Unit Operations. Third Edition. Prentice Hall. New Jersey. U.S.A.
- Guimaraes, A.C.; Berbert, P.A.; Silva, J.S. 1998. Ambient – Air Drying of Pre – Treated Coffee (*Coffea Arabica L.*). Journal Agricultural Engineering Research. Nº 69. pp 53 – 62.
- Hernández-Díaz, W. N.; Ruiz-López, I.; Salgado-Cervantes, M. A.; Rodríguez-Jiménez, A.; García-Alvarado, M. A. 2008. Modeling Heat and Mass Transfer during Drying of Green

- Coffee Beans Using Prolate Spheroidal Geometry. *Journal of Food Engineering*. Vol 86, Issue 1, pp 1-9.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2010. Guía Técnica para el Beneficiado de Café protegido bajo una indicación Geográfica. Litografía Impresa. Guatemala. www.iica.int
- Loewer, Otto J.; Briggles, Thomas C.; Bucklin, Ray A. 1994. On-Farm Drying and Storage Systems. ASAE.
- López Fontal, E. 2006. Secado de Café en Lecho Fluidizado. *Ingeniería e Investigación*. Vol. 26, 001, pp 25-29. Bogotá-Colombia.
- McQuiston, F.C.; Parker, J.D. 1994. Heating, Ventilating and Air Conditioning Analysis and Design. 4th Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. pp 53-55.
- Medrano, S. 2003. La guía Met As, Laboratorio de Metrología, S.A. de C.V. Medición Humedad Relativa con Psicrómetro. Septiembre 2003, # 09 2e. México.
- Mendonca, J.; Franca, A.; Oliveira, L. 2007. A Comparative Evaluation of Methodologies for Water Content Determination in Green Coffee. *LWT* # 40. Pag. 1300 – 1303. www.elsevier.com/locate/lwt
- Ministerio De Agricultura y Ganadería de Costa Rica. 2010. Manual de Buenas Prácticas de Manufactura en el Bio-Beneficio del Café Oro de Tarrazú. Pág. 8.
- Monroig Inglés, M.F. Ecos del Café. <http://academic.uprm.edu/mmonroig/>. Beneficiado del Café.
- Montoya, E.C. 1989. Optimización Operacional del Secador Intermitente de Flujos Concurrentes para Café Pergamino. Tesis Investigación de Operaciones. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Industrial. Pág. 161. Colombia.
- Orozco Hincapié, C .A.; Bedoya Loaiza, F. 2007. Calculo del Flujo Másico y caudal de aire para un Ventilador Utilizado en Silos para Secado de Café. *Sciencia et Technica*. Año XIII, N°35.
- Parra-Coronado, A.; Roa-Mejía, G.; Oliveros-Tascón, C. 2008. SECAFE I. Modelamiento y Simulación Matemática en el Secado Mecánico de Café Pergamino. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 12, n 4, pp. 415-427.
- Parra-Coronado, A.; Roa-Mejía, G.; Oliveros-Tascón, C. 2008. SECAFE II. Recomendaciones para el Manejo Eficiente de los Secadores Mecánicos de Café Pergamino. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 12, n 4, pp. 488-434.

- Pérez-Alegría, L. R.; Ciro-Velázquez, H. J.; Abud, L.C. 2001. Physical and Thermal Properties of Parchment Coffee Bean. American Society of Agricultural Engineers. # 44. Pag. 1721 -1726.
- Potter, N.N.; Hotchkiss, J.H. 1997. Food Science. Fifth Edition. Chapman and Hall. New York. Pág.201.
- Puerta Quintero, Gloria. 1999. Influencia del Proceso de Beneficiado en la Calidad del Café. Cenicafé 50(1): 78 – 88. Colombia.
- Queiroz, D.; Correa, P.C.; Afonso, P.C. 2001. Intermittent Coffee Drying Simulation Models. The Society for Engineering in Agricultural, Food and Biological Systems. Paper Number 01 – 6027. Sacramento, California.
- Ramírez-Martínez, A.; Benet, J.C.; Cherblanc, F.; García-Alvarado, M.A.; Rodríguez-Jiménez, G. 2010. Internal Structure and Water Transport in the Coffee Bean. 17th International Drying Symposium. Germany.
- Restrepo, A. H.; Burbano, J. C. 2005. Disponibilidad Térmica Solar y su Aplicación en el Secado de Granos. Scientia et Technica. Año XI, N° 27. ISSN 0122-1701. (Tesis).
- Roa, G. 1999. Beneficiado Ecológico del Café. Primera Edición. CENICAFE. Chinchiná, Colombia.
- Ruiz-López, I.I.; Martínez-Sánchez, C.E.; Cobos-Rivaldo, R.; Herman-Lara, E. 2008. Mathematical Modeling and Simulation of Bath Drying of Foods in Fixed Beds with Airflow Reversal. Journal of Food Engineering # 89. Pag. 310 – 318..
- Sampaio, C.P.; Nogueira, R.M.; Roberto, C.D.; Silva, J.S. 2007. Development of a Dryer with Airflow Reversal and a Pneumatic System for Grain Movement. Biosystems Engineering # 98. Pag. 33 – 38.
- Sfreda, M.A.; Finzer J.R.D.; Limaverde J.R. 2005. Heat and Mass Transfer in Coffee Fruits Drying. Journal of Food Engineering. # 70 pag. 15 – 25.
- Singh, R.P.; Heldman, D. 2009. Introduction to Food Engineering. Fourth Edition. Academic Press. Elsevier Inc. China.
- Sivetz, M.; Desrosier, N. 1979. Coffee Technology. AVI publishing company. Westport, Connecticut. Pag. 133.
- Srivastava, V.K.; John, J. 2002. Deep Bed Grain Drying Modeling. Energy Conversion and Management # 43. Pag. 1689 – 1708.

- Toledo, Romeo T. 1991. Fundamentals of Food Process Engineering. Second Edition. Chapman and Hall. New York, U.S.A.
- Valentas, Kenneth J.; Rotstein, Enrique.; Singh, R Paul.1997. Handbook of Food Engineering Practice. CRC Press. New York, U.S.A.
- Vernier. 2010. Vernier Software and Technology. Default Calibration for the Relative Humidity Sensor. www.vernier.com
- Vicente-Chandler, J.; Abruña, F.; Silva, S. 1984. Experimentación y su aplicación al cultivo intensivo del café en Puerto Rico. Universidad de Puerto Rico- Mayagüez. Estación Experimental Rio Piedras. Boletín 273.

APÉNDICES

Apéndice A. Manual del Equipo

MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DE SECADOR CON HUMIDIFICADOR DE AIRE PARA MONITOREAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CAFÉ PERGAMINO.

1. Chequeos y operaciones previas al arranque.

1.1. Sistema Hidráulico.

1.1.1. Posicione el tanque de agua, debajo de las tuberías de p.v.c, de retorno de agua de la bomba y del humidificador.

1.1.2. Llene el tanque con agua limpia hasta por lo menos $\frac{3}{4}$ partes de su volumen.

1.1.3. Coloque en su interior, la manguera con la válvula de succión de la bomba y el detector termoresistivo para la lectura de la temperatura del agua.

1.1.4. Abra la válvula de llave que se usa para regular la presión, la cual se encuentra frente al humidificador.

1.1.5. Abra completamente la válvula de llave colocada en la parte inferior del humidificador.

1.1.6. Deje abierta por lo menos, una de las dos válvulas de llaves de los pisteros.

1.2. Sistema de flujo de Aire.

1.2.1. Acople el medidor de flujo y temperatura, al cable de su terminal instalado en la parte final de la tubería de aire.

1.2.2. Oprima el botón **ON** y seleccione las unidades para las mediciones.

1.2.3. Posicione como abiertas las dos esclusas correspondientes a la entrada de aire por la parte inferior y mantenga cerradas las dos esclusas utilizadas para la entrada de aire por la parte superior.

1.2.4. Asegure las posiciones de las esclusas, apretando los tornillos fijadores.

1.2.5. Instale y ponga en funcionamiento el des-humidificador de aire cerca a la succión del ventilador. Posicione la manga por debajo del nivel de desagüe del equipo.

1.3. Horno (Cámara) de Secado.

1.3.1. Coloque la canastilla vacía y el marco adjunto, en la parte inferior de la bandeja.

1.3.2. Fije con los tres pasadores y verifique que estos entran también en los orificios de la parte trasera de la bandeja.

1.3.3. Cierre el horno (Cámara) con su tapa frontal y asegure su hermeticidad apretando los tornillos mariposas.

1.3.4. Cierre las puertas del gabinete.

2. Inicio del Programa (Pre-Calentamiento del Equipo).

2.1. Pase a posición **ON** los multi-conectores de corriente eléctrica.

2.2. Prenda la Computadora, abra el programa y llegue hasta el diagrama de este.

2.3. De la orden de **RUN** al programa.

2.4. Introduzca los datos de % de contenido de humedad inicial del grano (previamente obtenido mediante análisis de % de contenido de humedad en balanza analizadora de humedad) y % de contenido de humedad final deseado. Confirme, dando **ACEPTAR**.

2.5. Escriba los datos de temperatura de secado (TS) en °C, humedad específica (HS) de entrada en lbs.agua/lbs.aire seco y el tiempo de inversión del flujo de aire en minutos.

- 2.6. Adicione un valor de tres dígitos (grs) en el icono **Masa para Tara**, para ayudar a la ejecución del programa.
- 2.7. Accione **ON** inmediatamente, los interruptores del ventilador de aire y los de las dos resistencias. A continuación, verifique y fije las intensidades de trabajo deseadas.
- 2.8. Espere que el equipo alcance la temperatura de secado programada.
- 2.9. Active el control de humidificación en el programa y accione el interruptor de arranque de la bomba. Regule la presión del sistema con la ayuda de la válvula de llave, para lograr el HS programado.
- 2.10. Verifique la estabilización de las condiciones programadas para el equipo.
- 2.11. Abra el gabinete, quite la tapa frontal del horno (cámara), saque los pasadores y retire el marco, así como la canasta vacía.
- 2.12. Cargue el grano, previamente pesado en la canasta y conforme una capa uniforme con respecto a su altura.
- 2.13. Monte nuevamente la canasta con grano, tal como se describe en los pasos 1.3.1 al 1.3.4.
- 2.14. Valla al programa y verifique que el peso concuerde con lo colocado en la bandeja. De no ser así, reste o sume a la cifra colocada en el icono **Masa para Tara**.
- 2.15. Dé unos minutos al equipo para que se recupere la temperatura de secado, así como las demás condiciones y ordene con un clic: **INICIAR PROCESO**.

3. Durante el proceso de secado.

- 3.1. Verifique las condiciones del proceso en la pantalla del diagrama.
- 3.2. Tome lectura del anemómetro y de ser necesario, corrija el flujo de aire del sistema, regulando el controlador del ventilador.

- 3.3. Lea la presión de trabajo del sistema hidráulico y de ser necesario, ajuste con la válvula de llave de control de presión del sistema.
- 3.4. Verifique el funcionamiento de las boquillas y sus electroválvulas.
- 3.5. Lea la temperatura del agua, si pasa de 40°C, cambie por agua de la llave o utilice hielo para disminuirla.
- 3.6. Verifique las condiciones de trabajo del des-humidificador de aire, si se observa congelación en la parte posterior, apague por unos minutos y prenda nuevamente.
- 3.7. Haga los cambios de dirección del flujo. Accione manualmente las esclusas de control de aire y posteriormente, vaya al diagrama del programa para confirmar con un clic en **CAMBIO DE FLUJO**. Por ejemplo, si el flujo entra por la parte superior (**TOP**), las dos esclusas marcadas con **TOP**, deben estar abiertas y las dos esclusas marcadas con **SIDE**, deben permanecer cerradas.
- 3.8. Verifique la terminación del secado, al observar en el diagrama parpadear en color rojo el icono **FINALIZADO**. Posteriormente, ordene **STOP** al programa, para detener la obtención de datos.

4. Finalizado el Secado.

- 4.1. Apague bomba, coloque en **OFF** el interruptor de esta para detener el sistema de humidificación de aire.
- 4.2. Pase a **OFF** los interruptores de los reguladores de las resistencias.
- 4.3. Apague el equipo de des-humidificar aire.
- 4.4. Retire la canasta con el grano seco y el marco (soporte) inferior, de acuerdo al numeral 2.11. Pese el grano, para verificar o comparar con los datos de peso final, guarde en una

bolsa plástica, cierre y rotule (identifique). Posteriormente, corrobore el % de contenido de humedad final por análisis en balanza analizadora de humedad.

- 4.5. Espere aproximadamente 20 minutos para enfriar el sistema y apague el ventilador del secador.
- 4.6. Cierre el programa, apague la computadora y apague los multi-conectores de energía.
- 4.7. Asegure los componentes del gabinete y cierre este.
- 4.8. Retire la manga de la bomba y el detector termoresistivo del tanque. Desocupe el agua del tanque.

Apéndice B. Procesamiento de Datos (ANOVA)

1. Tiempos de Secado (ascendente).

Nueva tabla: 3/28/2013 - 10:18:28 AM

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Tiempos.	27	0.93	0.90	7.54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	794.02	8	99.25	29.49	<0.0001
Temperaturas.	699.62	2	349.81	103.93	<0.0001
H.R.	81.28	2	40.64	12.07	0.0005
Temperaturas.*H.R.	13.12	4	3.28	0.97	0.4458
Error	60.58	18	3.37		
Total	854.60	26			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=2.20720

Error: 3.3657 gl: 18

Temperaturas.	Medias	n	E.E.	
55.00	18.44	9	0.61	A
50.00	23.67	9	0.61	B
45.00	30.86	9	0.61	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=2.20720

Error: 3.3657 gl: 18

H.R.	Medias	n	E.E.	
0.014	22.19	9	0.61	A
0.018	24.33	9	0.61	A B
0.022	26.44	9	0.61	B

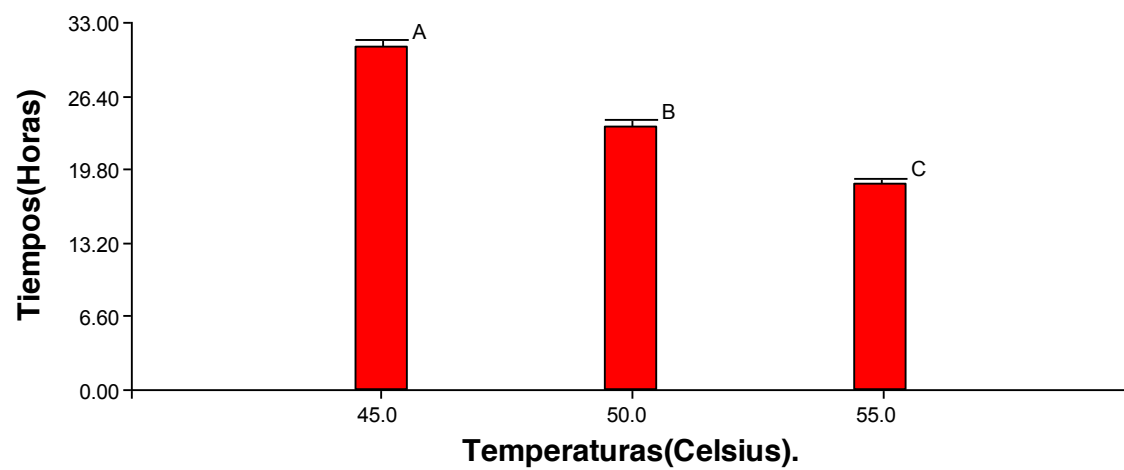
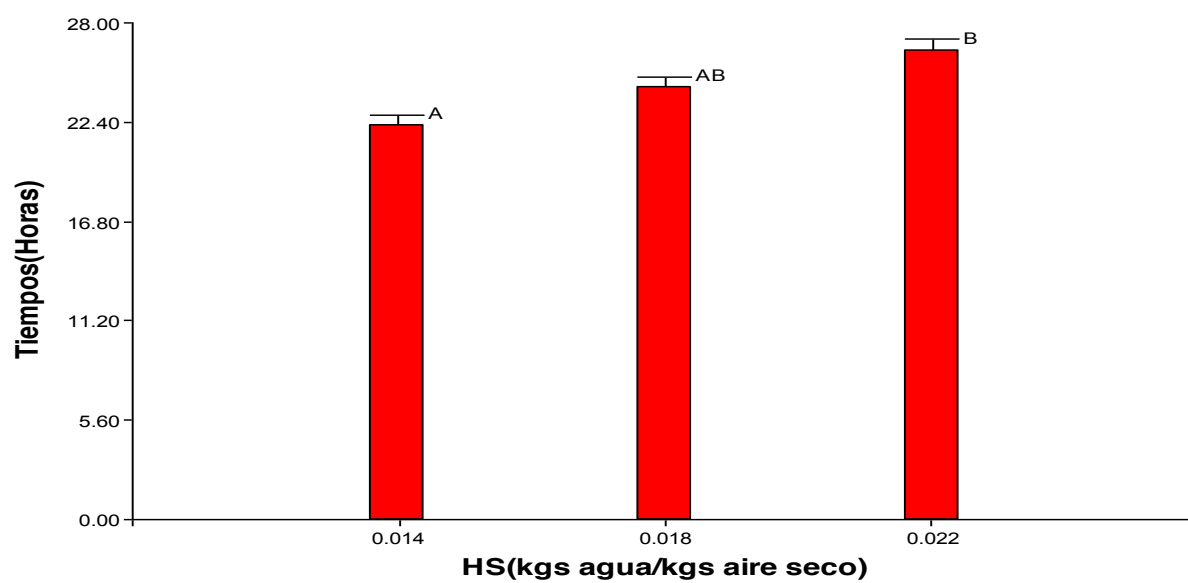
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=5.24858

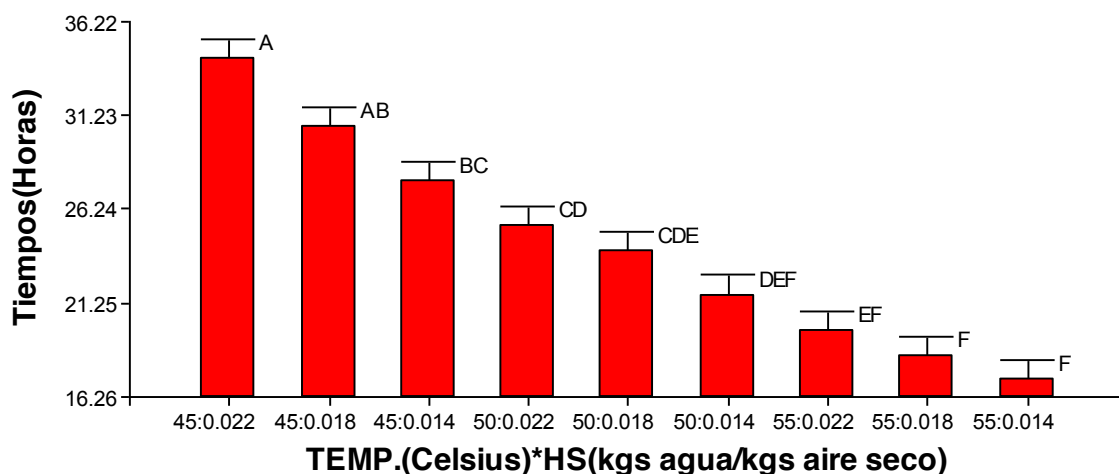
Error: 3.3657 gl: 18

Temperaturas.	H.R.	Medias	n	E.E.	
55.00	0.014	17.17	3	1.06	A
55.00	0.018	18.42	3	1.06	A
55.00	0.022	19.75	3	1.06	A B
50.00	0.014	21.67	3	1.06	A B C
50.00	0.018	24.00	3	1.06	B C D
50.00	0.022	25.33	3	1.06	C D
45.00	0.014	27.75	3	1.06	D E
45.00	0.018	30.58	3	1.06	E F
45.00	0.022	34.25	3	1.06	F

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

TIEMPOS VS TEMPERATURAS.**TIEMPOS vs HS.**

TIEMPOS VS INTERACCION TEMPERATURA * HS.



1B. DESCENDENTE.

Nueva tabla: 3/28/2013 - 10:51:15 AM

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Tiempos.	27	0.93	0.90	7.54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	794.02	8	99.25	29.49	<0.0001
Temperaturas.	699.62	2	349.81	103.93	<0.0001
H.R.	81.28	2	40.64	12.07	0.0005
Temperaturas.*H.R.	13.12	4	3.28	0.97	0.4458
Error	60.58	18	3.37		
Total	854.60	26			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=2.20720

Error: 3.3657 gl: 18

Temperaturas.	Medias	n	E.E.	
45	30.86	9	0.61	A
50	23.67	9	0.61	B
55	18.44	9	0.61	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=2.20720

Error: 3.3657 gl: 18

H.R.	Medias	n	E.E.	
0.022	26.44	9	0.61	A
0.018	24.33	9	0.61	A B
0.014	22.19	9	0.61	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=5.24858

Error: 3.3657 gl: 18

Temperaturas.	H.R.	Medias	n	E.E.						
45	0.022	34.25	3	1.06	A					
45	0.018	30.58	3	1.06	A	B				
45	0.014	27.75	3	1.06		B	C			
50	0.022	25.33	3	1.06			C	D		
50	0.018	24.00	3	1.06			C	D	E	
50	0.014	21.67	3	1.06				D	E	F
55	0.022	19.75	3	1.06					E	F
55	0.018	18.42	3	1.06						F
55	0.014	17.17	3	1.06						F

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Tiempos.

1	45	0.014	29.00
1	45	0.018	28.75
1	45	0.022	32.25
2	45	0.014	25.75
2	45	0.018	28.25
2	45	0.022	34.50
3	45	0.014	28.50
3	45	0.018	34.75
3	45	0.022	36.00
1	50	0.014	21.75
1	50	0.018	23.75
1	50	0.022	27.00
2	50	0.014	21.25
2	50	0.018	23.25
2	50	0.022	23.00
3	50	0.014	22.00
3	50	0.018	25.00
3	50	0.022	26.00
1	55	0.014	17.00
1	55	0.018	18.00
1	55	0.022	20.25
2	55	0.014	17.00
2	55	0.018	17.00
2	55	0.022	18.00
3	55	0.014	17.50
3	55	0.018	20.25
3	55	0.022	21.00

ANÁLISIS DE CONSUMOS (ASCENDENTE).

Nueva tabla: 3/28/2013 - 11:15:18 AM

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Consumos.	18	0.86	0.73	8.07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	41.63	8	5.20	6.78	0.0048
Temperaturas.	16.70	2	8.35	10.88	0.0040
H.R.	21.48	2	10.74	13.99	0.0017
Temperaturas.*H.R.	3.46	4	0.86	1.13	0.4026
Error	6.91	9	0.77		
Total	48.54	17			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.41234

Error: 0.7677 gl: 9

Temperaturas.	Medias	n	E.E.	
55	9.76	6	0.36	A
50	10.72	6	0.36	A B
45	12.11	6	0.36	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)**Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.41234**

Error: 0.7677 gl: 9

H.R.	Medias	n	E.E.	
0.014	9.38	6	0.36	A
0.018	11.23	6	0.36	B
0.022	11.98	6	0.36	B

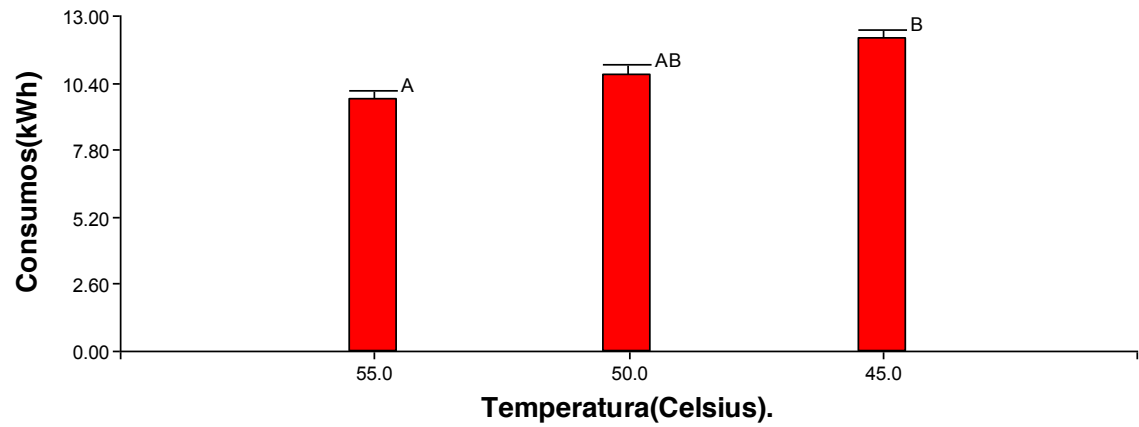
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)**Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.46614**

Error: 0.7677 gl: 9

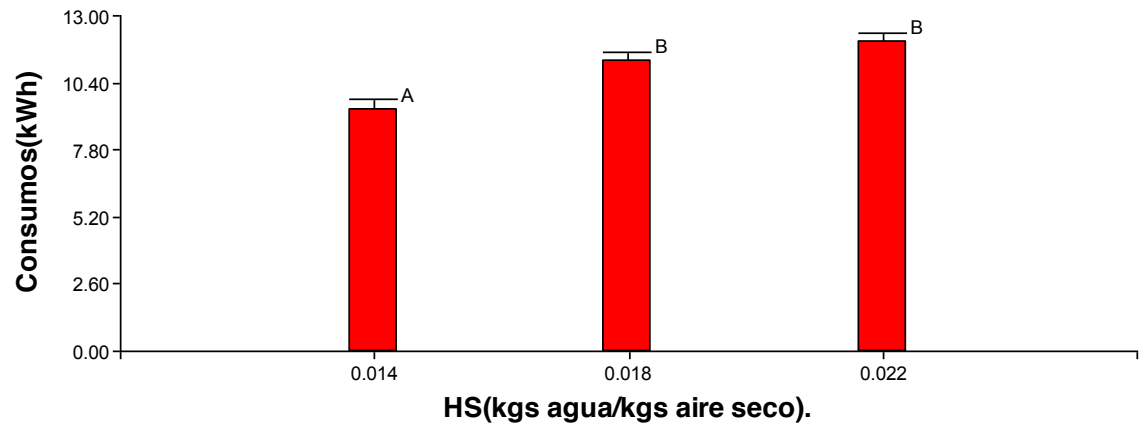
Temperaturas.	H.R.	Medias	n	E.E.		
55	0.014	8.86	2	0.62	A	
50	0.014	9.32	2	0.62	A	B
45	0.014	9.97	2	0.62	A	B
55	0.018	10.02	2	0.62	A	B
55	0.022	10.41	2	0.62	A	B
50	0.018	11.32	2	0.62	A	B C
50	0.022	11.54	2	0.62	A	B C
45	0.018	12.37	2	0.62	B	C
45	0.022	13.99	2	0.62		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

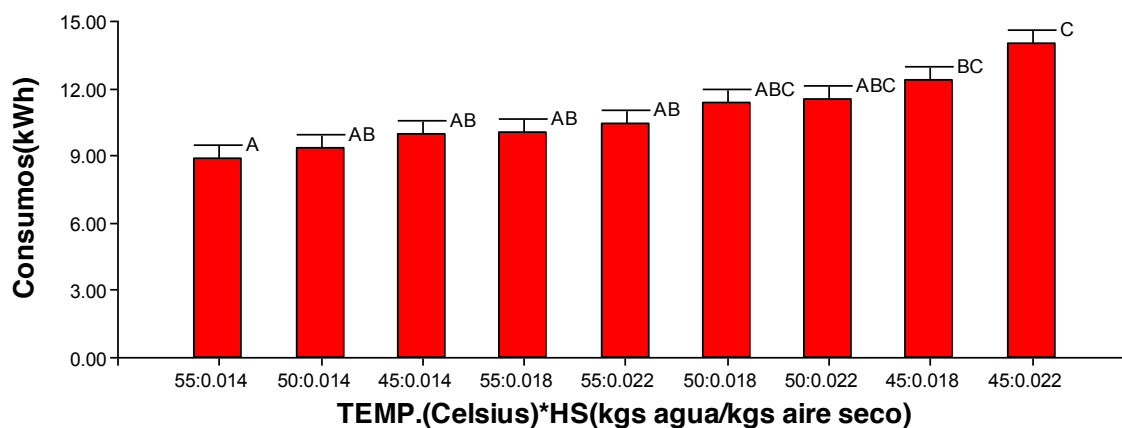
CONSUMOS VS TEMPERATURAS.



CONSUMOS vs HS.



CONSUMOS VS INTERACCION TEMPERATURAS * HS



2B.Descendente.

Nueva tabla: 3/28/2013 - 11:39:42 AM

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Consumos.	18	0.86	0.73	8.07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	41.63	8	5.20	6.78	0.0048
Temperaturas.	16.70	2	8.35	10.88	0.0040
H.R.	21.48	2	10.74	13.99	0.0017
Temperaturas.*H.R.	3.46	4	0.86	1.13	0.4026
Error	6.91	9	0.77		
Total	48.54	17			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.41234

Error: 0.7677 gl: 9

Temperaturas.	Medias	n	E.E.	
45	12.11	6	0.36	A
50	10.72	6	0.36	A B
55	9.76	6	0.36	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=1.41234

Error: 0.7677 gl: 9

H.R.	Medias	n	E.E.	
0.022	11.98	6	0.36	A
0.018	11.23	6	0.36	A
0.014	9.38	6	0.36	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.46614

Error: 0.7677 gl: 9

Temperaturas.	H.R.	Medias	n	E.E.
---------------	------	--------	---	------

45	0.022	13.99	2	0.62	A		
45	0.018	12.37	2	0.62	A	B	
50	0.022	11.54	2	0.62	A	B	C
50	0.018	11.32	2	0.62	A	B	C
55	0.022	10.41	2	0.62		B	C
55	0.018	10.02	2	0.62		B	C
45	0.014	9.97	2	0.62		B	C
50	0.014	9.32	2	0.62		B	C
55	0.014	8.86	2	0.62			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

consumos.

2	45	0.014	9.51
2	45	0.018	11.12
2	45	0.022	14.07
3	45	0.014	10.43
3	45	0.018	13.61
3	45	0.022	13.90
2	50	0.014	9.18
2	50	0.018	10.79
2	50	0.022	10.98
3	50	0.014	9.45
3	50	0.018	11.84
3	50	0.022	12.10
2	55	0.014	8.75
2	55	0.018	9.40
2	55	0.022	9.58
3	55	0.014	8.96
3	55	0.018	10.63
3	55	0.022	11.24

Analisis de Varianza para los Tiempos por Temperatura de Secado

1. TS = 45.

ánalisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
TIEMPOS	9	0.62	0.49	8.31

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

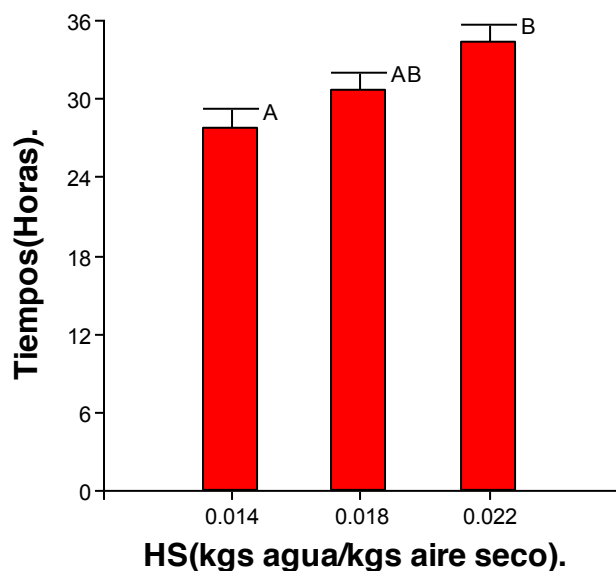
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	63.72	2	31.86	4.85	0.0558
HS	63.72	2	31.86	4.85	0.0558
Error	39.42	6	6.57		
Total	103.14	8			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=6.42115

Error: 6.5694 gl: 6

HS	Medias	n	E.E.	
0.014	27.75	3	1.48	A
0.018	30.58	3	1.48	A B
0.022	34.25	3	1.48	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)



2.TS = 50.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
TIEMPOS	9	0.66	0.55	5.61

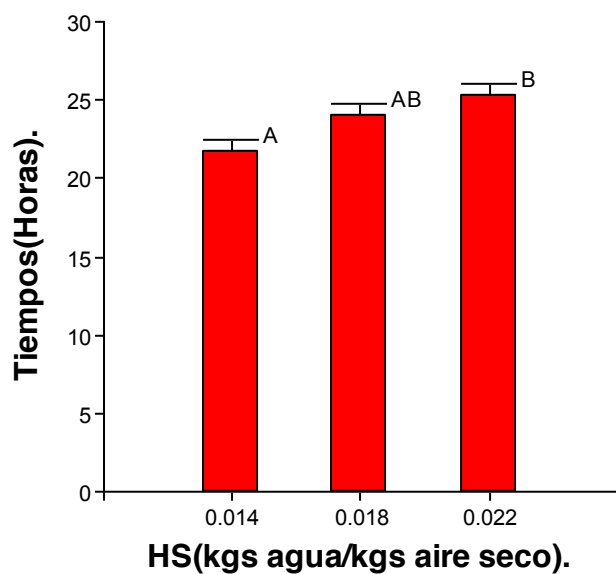
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	20.67	2	10.33	5.86	0.0388
HS	20.67	2	10.33	5.86	0.0388
Error	10.58	6	1.76		
Total	31.25	8			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.32724

Error: 1.7639 gl: 6

HS	Medias	n	E.E.	
0.014	21.67	3	0.77	A
0.018	24.00	3	0.77	A B
0.022	25.33	3	0.77	B



3.TS = 55.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
TIEMPOS	9	0.49	0.31	7.20

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

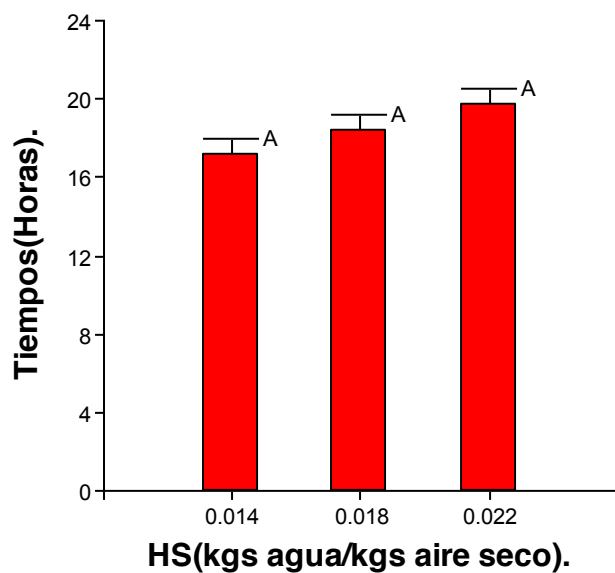
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	10.01	2	5.01	2.84	0.1357
HS	10.01	2	5.01	2.84	0.1357
Error	10.58	6	1.76		
Total	20.60	8			

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.32724

Error: 1.7639 gl: 6

HS	Medias	n	E.E.	
0.014	17.17	3	0.77	A
0.018	18.42	3	0.77	A
0.022	19.75	3	0.77	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)



Analisis de Varianza para los Consumos por Temperatura de Secado

TS = 45.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CONSUMOS.	6	0.82	0.70	8.97

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

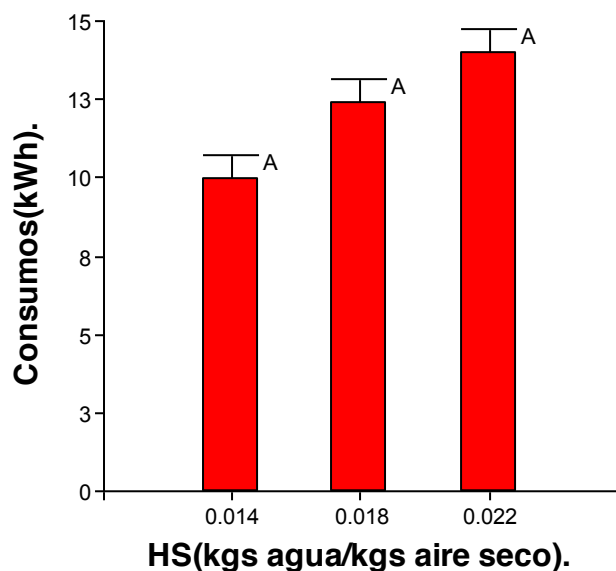
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	16.32	2	8.16	6.92	0.0752
HS	16.32	2	8.16	6.92	0.0752
Error	3.54	3	1.18		
Total	19.86	5			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.53782

Error: 1.1792 gl: 3

HS	Medias	n	E.E.	
0.014	9.97	2	0.77	A
0.018	12.37	2	0.77	A
0.022	13.99	2	0.77	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)



5. TS = 50.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CONSUMOS.	6	0.83	0.72	5.93

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

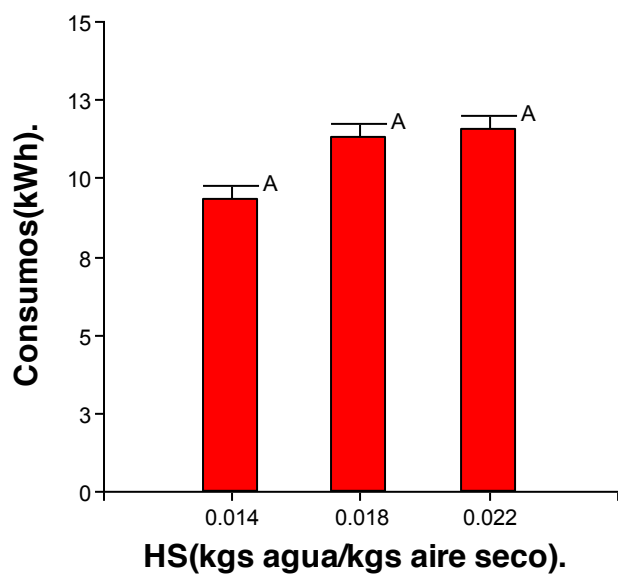
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	6.00	2	3.00	7.41	0.0691
HS	6.00	2	3.00	7.41	0.0691
Error	1.21	3	0.40		
Total	7.22	5			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=2.65924

Error: 0.4050 gl: 3

HS	Medias	n	E.E.	
0.014	9.32	2	0.45	A
0.018	11.32	2	0.45	A
0.022	11.54	2	0.45	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)



6. ts = 55.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CONSUMOS.	6	0.55	0.25	8.69

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

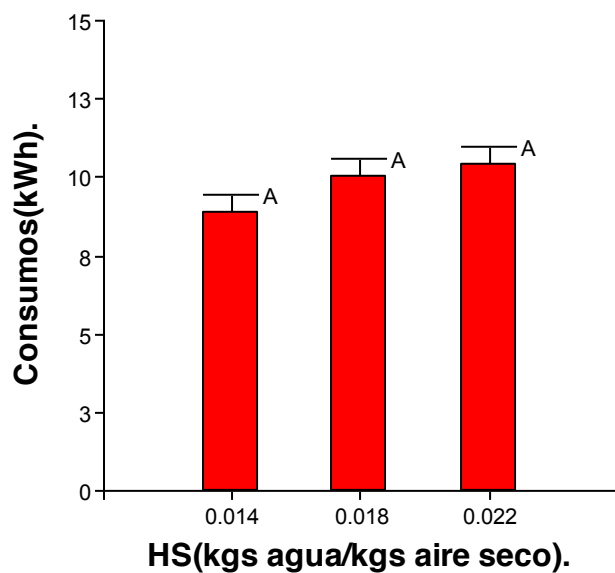
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2.61	2	1.31	1.82	0.3040
HS	2.61	2	1.31	1.82	0.3040
Error	2.16	3	0.72		
Total	4.77	5			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=3.54276

Error: 0.7188 gl: 3

HS	Medias	n	E.E.	
0.014	8.86	2	0.60	A
0.018	10.02	2	0.60	A
0.022	10.41	2	0.60	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)



Apéndice C. Análisis Sensorial

1. ANALISIS SENSORIAL CAFÉ PERGAMINO SECO.

	A	B	C	D	E	Total
A		13	11	15	20	59
B	7		13	13	14	47
C	9	7		4	15	35
D	5	7	16		10	38
E	0	6	5	10		21
Total	21	33	45	42	59	200

Ra 101

Rb 113

Rc 125

Rd 122

Re 139

q(0.05,5,...) 3.86

HSD 19.3

A - B 12 NO DIF

A - C 24 DIF

A - D 21 DIF

A - E 38 DIF

B - C 12 NO DIF

B - D 9 NO DIF

B - E 26 DIF

C - D 3 NO DIF

C - E 14 NO DIF

D - E 17 NO DIF

CHI teo

9.49

CHI exp

32.00

Tratamiento	Rango	Grupos
E	139	c
C	125	bc
D	122	bc
B	113	b
A	101	a

Tratamiento	Temp	HR
A	55	0.014
B	50	0.018
C	45	0.014
D	55	0.022
E	45	0.022

Panelista	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
1	B	A	D	E	C	D	E	C	E	E
2	B	C	A	E	B	D	E	C	E	D
3	B	A	D	E	C	D	E	C	E	E
4	B	A	D	E	C	D	B	C	C	D
5	B	C	A	E	C	D	B	C	E	D
6	B	A	D	E	B	D	B	D	C	E
7	A	C	D	E	C	B	E	D	E	D
8	A	A	D	E	C	B	E	C	C	D
9	B	C	D	E	C	D	B	D	E	E
10	B	C	A	E	C	D	E	C	E	D
11	B	A	A	E	B	D	E	D	E	E
12	A	A	D	E	B	D	B	C	C	E
13	A	A	D	E	B	B	E	C	E	E
14	B	C	D	E	C	B	B	C	E	D
15	B	C	D	E	C	B	E	C	E	D
16	A	C	D	E	C	D	E	C	C	E
17	B	C	A	E	B	B	E	C	E	E
18	B	A	D	E	C	D	E	C	E	D
19	A	C	D	E	C	D	E	C	E	D
20	A	C	D	E	B	B	E	C	E	E

$$X^2 = \left(\frac{4}{nt} \sum R_i^2 \right) - 9n(t-1)^2 \quad HSD = q_{\alpha, t, \infty} \sqrt{\frac{nt}{4}}$$

2. ANALISIS SENSORIAL CAFÉ PILADO.

	A	B	C	D	E	Total
A		4	6	10	9	29
B	16		16	16	16	64
C	14	4		10	8	36
D	10	4	10		4	28
E	11	4	12	16		43
Total	51	16	44	52	37	200

Ra 131

Rb 96

Rc 124

Rd 132

Re 117

q(0.05,5,...) 3.86

HSD 19.3

A - B 35 DIF

A - C 7 NO DIF

A - D 1 NO DIF

A - E 14 NO DIF

B - C 28 DIF

B - D 36 DIF

B - E 21 DIF

C - D 8 NO DIF

C - E 7 NO DIF

D - E 15 NO DIF

CHI teo

9.49

CHI exp

34.64

Tratamiento	Rango	Grupos
D	132	a
A	131	a
C	124	a
E	117	a
B	96	b

Tratamiento	Temp	HR
A	55	0.014
B	50	0.018
C	45	0.014
D	55	0.022
E	45	0.022

Panelista	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
1	A	C	D	E	B	D	E	D	E	D
2	A	C	A	A	C	D	E	D	C	D
3	A	A	A	A	C	D	E	C	E	E
4	A	A	D	E	C	D	E	D	C	E
5	B	A	A	E	B	D	E	C	C	D
6	A	A	D	A	C	D	E	D	E	D
7	A	A	A	E	C	D	E	C	E	D
8	B	A	A	E	C	B	B	C	C	D
9	A	A	A	E	C	D	E	C	C	D
10	A	A	D	A	B	B	E	D	C	D
11	A	A	D	A	C	D	E	D	C	D
12	A	C	A	A	C	D	E	D	C	D
13	A	A	D	A	C	B	E	C	C	D
14	A	C	D	E	B	D	E	C	E	D
15	B	A	D	E	C	D	B	C	C	D
16	B	C	A	A	C	B	B	D	E	D
17	A	C	D	A	C	D	B	C	C	E
18	A	A	A	A	C	D	E	C	E	D
19	A	A	A	E	C	D	E	D	C	E
20	A	A	D	A	C	D	E	D	E	D

$$X^2 = \left(\frac{4}{nt} \sum R_i^2 \right) - 9n(t-1)^2 \quad HSD = q_{\alpha, t, \infty} \sqrt{\frac{nt}{4}}$$

3. ANALISIS SENSORIAL DE CAFÉ TOSTADO.

	A	B	C	D	E	Total
A		15	13	16	10	54
B	5		7	7	7	26
C	7	13		8	10	38
D	4	13	12		9	38
E	10	13	10	11		44
Total	26	54	42	42	36	200

Ra 106

Rb 134

Rc 122

Rd 122

Re 116

q(0.05,5,...) 3.86

HSD 19.3

A - B 28 DIF

A - C 16 NO DIF

A - D 16 NO DIF

A - E 10 NO DIF

B - C 12 NO DIF

B - D 12 NO DIF

B - E 18 NO DIF

C - D 0 NO DIF

C - E 6 NO DIF

D - E 6 NO DIF

CHI teo

9.49

CHI exp

16.64

Tratamiento	Rango	Grupos
B	134	a
C	122	ab
D	122	ab
E	116	ab
A	106	b

Tratamiento	Temp	HR
A	55	0.014
B	50	0.018
C	45	0.014
D	55	0.022
E	45	0.022

Panelista	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
1	B	C	D	A	B	D	B	C	C	E
2	B	C	D	A	C	D	E	D	E	E
3	B	A	A	A	B	D	B	D	E	E
4	B	A	D	E	B	B	B	D	E	E
5	B	C	D	A	B	B	B	D	E	E
6	B	A	D	A	B	D	E	D	C	D
7	A	C	D	E	B	D	E	D	E	D
8	B	C	D	E	B	B	B	C	C	E
9	B	C	A	E	B	B	B	C	C	D
10	B	A	D	E	B	B	E	C	E	E
11	B	C	D	E	B	B	B	C	C	D
12	A	C	D	A	C	B	B	C	E	D
13	A	A	D	E	C	B	B	D	C	D
14	A	C	A	A	B	B	E	C	E	E
15	B	A	D	A	B	D	E	C	C	D
16	B	C	D	E	B	B	B	C	C	E
17	B	C	D	E	C	B	B	C	E	D
18	A	C	A	E	C	B	E	C	C	D
19	B	C	D	A	C	D	B	C	E	D
20	B	A	D	A	C	B	B	D	C	D

$$X^2 = \left(\frac{4}{nt} \sum R_i^2 \right) - 9n(t-1)^2 \quad HSD = q_{\alpha, t, \infty} \sqrt{\frac{nt}{4}}$$