

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS**

***“Estudio del proceso de torrefacción del café (Coffea arabica) en
tostador convencional”***

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como
requisito para optar por el grado de
Licenciatura de Ingeniería Agrícola

Royner Abarca Mora

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

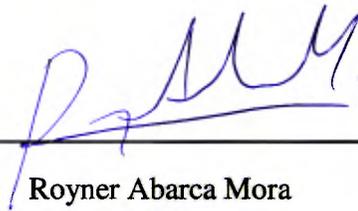
San José, Costa Rica

2017

“Estudio del proceso de torrefacción del café (*Coffea arabica*) en tostador convencional”

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería Biosistemas como requisito para optar por el grado de

LICENCIATURA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Royner Abarca Mora

Sustentante

Aprobado por el Tribunal Examinador:



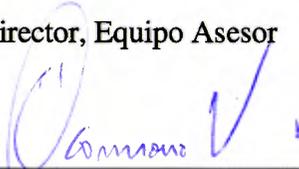
Ing. Guillermo A. Vargas Elías, M. Sc.

Director, Equipo Asesor



Ing. Mauricio Bustamante Román, Lic.

Presidente, Equipo examinador



Ing. Giovanni Carmona Villalobos, Lic.

Miembro, Equipo Asesor



Ing. Juan Roberto Mora Chávez, Lic.

Miembro, Equipo examinador



Ing. Alberto Miranda Chavarría; M. BA.

Miembro, Equipo Asesor

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos...

*Todos los logros de mi formación profesional y personal,
son una prueba real de la gran capacidad con la que todos nacemos,
y que, gracias a su apoyo incondicional, se ven reflejados en estos grandes momentos.*

AGRADECIMIENTOS

*A Guillermo, por la confianza depositada en mí para desarrollar el presente trabajo;
por la amistad que a lo largo de este tiempo mantuvimos,
que nos permitió cultivar la pasión por lo que hacemos, ¡Buen café!*

*A Giovanni, por estar siempre dispuesto a motivarnos y transmitirnos la sabiduría y pasión
por nuestra profesión.*

*Al personal administrativo y técnico del Centro de Investigación en Granos y Semillas
CIGRAS, por toda la ayuda y servicios, pero ante todo por el buen trato para mí persona.*

*A la Escuela de Ingeniería Agrícola, mediante su profesorado y medios académicos
cultivaron en mí el amor por la profesión.*

*A la Universidad de Costa Rica, mediante la Oficina de Becas y Ayuda Socioeconómica, y
el Programa de Residencias Estudiantiles, sirvieron de mucho apoyo para culminar mis
estudios.*

*A todos los amigos y amigas, cultivados en mi estancia en las Residencias Estudiantiles,
compañeros y compañeras de la carrera, los cuales siempre llevo presentes y recuerdo con
mucho cariño.*

*A mis padres Walter y Leyla, que con sus enseñanzas y sacrificios me llevaron hasta este
día.*

A mis hermanos Waldin, Walter y Julieth, por ser mis compañeros y amigos de vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE CUADROS	x
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Cultivo y desarrollo de los cafetos en Costa Rica.....	2
1.3 El beneficiado del café.....	3
1.4 Torrefacción	4
1.4.1 Técnicas de los diversos sistemas de torrefacción.....	6
1.4.2 Cambios físicos.....	9
1.4.3 Cambios químicos.....	10
1.4.4 Medición de los grados de tueste.....	12
1.5 Participación en el mercado internacional de café tostado	12
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y MATERIALES.....	13
2.1 Elaboración de las pruebas.....	13
2.2 Materia prima	13
2.3 Proceso de torrefacción.....	14
2.4 Determinación de la temperatura	14
2.4.1 Medidor infrarrojo	15
2.4.2 Sistema de recolección de datos con termopares.....	15
2.5 Pérdida de masa.....	17
2.6 Evaluación del color.....	17
2.6.1 Escala de medición Agtron.....	17
2.7 Masa específica aparente.....	18
2.8 Variación volumétrica aparente	19
2.9 Modelo de expansión aparente.....	20

2.9.1	Ley de la cinética de las reacciones químicas.....	20
2.9.2	Efecto de la temperatura	21
2.10	Determinación del contenido de humedad.....	21
2.11	Materia seca	22
2.12	Capacidad de trabajo del tostador	23
2.13	Modelo de calentamiento del cilindro rotativo	23
2.13.1	Ley de enfriamiento de Newton.....	23
2.14	Modelos de calentamiento de los granos	25
2.14.1	Modelo de calentamiento.....	25
2.14.2	Modelo de calentamiento propuesto	29
2.15	Modelo de variación de la materia seca	29
2.15.1	Ley de la cinética de las reacciones químicas.....	29
2.15.2	Efecto de la temperatura	30
2.16	Análisis estadístico.....	31
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		33
3.1	Evaluación térmica del tostador convencional.....	33
3.1.1	Calentamiento del tostador	33
3.1.2	Evaluación de la pared interna del tostador	35
3.1.3	Evaluación de la temperatura interna.....	38
3.1.4	Evaluación del tiempo de recuperación de la temperatura del sistema	42
3.2	Calentamiento de la masa granos durante el proceso de torrefacción	47
3.2.1	Modelo de calentamiento.....	47
3.2.2	Modelo matemático basado en la naturaleza de calentamiento de los granos de café	51
3.2.3	Temperatura final del grano tostado	58
3.2.4	Relación entre la temperatura final de la masa de granos y la temperatura interna el tostador	62
3.3	Efecto de la temperatura de calentamiento, masa inicial y grado de tueste sobre el tiempo de torrefacción.....	64
3.3.1	Evaluación de la capacidad de trabajo.....	68

3.3.2	Efecto de la masa inicial sobre el tiempo de tostado	70
3.3.3	Modelo de predicción del tiempo de torrefacción	72
3.4	Variación de las propiedades físicas del café en la torrefacción.....	74
3.4.1	Pérdida de masa en el tostado	74
3.4.2	Cinética de pérdida de masa durante el tueste	76
3.4.3	Expansión aparente	78
3.4.4	Cinética de la expansión aparente durante el tostado por efecto de masas.....	80
3.4.5	Densidad aparente.....	83
3.4.6	Cambios en la densidad aparente por efecto del tostado	86
3.4.7	Densidad aparente en función del tiempo de torrefacción.....	87
3.4.8	Materia seca	89
3.4.9	Cinética del cambio en la materia seca durante el tostado por efecto de masas. 92	
3.4.10	Humedad final.....	96
	CONCLUSIONES	100
	RECOMENDACIONES.....	101
	REFERENCIAS.....	102
	ANEXOS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura del grano de café.	1
Figura 1.2. Principales zonas productoras de café en Costa Rica.....	2
Figura 1.3. Torrefacción del café - principales aspectos.	5
Figura 1.4. Principios mecánicos de tostado.....	7
Figura 1.5. Principales familias constituyentes del café (promedios del café arabica).	11
Figura 1.6. Costa Rica: exportaciones de café tostado, 2004-2013.	12
Figura 2.1. Preparación y adecuación de las muestras.	13
Figura 2.2. Tostador convencional, marca BENDIG / modelo ECO-2000	14
Figura 2.3. Medidor infrarrojo para registro de temperatura de masa de granos y pared interna del cilindro.	15
Figura 2.4. Sistema de recolección de datos de temperatura integrado.	16
Figura 2.5. Vista de corte lateral del tostado – Esquema de registro de temperaturas.	16
Figura 2.6. Tabla Agtron sobre grados de torrefacción.	17
Figura 2.7. Densímetro, equipo para medición de densidad aparente	18
Figura 2.8. Estufa MMM Group/ modelo VENTICELL/ serie 111.	22
Figura 3.1. Modelos de calentamiento de cilindro rotativo (pared) e interior del tostador convencional (aire).	33
Figura 3.2. Relación de la temperatura interna y temperatura del cilindro en el calentamiento.	35
Figura 3.3. Efecto de la masa sobre la temperatura de la pared del cilindro.	36
Figura 3.4. Comportamiento de la temperatura de interior del tostador al introducir la masa de granos.	39
Figura 3.5. Efectos principales de los factores sobre la temperatura interna.....	41
Figura 3.6. Efectos de las interacciones de los factores sobre el cambio en la temperatura interna.	42
Figura 3.7. Registro de torrefacción y recuperación del tostador.....	43
Figura 3.8. Efectos principales de los factores sobre el tiempo de recuperación.	43

Figura 3.9. Efectos de las interacciones de los factores sobre el tiempo de recuperación. ..	44
Figura 3.10. Ajuste polinómico del tiempo de recuperación como función de la temperatura inicial.	45
Figura 3.11. Cinética de calentamiento de los granos (T_g) para diferentes masas y mismo grado de tueste (oscuro).	47
Figura 3.12. Modelo de calentamiento de la masa de granos de café durante el proceso de torrefacción con bandas de confianza a 95%, para cuatro masas.	49
Figura 3.13. Comparación de la temperatura de los granos experimental y el modelo matemático de Pabis ($n=2330$).	50
Figura 3.14. Ajustes no lineales para la razón de calentamiento de la masa de granos.	51
Figura 3.15. Ajustes no lineales para la razón de calentamiento de la masa de granos.	52
Figura 3.16. Modelo de calentamiento de los granos según su masa inicial – Modelo matemático propuesto.	55
Figura 3.17. Modelo de calentamiento de la masa de granos de café durante el proceso de torrefacción con bandas de confianza a 95%, para cuatro masas – Modelo propuesto.	57
Figura 3.18. Comparación de la temperatura de los granos experimental y el modelo matemático propuesto.	58
Figura 3.19. Efecto de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre la temperatura final de grano.	59
Figura 3.20. Efectos de las interacciones entre los factores sobre la temperatura final de grano.	60
Figura 3.21. Temperatura de la masa de granos para los cuatro grados de tueste.	61
Figura 3.22. Relación entre la temperatura de la masa de granos tostados (T_g) y la temperatura interna del tostador (T_i), aire en contacto con el grano.	62
Figura 3.23. Efectos principales de los factores sobre el tiempo de torrefacción.	64
Figura 3.24. Efectos de las interacciones de los factores sobre el tiempo de torrefacción.	66
Figura 3.25. Efectos principales de los factores sobre la capacidad de trabajo.	69
Figura 3.26. Efecto de la masa de granos crudos sobre el tiempo de tueste (t).	70
Figura 3.27. Modelos de ajuste para los parámetros del efecto de masa sobre el tiempo de tueste y la pérdida de masa.	72
Figura 3.28. Comparación del modelo de predicción del tiempo de torrefacción ($n=48$).	73

Figura 3.29. Efectos principales de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre el porcentaje de pérdida de masa.	74
Figura 3.30. Cinética de pérdida de masa (ΔM), para las masas de grano crudo evaluadas.	77
Figura 3.31. Efectos principales de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre expansión aparente de los granos tostados.	79
Figura 3.32. Modelo lineal de ajuste para la expansión aparente del café tostado.	81
Figura 3.33. Ajuste del valor pre exponencial de la ecuación de expansión aparente por masa inicial.	83
Figura 3.34. Efectos principales de los factores sobre la densidad aparente ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) de los granos de café tostado.	84
Figura 3.35. Efectos de las interacciones de los factores sobre la densidad aparente.	85
Figura 3.36. Efecto de la masa sobre la variación de la densidad aparente, para cada grado de tueste.	88
Figura 3.37. Efectos principales de los factores sobre el cambio de materia seca.	90
Figura 3.38. Efectos de las interacciones de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre el cambio de materia seca.	91
Figura 3.39. Modelos de cinética de la materia seca.	93
Figura 3.40. Ajuste del valor pre exponencial de la ecuación de materia seca por masa inicial.	96
Figura 3.41. Análisis de la media de humedad de los granos de café tostado.	97
Figura 3.42. Efectos de la interacción de los factores sobre la humedad final del café tostado.	99

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. Principios básicos en la tecnología moderna de tostado.	7
Cuadro 1.2. Cambios macroscópicos durante la torrefacción.	9
Cuadro 1.3. Porcentaje aproximado de las pérdidas de materia seca por grado de tueste....	11
Cuadro 3.1. Relación de la temperatura del cilindro rotativo y la temperatura interna iniciales del tostador, durante condiciones de operación.....	34
Cuadro 3.2. Cambios en la temperatura de la pared por efecto del enfriamiento y calentamiento durante el tostado.....	37
Cuadro 3.3. Parámetros estadísticos del modelo a ajuste para la temperatura de la pared...38	
Cuadro 3.4. Parámetros estadísticos del ajuste matemático para el comportamiento de la temperatura interna del tostador, por el efecto de masas.	40
Cuadro 3.5. Tiempos medios de recuperación según la temperatura inicial del tostador (n=48).....	45
Cuadro 3.6. Parámetros estadísticos determinados para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de los granos durante el tueste de café – Modelo Pabis.	48
Cuadro 3.7. Parámetros estadísticos de las regresiones de cinética de calentamiento.	53
Cuadro 3.8. Parámetros estadísticos determinados para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de los granos durante el tueste – Modelo propuesto.	56
Cuadro 3.9. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos.	61
Cuadro 3.10. Cambio promedio en el tiempo de tueste por el diferencial máximo entre los factores de temperatura, masa y grado de tueste.	65
Cuadro 3.11. Comparativo del tiempo de torrefacción por temperatura y masa iniciales, para cada grado de tueste (n=3).	67
Cuadro 3.12. Parámetros estadísticos de los modelos de masa inicial como función del tiempo.	71
Cuadro 3.13. Pérdidas de masa total de los granos de café por grado de tueste (n=48).....	75
Cuadro 3.14. Análisis estadístico del modelo lineal de la cinética de pérdida de masa.	77
Cuadro 3.15. Parámetros estadísticos del modelo lineal de ajuste de la cinética de expansión aparente.....	81

Cuadro 3.16. Valores de ajuste de modelo de cinética de expansión aparente (K_0) por masa.	82
Cuadro 3.17. Densidad aparente del café tostado por efecto de masa para la temperatura de 280 °C (n=3).	86
Cuadro 3.18. Variación de la densidad aparente por Grado de tueste (n=48).	87
Cuadro 3.19. Parámetros estadísticos de los modelos de densidad aparente en función del tiempo de torrefacción.	89
Cuadro 3.20. Variación en la materia seca por grado de tueste (n=48).	91
Cuadro 3.21. Parámetros estadísticos de la regresión de la cinética de materia seca.	94
Cuadro 3.22. Tiempo de inicio de las reacciones de torrefacción asociado a la temperatura de la masa de granos y el coeficiente de ajuste K_0	95
Cuadro 3.23. Humedad final promedio del café por grado de tueste (n=48).	98

RESUMEN

Costa Rica cuenta con una larga historia de producción de café de las variedades arábicas y de cosecha selectiva del fruto maduro, aspecto que ha marcado su desarrollo demográfico, identidad como nación y la han convertido en uno de los principales países productores de cafés especiales del mundo. Como país productor, el desarrollo técnico y científico entorno al procesamiento agrícola del café, se han dirigido al proceso de cosecha, al despulpado, a la fermentación y al secado, hasta obtener el café verde llamado *grano de oro*. La preparación de la bebida de café requiere que se realice la transformación de los granos mediante la torrefacción, proceso dinámico que requiere control específico de la temperatura y del tiempo. El objetivo del presente trabajo fue incluir el efecto de la masa en el estudio del proceso de torrefacción del café (*Coffea arabica*). Se utilizaron granos de café provenientes del proceso de beneficiado húmedo, *Coffea arabica L.* variedad Caturra y Catuaí. El contenido de humedad inicial del café fue de $0,0873 \pm 0,0008 \text{ kg kg}^{-1}$ y densidad aparente de $711,93 \pm 1,80 \text{ kg/m}^3$. El proceso de torrefacción del café, se realizó en un tostador convencional de construcción nacional. Se analizaron cuatro masas iniciales (400, 600, 800 y 1000 g), cuatro temperaturas de calentamiento del tostador (260, 280, 300 y 320 °C) y cuatro niveles de tostado: *medio claro* (MC); *medio* (M); *moderadamente oscuro* (MO); y *oscuro* (O). Al colocar una masa controlada dentro del tostador se producen caídas en la temperatura de la pared y de todo el ambiente interno del tostador, lo cual causa un comportamiento variable de la temperatura del tostador durante el proceso. Se adaptó un modelo de calentamiento para los granos de café durante la torrefacción, considerando que el calor es transferido al sólido para evaporar el agua contenida y elevar su temperatura. Asimismo, el cambio en la cantidad de masa afectó de manera significativa la razón de calentamiento de los granos durante el tueste, lo que a su vez, generó diferencia significativa en el tiempo de torrefacción. Se desarrolló un modelo matemático basado en la razón de calentamiento de los granos que representó adecuadamente el efecto de la masa en el proceso. El cambio en la coloración del café según la norma SCAA se asoció a la pérdida

de masa total, con una diferencia de 2% entre niveles de tueste y su cinética de pérdida de masa es lineal. La expansión aparente de la masa de granos duplicó aproximadamente su volumen inicial, mostrando relación con el nivel de tueste y la cantidad de masa. La expansión del café durante el tueste fue semejante a un modelo lineal, descrito por la cinética de las reacciones químicas de orden cero, se ajustó el modelo en función de la masa y la temperatura inicial. La densidad aparente del café tostado disminuyó linealmente hasta 50% de su valor inicial y se determinó su dependencia con la masa. El nivel de tueste del café se representó por el cambio en la materia seca y su cinética se describe mediante un modelo matemático basado en la ley de las reacciones químicas de orden uno, se incorporó a la ecuación la variable de la masa inicial. La humedad del café tostado varió desde 2,5 hasta 1,0 % para los niveles de tueste medio claro y oscuro, respectivamente.

INTRODUCCIÓN

La estrategia de producir café de calidad en un país como Costa Rica, ha logrado alcanzar los mercados finos de café en el mundo. Actualmente, Estados Unidos es uno de sus principales mercados; el precio de venta y el reconocimiento del café diferenciado han marcado el éxito de los programas dedicados a alcanzar tal fin (ICAFE, 2016).

El mercado del café cuenta con una marcada separación entre los países que son productores y los consumidores. Dicha clasificación se puede apreciar por su participación en el mercado de las exportaciones de café; ya sea café oro (clasificación arancelaria 0901.1) o café tostado (clasificación arancelaria 0901.2), es decir, los países que lideran los mercados de exportación de café oro son diferentes a los países líderes en exportación de café tostado (López, 2014).

Según López (2014), para el período de 2009-2013, Costa Rica contaba con una participación de apenas un 2% del mercado exportador de café oro, liderado por Brasil (27%), Vietnam (12%) y Colombia (10%). Para el mercado exportador de café tostado, los países con mayor participación fueron: Suiza (21%), Italia (15%), Alemania (14%) y Estados Unidos (9%); los aportes de Costa Rica, Brasil, Colombia, entre otros, no se ven reflejados en dichas estadísticas, lo que consecuentemente en los últimos años, los ha llevado a intentar vincularse en las etapas de mayor valor agregado.

La cadena de producción de café, iniciando desde la plantación hasta la comercialización, se compone de procesos que van agregando valor al producto final. Se estima que, para la actividad de torrefacción, el incremento del valor agregado del café es de un 29%, siendo una de las mayores proporciones de valor junto con la venta minorista, la cual representa un incremento de un 21% en la cadena de valor (López, 2014).

Lo anterior fomenta estudiar futuros mercados meta de café tostado, los cuales, según la Organización Internacional del Café, ICO (2015) e iniciando por Costa Rica, tiene consumo per cápita es de 3,43 kg, mientras que para los países nórdicos (Finlandia,

Noruega, Dinamarca, Islandia y Suecia) el consumo per cápita es de 12,17 kg; 9,51 kg; 8,21 kg; 7,90 kg y 7,14 kg; respectivamente. Estados Unidos, es el principal país importador de café costarricense, cuenta con un consumo per cápita de 4,24 kg. Los datos anteriores muestran la superioridad y el potencial de compra que pueden tener estos países. Por consiguiente, se vuelve importante realizar esfuerzos por crecer en esos grandes mercados de consumo de bebida con alta calidad.

El proceso de tostado de café se produce cuando se introducen los granos verdes de café (*café oro*) en tostadores con temperaturas entre 180 °C y 240° con tiempos de 8 a 15 minutos. Lo anterior depende del grado de tostado que se quiera preparar (ICO, 2015). Para realizar preparación de la bebida de café es necesario que los granos sean tostados y molidos, utilizando la torrefacción en la transformación de los granos para el consumo como bebida, mediante la torrefacción.

La vinculación a mercados de alta calidad con productos de valor agregado, como lo es el café tostado, requiere grados de innovación en los productos finales. Lo anterior, considerando que existen empresas consolidadas que dominan esos nichos de mercado, es aquí donde el desarrollo científico que se pueda realizar, permite obtener los mejores productos y características de calidad que aseguren los mercados internacionales y nacionales.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el conjunto de parámetros de operación en el proceso de la torrefacción del café, y a su vez analizar cada una de las variables respuesta, de acuerdo con las condiciones de temperatura en el calentamiento, tiempo y masa para los distintos índices de torrefacción establecidos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudiar el proceso de la torrefacción de café (*Coffea arabica*) en tostador convencional obteniendo diferentes grados de tostado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir el comportamiento térmico del tostador convencional durante el proceso de torrefacción.
2. Analizar el mecanismo de calentamiento (estático o transitorio) de los granos de café durante el proceso de la torrefacción.
3. Estimar el efecto de la cantidad de masa y temperatura inicial sobre el tiempo de la torrefacción, pérdida de masa, expansión aparente, densidad aparente, materia seca y humedad final del café.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Generalidades

La planta de café es perteneciente al género taxonómico *Coffea* de la familia Rubiaceae; en dicho género se agrupan cerca de 70 especies de plantas. Las dos principales especies utilizadas en los cultivares de café alrededor del mundo corresponden a *Coffea arabica* y *Coffea canephora* var. Robusta (Wintgens, 2004).

Los primeros indicios de la domesticación del café lo ubican en Etiopia. Sin embargo, muchas de las escrituras evidencian la existencia de cultivares de café en la península arábiga (Yemen), cerca del siglo XII. En los próximos 300 años, la bebida estimulante consumida de forma caliente, fue preparada al tostar y moler los granos de café, llamado *qawha* (una palabra general para los vinos u otros estimulantes) por los árabes y *cahveh* por los turcos (Illy & Viani, 2005).

Los frutos de café generalmente están conformados por dos granos. Cada grano se encuentra envuelto en una piel plateada, la cual, junto al grano son cubiertos por el pergamino. Alrededor del pergamino, se encuentra el musilago y la pulpa, posteriormente todo es envuelto por la carcara (Kuit et al, 2004).

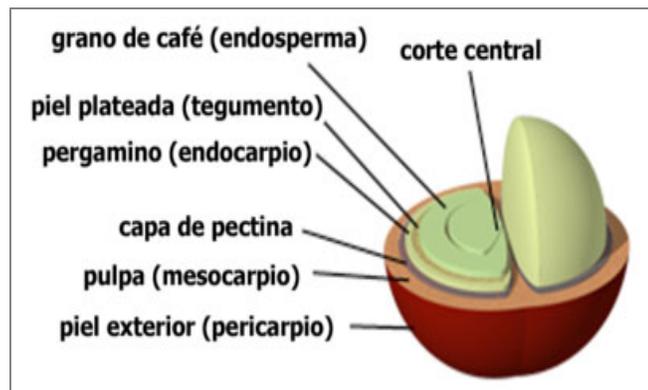


Figura 1.1. Estructura del grano de café.

Fuente: (Kuit et al, 2004)

1.2 Cultivo y desarrollo de los cafetos en Costa Rica

Costa Rica cuenta con un 100% de los cultivares de café con la especie Arábica, de las variedades Caturra y Catuaí; lo anterior debido a la calidad del café al evaluar sus propiedades organolépticas únicas. Costa Rica desde 1989 se prohíbe por Ley la siembra de café Robusta por inferior calidad de taza (ICAFFE, 2016).

Las principales zonas de cultivo del café en Costa Rica, se encuentran localizadas y organizadas por las ocho regiones cafetaleras (Figura 1.2), las cuales son las principales zonas productoras de café. Cada una de esas ocho regiones cuenta con características climáticas y geográficas específicas, que producen diversidad de cafés para todos los gustos (ICAFFE, 2016).

Las ocho regiones con productividad están distribuidas entre las zonas bajas, menos de 1.200 m.s.n.m., las cuales presentan un café más liviano (densidad aparente baja), y las zonas altas, arriba de los 2.000 m.s.n.m., de origen volcánico, donde el café es más fuerte o más ácido y también más aromático (ICAFFE, 2016).



Figura 1.2. Principales zonas productoras de café en Costa Rica.
Fuente: (ICAFFE, 2016)

La calidad del café es afectada por la taxonomía de la planta, las operaciones de procesamiento desempeñan un papel fundamental sobre ella. Según Meira (2008), el procesamiento es una de las operaciones que influencia directamente la calidad del producto final, ya sea procesamiento por la vía húmeda o por la vía seca.

1.3 El beneficiado del café

Según en ICAFE (2016), Costa Rica cuenta con 130 plantas beneficiadoras para el procesamiento del fruto del café, las cuales, cuentan con mano de obra calificada que permite la obtención de calidades uniformes en el grano al final del proceso.

En Costa Rica la medida oficial para cuantificar la entrega a los beneficiadores de café, es el doble hectolitro (0,20 m³), y su calidad en la entrega es supervisada por personal calificado. Algunas plantas procesadoras utilizan paralelamente procesos automatizados de medición volumétrica y másica, lo que permite facilitar controles en la fruta durante el proceso (ICAFE, 2016).

Según Wintgens (2004), existen básicamente tres formas de procesamiento del grano de café. El procesamiento seco, el húmedo y un proceso intermedio a los dos anteriores: semi-seco.

El beneficiado seco consiste en secar la fruta de café inmediatamente después de realizada la cosecha. Cerca del 90% de los cafés arábigos brasileños utilizan esta técnica de procesamiento, a pesar de que sea una técnica más común para la variedad robusta. El proceso de secado natural se realiza generalmente en grandes espacios, usualmente de concreto y que, con la ayuda de la radiación solar, permiten secar el café en fruta, con espesores de 30 a 40 mm. Uno de los factores más importante de este tipo de beneficiado, es que los procesos de secado deben iniciar mucho antes que los de fermentación, ya que, de lo contrario, la calidad del café disminuiría. Los tiempos de secado son dependientes de las condiciones psicrométricas del aire ambiente que circule sobre el café. El secado artificial, el cual es utilizado bajo temperaturas generalmente menores a 50°C y con equipos que varían en estructura y aplicación del calor (Clarke & Macrae, 1987).

El beneficiado húmedo según Clarke & Macrae (1987), es utilizado generalmente para procesar cafés de alta calidad, comúnmente para los países latinoamericanos que siembran café arábica. Las labores de procesamiento son mucho más complejas y requieren equipos especializados por cada labor a realizar. Las principales labores se pueden resumir de la siguiente forma: limpieza inicial, clasificación, despulpado, fermentación, limpieza y secado, las cuales utilizan generalmente cantidades considerables de agua.

El beneficiado húmedo para los cafés de Costa Rica permite preservar la calidad que ha sido desarrollada en campo. El sistema es costoso, pero es el método más apto para el procesamiento de los cafés finos costarricenses (ICAFE, 2016).

En cuanto al efecto sobre la calidad sensorial, Meira (2008) indica que los cafés naturales (vía seca) en la bebida presentan mejor cuerpo que los cafés despulados (vía húmeda), con un aroma más acentuado y una acidez leve y placentera.

1.4 Torrefacción

Al final del proceso de beneficiado el café cuenta con un 12% de contenido de humedad base húmeda promedio, en dicha condición es almacenado. El proceso de preparación consiste en el pelado del grano (desprendimiento del pergamino), pasa por procesos de limpieza de impurezas y clasificación por tamaño, densidad y color, para finalmente ser empacado para exportación o para iniciar el proceso de torrefacción (ICAFE, 2016).

El proceso de torrefacción de café es un proceso de aplicación de calor sobre los granos de café crudos. Sin embargo, la importancia de tal proceso radica en el control de la temperatura en el momento justo, y la finalización del proceso cuando la liberación de los aromas y la coloración homogénea de los granos sea la adecuada (Illy & Viani, 2005).

Según Clarke & Macrae (1987), la torrefacción es un proceso dependiente de la temperatura y el tiempo, en el cual se introducen cambios físicos y químicos en el grano de café verde. Hay una pérdida de materia seca, la cual se da principalmente por las

transformaciones en dióxido de carbono y agua (agua de constitución) y los productos volátiles de la pirólisis.

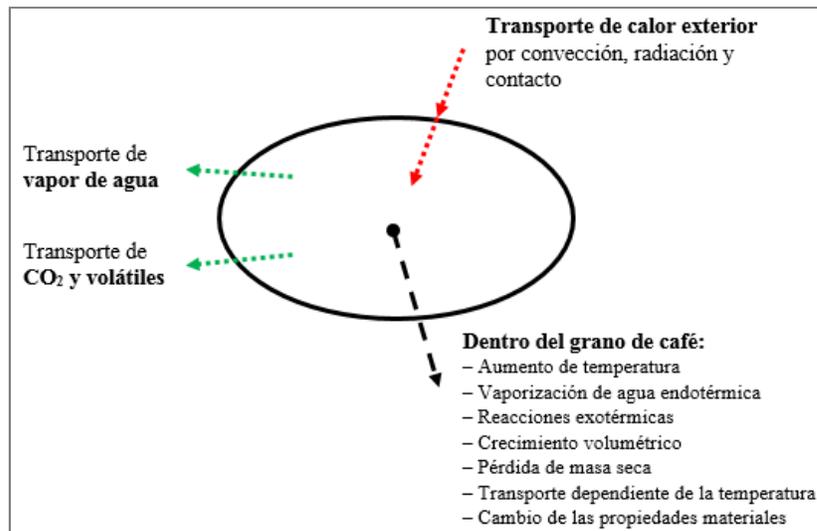


Figura 1.3. Torrefacción del café - principales aspectos.

Fuente: (Illy & Viani, 2005)

Según lo indicado por Illy & Viani (2005), el grano de café conformado por una geometría finita de forma complicada y con estructura interna heterogénea, sufre ante la admisión de calor cambios geométricos que modifican su volumen y alteraciones en su estructura interna. A su vez, el comportamiento de la temperatura interna adquiere componentes tridimensionales sobre el estado de equilibrio con los límites móviles desconocidos, es decir, un comportamiento complejo de describir.

El proceso de tostado se compone en una transferencia de calor y masa combinados superpuestos a reacciones endotérmicas y exotérmicas. Como consecuencia de la aplicación de calor, se generan campos diferenciales de temperatura, variaciones en las presiones internas y re-distribución de la humedad dependiente del tiempo y posición; (Illy & Viani, 2005).

Según Sivetz & Desrosier (1979) citados por Vargas (2011) y Mendes (2012), el proceso de torrefacción puede ser dividido en tres etapas: secado, torrefacción y enfriamiento. En la primera etapa se da la pérdida de masa debido a la evaporación de agua y liberación de compuestos volátiles. En la segunda etapa, se dan reacciones exotérmicas de pirólisis, en la cual suceden modificaciones a la composición química de los granos, por causa de liberación del gas carbónico. Finalmente, la tercera etapa, es necesario detener el proceso de torrefacción, por ello, se baja la temperatura de los granos con aire a temperatura ambiente, y se evita la carbonización de los granos.

El grano entero de café es caracterizado por el proceso de tostado al que ha sido sometido; llamado grado de tueste, que se refleja en la coloración externa del grano, el desarrollo de sabores, la pérdida de masa seca que se produjo, y los cambios químicos en los componentes específicos. En términos simples, los grados de tueste se pueden llamar “claro”, “medio” o “oscuro”. Además, dependiendo de la velocidad en la que ocurra el proceso de torrefacción en: tostado “rápido” (tiempos de tostado en pocos minutos o menos) o tostado “convencional” (con tiempos de tostado en el orden de 12 a 15 minutos), pero generalmente tiempos intermedios de 5 a 8 minutos (Clarke & Macrae, 1987).

Según Clarke & Macrae (1987), el grado de tueste es importante para determinar las características de sabor de los extractos que se elaboran posteriormente a partir del café tostado, en los que la mezcla de grados de tueste y velocidad de tueste, están asociados a los llamados cafés de alta calidad.

1.4.1 Técnicas de los diversos sistemas de torrefacción

El cilindro rotativo ha sido el método de tostado más utilizado; sin embargo, existen otras técnicas de diseño que permiten la utilización de otros equipos para el tostado de café (Clarke & Macrae, 1987).

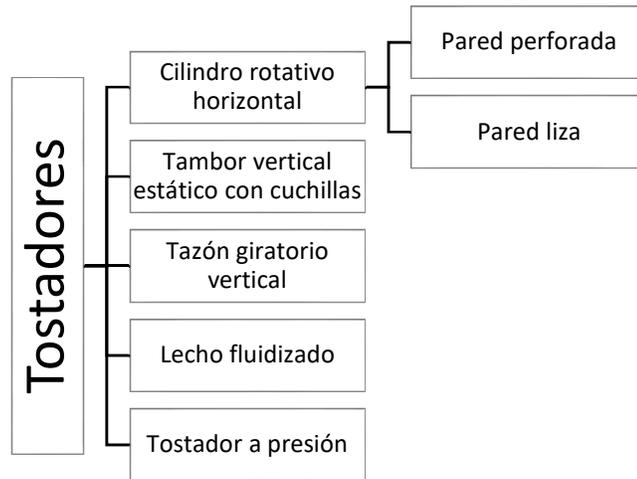
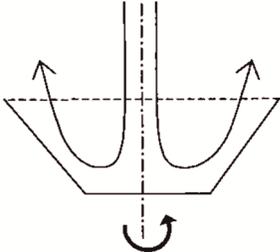
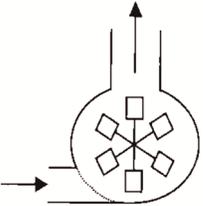
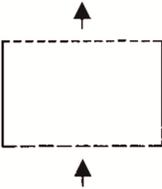
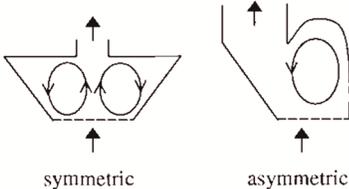
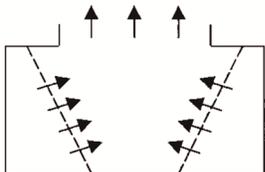


Figura 1.4. Principios mecánicos de tostado.
Fuente: (Clarke & Vitzthum, 2001)

Cuadro 1.1. Principios básicos en la tecnología moderna de tostado.
Fuente: (Illy & Viani, 2005)

Tipo	Principio	Características
Cilindro rotativo (Rotating cylinder)		<ul style="list-style-type: none"> • Horizontal/Vertical. • Con/Sin pared perforadas. • Calentamiento directo por flujo convectivo de aire caliente. • Calentamiento indirecto por las paredes del cilindro. • Operación por lotes. • Operación continua por el transporte interno. • Temperatura del aire: 400 a 500 °C. • Tiempos de tostado: 8,5 a 20 min.

<p>Tazón (<i>Bowl</i>)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento directo por flujo convectivo de aire caliente. • Operación continua a través de la corriente del aire; efecto rotativo. • Temperatura del aire: 480 a 550 °C. • Tiempos de tostado: 3 a 6 min.
<p>Tambor fijo (<i>Fixed drum</i>)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento directo por flujo convectivo de aire caliente. • Operación por lotes. • Temperatura del aire: 400 a 450 °C. • Tiempo de tostado: 3 a 6 min.
<p>Lecho fluidizado (<i>Fluidized bed</i>)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento directo por flujo de aire. • Operación por lotes. • Temperaturas del aire: 240 a 270 °C. • Tiempo de tostado: 5 min.
<p>Traducir (<i>Spouted bed</i>)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento directo por flujo de aire. • Operación por lotes. <p><i>Tostado rápido:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura del aire: 310 a 360 °C. • Tiempo de tostado: 1,5 a 6 min. <p><i>Tostado lento:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura del aire: 230 a 275 °C. • Tiempo de tostado: 10 a 20 min.
<p>Traducir (<i>Swirling bed</i>)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Entrada de aire tangencial. • Movimiento en espiral ascendente de los granos. • Transferencia directa de calor de un lecho compacto en movimiento. • Temperaturas del aire: 280 °C. • Tiempos de tostado: 1,5 a 3 min.

1.4.2 Cambios físicos

Durante el tostado ocurren cambios apreciables, principalmente asociados a los incrementos de la temperatura. El café tostado presenta cambios como en apariencia con coloraciones de marrón a negro, resistencia mecánica baja que lo hace muy frágil, incremento del volumen hasta un 100 % (tueste oscuro), disminución de la densidad (300 a 450 kg/m³) en contraste con el café crudo (550 a 700 kg/m³), muchos macro y micro poros, rompimiento en la estructura celular y el contenido de humedad debe estar cerca del 1%, si no hay enfriamiento con agua (Illy & Viani, 2005).

Además de los cambios indicados, Clarke & Macrae (1987) mencionan la liberación de los aceites, que se da de forma progresiva al incrementar el grado de tueste.

Cuadro 1.2. Cambios macroscópicos durante la torrefacción.

Fuente: (Illy & Viani, 2005)

Cambios de temperatura en el grano (°C)	Efecto
20 – 130	Transición líquido-vapor del agua (secado). Sucede decoloración.
130 – 140	Primer máximo endotérmico. Coloración amarilla e hinchazón del grano con comienzo del pardeamiento no enzimático. Formación de gases e inicio de evaporación.
140 – 160	Serie compleja de picos endotérmicos y exotérmicos. Cambios de color a marrón claro. Aumento de volumen y microporos. Eliminación de los restos de piel plateada. Grano muy frágil. Formación de pequeñas fisuras en la superficie del grano. Inicio de la liberación de aromas.
160 – 190	El efecto de tostado se mueve hacia la estructura interna del

	grano.
190 – 220	Micro fisuras dentro del grano. Liberación de humo. Escapes de gran cantidad de volumen de dióxido de carbono hacen el grano poroso. Sabor a tostado típico aparece.

1.4.3 Cambios químicos

Los cambios químicos tienen lugar para cada uno de los diferentes componentes que contiene el café crudo, los cuales durante el proceso dan lugar a características de sabor y aroma. Sin embargo, durante el proceso hay dos factores principales a tomar en cuenta, la pérdida de materia seca (Cuadro 1.4), y la liberación y retención del dióxido de carbono (Clarke & Macrae, 1987).

Según Illy & Viani (2005), durante el proceso de tostado, el agua (agua contenida en los granos crudos y el agua generada por las reacciones) junto al dióxido de carbono se liberan. Los mismos, acompañados por algunas cantidades de monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles.

El agua y el dióxido de carbono son generados por las reacciones de *Meillard*, lo que conduce a cambios en la coloración, las melanoidinas, y principalmente los compuestos orgánicos volátiles. Además, el agua y el dióxido de carbono pueden ser generados por las reacciones de pirolisis (Illy & Viani, 1995).

Cuadro 1.3. Porcentaje aproximado de las pérdidas de materia seca por grado de tueste.
Fuente: (Clarke & Macrae, 1987)

Grado de tueste	Porcentaje de pérdida de masa seca*
Claro	1 – 5
Medio	5 – 8
Oscuro	8 – 12
Muy oscuro	> 12

*En base seca del peso de café crudo

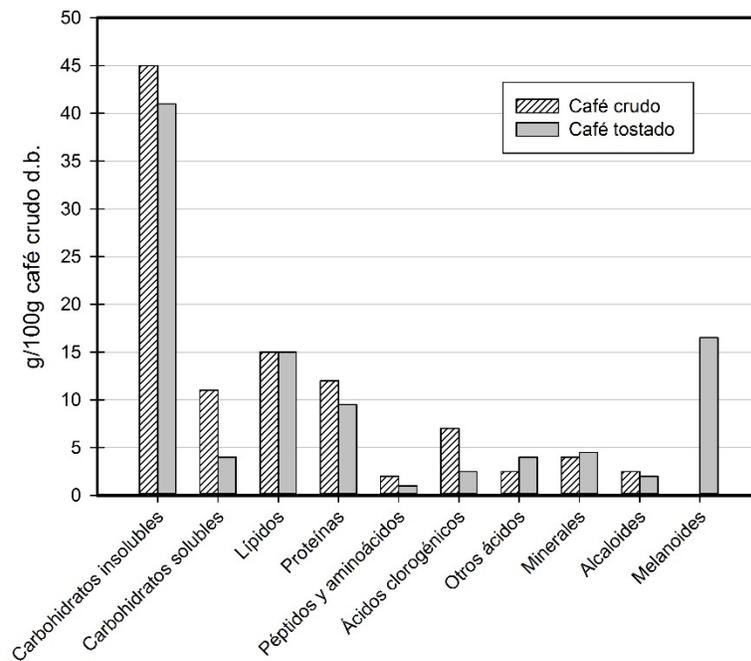


Figura 1.5. Principales familias constituyentes del café (*promedios del café arabica*).
Fuente: (Illy & Viani, 2005)

Según Clarke & Macrae (1987), después de evaporarse toda el agua contenida al inicio en el café crudo, bajo condiciones apropiadas la temperatura de inicio del tostado se lleva a cabo, cuando los granos de café llegan a una temperatura de 200 °C, momento en el cual, se dan las reacciones exotérmicas.

1.4.4 Medición de los grados de tueste

La medición del color u obtención de los diferentes grados de tueste, se basa en la experiencia del encargado del tostador, mediante la inspección visual con una escala cualitativa. En la práctica industrial son tomadas muestras de café para un determinado grado de tueste y se realizan mediciones finales cuantitativas por lecturas de reluctancia por medidores adecuados. Generalmente se procede a tostar el café, se enfría y muele, para un tamaño de partícula específico que permita su uso como indicador para obtener posteriores grados de tueste (Clarke & Macrae, 1987).

1.5 Participación en el mercado internacional de café tostado

Según López (2014), las exportaciones de café tostado en Costa Rica representaron en la última década del periodo (2004-2013), un promedio de 3,4 millones de USD, los cuales corresponden a 538 toneladas, esto es un 1% del valor y volumen del total de las exportaciones café, el resto 99% corresponden a café oro (café verde), el cual exportó un total de 279,3 millones de USD y 86 475 toneladas. Aunque la participación del café tostado en el mercado de exportaciones es bajo, para el periodo (2004-2013) se presentó un incremento promedio del valor exportado cada año de 12,6% y el volumen un 7,9%. En estas ventas participaron 15 empresas cuyo producto llegó a 25 países.

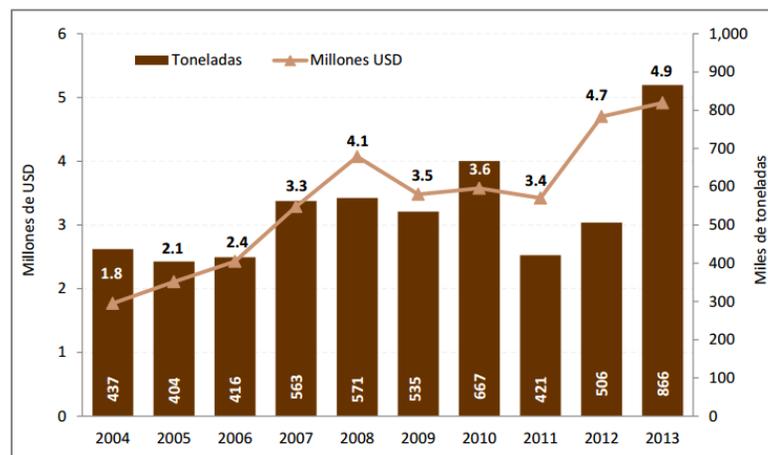


Figura 1.6. Costa Rica: exportaciones de café tostado, 2004-2013.

Fuente: (López, 2014)

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

2.1 Elaboración de las pruebas

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

2.2 Materia prima

Se utilizó granos de café provenientes del proceso de beneficiado húmedo (*full washing*) con calidad SHB (*Strictly Hard Bean*), de la cosecha 2015-2016, con tamaño de 100% sobre zaranda o criba #15, *Coffea arabica L.* variedad Caturra y Catuaí. El contenido de humedad inicial en base húmeda del café es de $0,0873 \pm 0,0008 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y con densidad aparente de $711,93 \pm 1,80 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Cada muestra se colocó en bolsas plásticas de polietileno y se almacenó en una cámara fría con una temperatura promedio de $10,0 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Con ello, se mantienen las condiciones iniciales del producto antes de los procesos de torrefacción. Previo al proceso de la torrefacción, las muestras deben ser retiradas de las cámaras frías y exponerse a temperatura ambiente por aproximadamente 12 horas.



Figura 2.1. Preparación y adecuación de las muestras.

2.3 Proceso de torrefacción

Para realizar el proceso de torrefacción del café, se utilizó un tostador convencional marca BENDIG y modelo ECO-2000. El tostador tiene un cilindro rotativo perforador a velocidad constante (60 RPM), calentamiento con quema de gas propano y una capacidad de 2,0 kg de café crudo, según las especificaciones del fabricante. El consumo de gas se mantiene constante mediante un regulador de presión instalado en el cilindro de alimentación y una válvula de control, lo que garantiza un flujo estable durante todo el proceso. El tostador cuenta con un sistema de enfriamiento por presión negativa y velocidad constante.

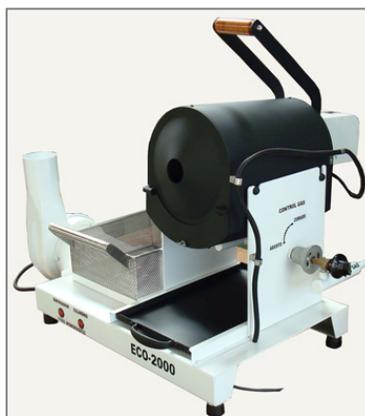


Figura 2.2. Tostador convencional, marca BENDIG / modelo ECO-2000
Fuente: (Bendig, 2016)

2.4 Determinación de la temperatura

El estudio del proceso de torrefacción se realizó al definir cuatro temperaturas iniciales del tostador. Las temperaturas preliminarmente definidas son alcanzadas mediante un flujo constante de energía del quemador hacia el cilindro rotativo, es decir, el consumo de gas constante; por lo que, conociendo previamente la temperatura máxima y mínima (curva de calentamiento), se ubican dentro del rango permisible las cuatro temperaturas.

Las temperaturas utilizadas para realizar el experimento son 260, 280, 300 y 320 °C, las cuales son registradas mediante un termopar tipo K, colocado en la cámara interna del tostador.

2.4.1 Medidor infrarrojo

Para medir la temperatura de la masa de granos y el cilindro rotativo, se utilizó un termómetro infrarrojo portátil, marca General®, que proporciona lecturas desde -32 hasta 1650 °C, con un tiempo de respuesta de 0,5 s, una precisión de 0,1 °C.

Las temperaturas registradas corresponden a la pared interna del cilindro y a la masa de granos en el proceso de tostado.



Figura 2.3. Medidor infrarrojo para registro de temperatura de masa de granos y pared interna del cilindro.

2.4.2 Sistema de recolección de datos con termopares

Se utilizó un escáner de temperatura marca Cole-Parmer Instrument Company y de fabricación Barnant Company, modelo 92000-00 Benchtop 115V. El escáner cuenta con doce canales; a estos se les colocan cables termopar tipo K para censar temperatura. Las temperaturas a medir son: la temperatura del ambiente dentro del cilindro, la temperatura del ambiente exterior.

Los datos registrados por el sistema de recolección, son enviados mediante un cable con conexión al puerto serial de la computadora, con sistema operativo Windows XP y con procesador Intel. El software de interface utilizado es ScanLink, versión 2.0.

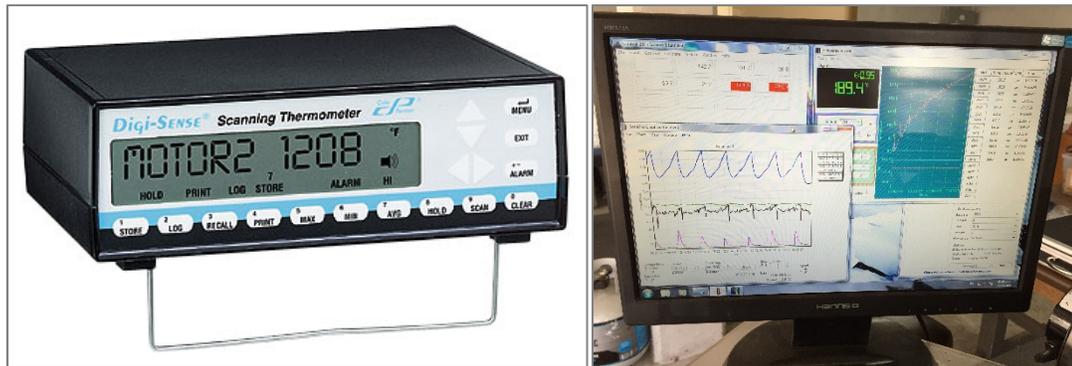


Figura 2.4. Sistema de recolección de datos de temperatura integrado.

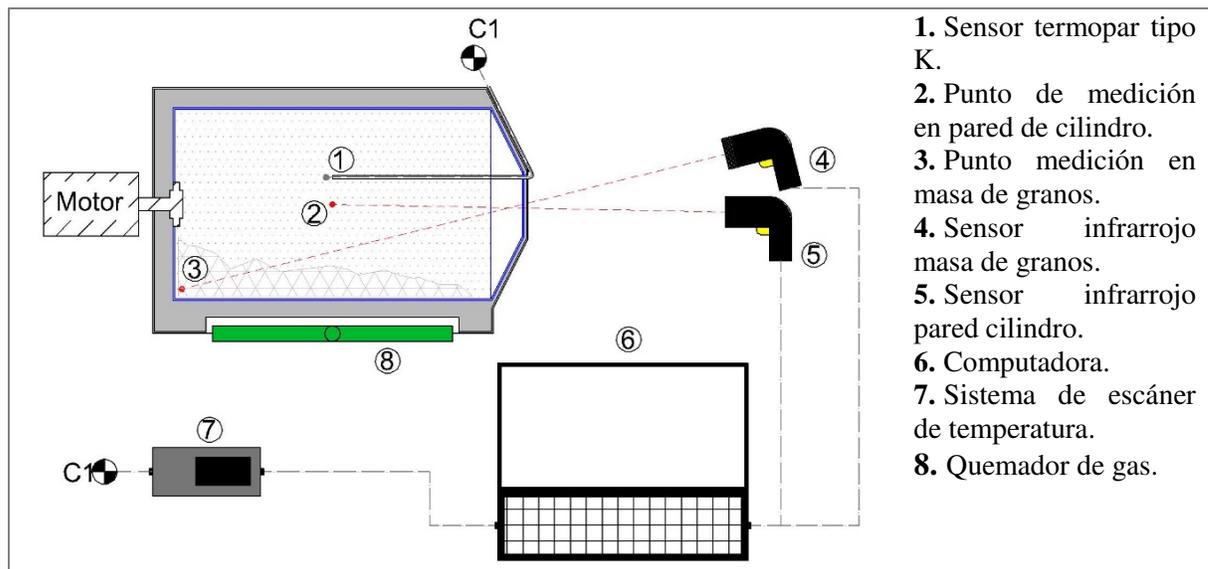


Figura 2.5. Vista de corte lateral del tostado – Esquema de registro de temperaturas.

2.5 Pérdida de masa

Posterior al proceso de torrefacción, los granos son enfriados mediante aire a temperatura ambiente. Debido al proceso de torrefacción se tiene una pérdida de masa; ésta se evalúa mediante la colocación de la muestra en una balanza digital, con precisión de 0,01 g. La pérdida de masa se determina mediante la ecuación (1):

$$\Delta M = \frac{|m_f - m_0|}{m_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

donde,

ΔM es la pérdida de masa de la muestra (%); m_0 , es la masa de la muestra de granos al inicio del proceso (kg); m_f , es el valor de la masa de la muestra de grano al finalizar el proceso de torrefacción (kg).

2.6 Evaluación del color

2.6.1 Escala de medición Agtron

La torrefacción es clasificada según el color de los granos en: media clara (MC); media (M); moderadamente oscura (MO); y oscura (O). Lo anterior según la escala de colores correspondiente a la Tabla Agtron: SCAA#65; SCAA#55; SCAA#45; y SCAA#35; respectivamente. La evaluación se realiza de manera directa contra los patrones de color.



Figura 2.6. Tabla Agtron sobre grados de torrefacción.

Fuente: (Vargas, 2011)

2.7 Masa específica aparente

La masa específica aparente o densidad aparente, es determinada mediante la aplicación de la norma INTE/ISO 6669:2009 *Café Oro – Determinación de la densidad a granel por caída libre de los granos enteros*, se utiliza un “densímetro”, el cual consiste en un tanque alimentador (embudo) por el cual se dejan fluir los granos de café en caída libre, a un recipiente de volumen conocido 1 000 mililitros (1 litro). Además de ello, con una espátula con borde recto para nivelar la cantidad de grano en el recipiente.



Figura 2.7. Densímetro, equipo para medición de densidad aparente

El cambio en la densidad aparente, es determinado mediante la ecuación (2).

$$\Delta\rho = \left(\frac{\rho_0 - \rho_f}{\rho_0} \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

donde,

$\Delta\rho$ es el cambio en la densidad aparente (%); ρ_0 es la densidad aparente inicial de los granos verdes (kg/m^3); ρ_f es la densidad aparente de la masa de granos para un determinado grado de tostado (kg/m^3).

2.8 Variación volumétrica aparente

La variación volumétrica aparente de la masa de los granos durante el proceso de torrefacción, es evaluada por medio de la relación entre el volumen para cada grado de tueste y el volumen inicial de café verde, mediante la ecuación (3).

$$\psi = \left(\frac{V_f}{V_0} - 1 \right) \quad (3)$$

donde,

ψ es la variación volumétrica aparente (adimensional); V_f es el volumen de la masa de granos para un determinado grado de tueste (m^3); V_0 es el volumen inicial de los granos verdes (m^3).

Es por ello que, conociendo la relación existente entre la densidad aparente y el volumen, se procede, según la ecuación (4).

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (4)$$

donde,

V es el volumen de la muestra (m^3); ρ es la densidad aparente (kg/m^3); m es la masa de la muestra (kg).

Se procede a sustituir en la ecuación (3),

$$\psi = \left(\frac{\rho_0 \cdot m_f}{\rho_f \cdot m_0} - 1 \right) \quad (5)$$

donde,

ψ es el índice de expansión de los granos (adimensional); ρ_f es la densidad aparente de la masa de granos para un determinado grado de tueste (kg/m^3); m_f es la masa de granos para un determinado grado de tueste (kg); ρ_0 es la densidad aparente inicial de los granos verdes (kg/m^3); m_0 es la masa inicial de los granos verdes (kg).

2.9 Modelo de expansión aparente

2.9.1 Ley de la cinética de las reacciones químicas

La ley general de las reacciones químicas se describe mediante la ecuación (6), utilizada por Vargas (2016), para determinar modelos de expansión durante el proceso de torrefacción en café arábica.

$$\frac{d\psi}{dt} = \pm k \cdot \psi^n \quad (6)$$

donde,

k es el coeficiente de variación de la expansión volumétrica de los granos ($\% \cdot m^{-1}$); $d\psi$ variación de la expansión volumétrica de los granos de café tostados (%); dt es la variación del tiempo en que ocurren las reacciones (min); n es el orden de la reacción (adimensional).

La expansión aparente durante el proceso de torrefacción fue considerada como una reacción de orden cero ($n=0$). La ecuación (6) se puede utilizar para describir el proceso de la expansión volumétrica de los granos de café en la torrefacción, según la ecuación (7).

$$\frac{d\psi}{dt} = k \quad (7)$$

Una solución de la ecuación (7) y que permite aproximar los valores de expansión volumétrica, corresponde a la siguiente.

$$\psi = k \cdot t + C \quad (8)$$

Donde,

ψ es el valor de la expansión aparente en el tiempo (%); k es el coeficiente de variación de la expansión aparente de los granos ($\% \cdot \text{min}^{-1}$); C es una constante de integración y ajuste de la ecuación (%).

2.9.2 Efecto de la temperatura

La tasa de variación de la expansión aparente se relaciona con la temperatura del tostador, según el modelo de Arrhenius, mediante la ecuación (9).

$$k = k_0 \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{R_g \cdot T_a}\right)} \quad (9)$$

donde,

k_0 es un factor pre-exponencial (min^{-1}); E_a es la energía de activación de la expansión aparente de los granos de café durante el tueste ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$); R_g es la constante de los gases ideales ($8,3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T_a es la temperatura absoluta del tostador (K).

Al integrar las Ecuaciones (8) y (9), se obtiene una ecuación de la variación relativa de la materia seca.

$$\psi = k_0 \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{R_g \cdot T_a}\right)} \cdot t + C \quad (10)$$

2.10 Determinación del contenido de humedad

El contenido de humedad es determinado, al usar la norma INTE ISO 6673:2011 *Café verde – Determinación de la pérdida de masa a 105 °C*. Para ello se realizan tres repeticiones con masa constante. A cada una de ellas se le medirá el peso inicial. La temperatura de la estufa es de $105 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ y se tienen tiempos de exposición de 16 h a presión atmosférica. La estufa utilizada es de la marca MMM Group, modelo VENTICELL y serie 111.



Figura 2.8. Estufa MMM Group/ modelo VENTICELL/ serie 111.
Fuente: (MMM-Group, 2006)

2.11 Materia seca

La materia seca se obtiene mediante la siguiente ecuación, en la cual se relaciona con el contenido de humedad y la cantidad de masa.

$$MS = (1 - CH_{bh}) \cdot m \quad (11)$$

donde,

MS es la materia seca (kg); CH_{bh} es el contenido de humedad en base húmeda (decimal); m es el valor de la masa de la muestra (kg).

El cambio en la materia seca como una propiedad que varía en el tostado del café, se evalúa mediante la ecuación (12).

$$\Delta MS = \left(\frac{MS_i - MS_f}{MS_i} \right) \cdot 100\% \quad (12)$$

donde,

ΔMS es el cambio en la materia seca (porcentaje); MS_i es la materia seca inicial (kg); MS_f es la materia seca final (kg).

Al integrar las ecuaciones (11) y (12), se obtiene.

$$\Delta MS = \left(\frac{[1 - CH_{bh_i}] \cdot m_0 - [1 - CH_{bh_f}] \cdot m_f}{[1 - CH_{bh_i}] \cdot m_0} \right) \cdot 100\% \quad (13)$$

donde,

ΔMS es el cambio en la materia seca (porcentaje); CH_{bh_i} es el contenido de humedad en base húmeda inicial de los granos verdes (decimal); m_0 es la masa inicial de los granos verdes (kg); CH_{bh_f} es el contenido de humedad en base húmeda para un determinado grado de tueste (decimal); m_f es la masa de granos para un determinado grado de tueste (kg).

2.12 Capacidad de trabajo del tostador

La capacidad de trabajo del tostador es la cantidad de masa capaz de procesar en el tiempo. Dicho parámetro se ve afectado por muchas variables, tales como: variedad, humedad inicial, cantidad de masa, temperatura, grado de tueste.

Todas las variables afectan directamente el tiempo de tueste, el cual se contabiliza como tiempo de proceso y tiempo de recuperación. La capacidad de trabajo del tostador para un grado de tueste particular, se determina mediante la ecuación (14).

$$C_T = \frac{m_0}{t_T + t_R} \quad (14)$$

donde,

C_T , es la capacidad de trabajo (kg/h); m_0 , es la masa inicial de granos verdes (kg); t_T , es el tiempo de tostado (h); t_R , es el tiempo de recuperación a la temperatura de tostado.

2.13 Modelo de calentamiento del cilindro rotativo

2.13.1 Ley de enfriamiento de Newton

La ecuación de calentamiento del cilindro toma como bases teóricas, las consideraciones hechas para aplicar el modelo de Ley enfriamiento de Newton, definido con la ecuación (15).

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T - T_a) \quad (15)$$

donde,

\dot{Q} , Es la razón de transferencia de calor hacia el cilindro rotativo (W); h , es el coeficiente de transferencia de calor por convección ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$); A , es el área superficial del cilindro rotativo (m^2); T , es el valor de la temperatura del cilindro (K); T_a , es el valor de la temperatura de calentamiento del tostador (K).

Al hacer la sustitución $T=T-T_a$, La ecuación (15), toma la siguiente forma.

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot T \quad (16)$$

Teniendo la ecuación de transferencia de calor sensible a un cuerpo, que expresa relación lineal entre la energía perdida (enfriamiento) o ganada (calentamiento) y la variación de la temperatura experimentada por el sistema.

$$\dot{Q} = m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (17)$$

\dot{Q} , Es la razón de transferencia de calor hacia el cilindro rotativo (W); m , es la masa del cilindro (kg), C_p , es el calor específico del metal del cilindro ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$); dT/dt , es cambio de la temperatura en el tiempo ($^\circ C \cdot s^{-1}$).

Al igualar las ecuaciones (16) y (17), despejar para el cambio de temperatura en el tiempo.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h \cdot A}{m \cdot C_p} \cdot T \quad (18)$$

Al hacer la sustitución,

$$k = \frac{h \cdot A}{m \cdot C_p} \quad (19)$$

Se obtiene una ecuación diferencial simple - homogénea de orden uno.

$$T' - T = 0 \quad (20)$$

Cuya solución para las condiciones iniciales $t_0 = 0$ y $T(t_0) = T_0 - T_a$.

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{k \cdot t} \quad (21)$$

2.14 Modelos de calentamiento de los granos

2.14.1 Modelo de calentamiento

El presente modelo de calentamiento para el secado de productos agrícolas propuesto por Pabis, Jayas, & Cenkowski (1998), contiene las siguientes consideraciones:

1. La temperatura del sólido es uniforme durante todo el proceso.
2. Las condiciones de secado son constantes.
3. Todas las dimensiones del sólido son constantes.
4. Las propiedades físicas del sólido son constantes.

Al considerar un sólido expuesto a un certamen de condiciones de secado. La temperatura del aire (t_a) es mayor a la temperatura inicial promedio del sólido (t_0). El calor suplido al sólido eleva la temperatura del sólido y vaporiza el agua contenida, descrito mediante la ecuación de calor transferido al grano:

$$\dot{q}_d = \dot{q}_t + \dot{q}_v \quad (22)$$

Donde,

q_d , es la tasa de transferencia de calor al grano (W); q_t , es la tasa de transferencia de calor sensible para calentamiento del grano (W); q_v , es la tasa de transferencia de calor latente para evaporar agua del grano (W).

La tasa de transferencia de calor al grano:

$$\dot{q}_d = -h \cdot A \cdot (T - T_a) \quad (23)$$

Donde,

h , es el coeficiente global de transferencia de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$); A , área de intercambio de la superficie del sólido; T , temperatura del grano en cualquier momento ($^\circ C$); T_a , temperatura del aire de calentamiento usada en el secado ($^\circ C$).

La tasa se calor sensible para el calentamiento del grano:

$$\dot{q}_t = c \cdot \rho_{sw} \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} \quad (24)$$

Donde,

c , es la capacidad calórica del grano húmedo ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$); ρ_{sw} , es la densidad aparente unitaria del grano húmedo ($kg \cdot m^{-3}$); V , es el volumen unitario del grano húmedo (m^3); dT/dt , es el cambio de la temperatura en el tiempo ($^\circ C \cdot s^{-1}$).

La tasa de transferencia de calor latente para evaporar el agua del grano:

$$\dot{q}_v = h_v \cdot \rho_{sd} \cdot V \cdot \frac{dX}{dt} \quad (25)$$

Donde,

h_v , es el calor latente de vaporización ($J \cdot kg^{-1}$); ρ_{sd} , es la densidad aparente unitaria del grano seco ($kg \cdot m^{-3}$); V , es el volumen unitario del grano húmedo (m^3); dX/dt , es la cinética de secado ($\%/s$).

El modelo de Pabis y Henderson (Pabis, Jayas, & Cenkowski, 1998) incluye un factor de forma en la cinética de secado:

$$\frac{dX}{dt} = -\Phi \cdot K \cdot (X_0 - X_e) \cdot e^{-Kt} \quad (26)$$

Donde,

Φ , es el factor de forma del sólido; K , es la constante de secado del modelo; X_0 y X_e son el contenido de humedad inicial y en equilibrio, respectivamente (%)

Al incluir las ecuaciones (23), (24), (25) y (26), en la ecuación (22) y despejando para dT/dt :

$$\frac{dT}{dt} = - \left[\frac{h \cdot A}{c \cdot \rho_{sw} \cdot V} \right] \cdot (T - T_a) - \left[\frac{h_v \cdot \rho_{sd} \cdot \Phi \cdot K}{c \cdot \rho_{sw}} \cdot (X_0 - X_e) \right] \cdot e^{-Kt} \quad (27)$$

Se define una constante S y B para agrupar algunos parámetros:

$$S = -\frac{h_v \cdot \rho_{sd} \cdot \Phi \cdot K}{c \cdot \rho_{sw}} \cdot (X_0 - X_e) \quad (28)$$

$$B = \frac{h \cdot A}{c \cdot \rho_{sw} \cdot V} \quad (29)$$

Sustituyendo en la ecuación (27),

$$\frac{dT}{dt} = -B \cdot (T - T_a) + S \cdot e^{-K \cdot t} \quad (30)$$

Se define la variable Q(t):

$$Q(t) = S \cdot e^{-K \cdot t} \quad (31)$$

Sustituyendo la variable de temperatura T,

$$T = (T - T_a) \quad (32)$$

Sustituyendo en la ecuación (30), se obtiene una ecuación diferencial lineal de primer orden:

$$\frac{dT}{dt} + B \cdot T = Q(t) \quad (33)$$

SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL:

1. Caso Homogéneo.

$$Q(t) = 0 \quad (34)$$

$$\frac{dT}{dt} + B \cdot T = 0 \quad (35)$$

$$\frac{dT}{dt} = -B \cdot T \quad (36)$$

$$\int \frac{dT}{T} = - \int B dt \quad (37)$$

$$\ln(T) = -B \cdot t + C \quad (38)$$

$$T = e^{-B \cdot t + C} = e^{-B \cdot t} \cdot e^C \quad (39)$$

$$T = c_1 \cdot e^{-B \cdot t} \quad (40)$$

2. Caso general (ecuación (29)):

$$T = C(t) \cdot e^{-B \cdot t} \quad (41)$$

Se aplica variación de parámetros para encontrar el valor de $C(t)$, en cuyo caso la ecuación (41), debe cumplir la ecuación (33):

$$\frac{dT}{dt} = C'(t) \cdot e^{-B \cdot t} - C(t) \cdot B \cdot e^{-B \cdot t} \quad (42)$$

Sustituyendo las ecuaciones (41), (42) y (31), en la ecuación (33) y resolviendo para $C'(t)$:

$$C'(t) \cdot e^{-B \cdot t} - C(t) \cdot B \cdot e^{-B \cdot t} + B \cdot C(t) \cdot e^{-B \cdot t} = S \cdot e^{-K \cdot t} \quad (43)$$

$$C'(t) = S \cdot \frac{e^{-K \cdot t}}{e^{-B \cdot t}} = S \cdot e^{(B-K) \cdot t} \quad (44)$$

$$\int C'(t) dt = \int S \cdot e^{(B-K) \cdot t} dt \quad (45)$$

$$C(t) = \frac{S}{B-K} \cdot e^{(B-K) \cdot t} + c_2 \quad (46)$$

Sustituyendo en la ecuación (41),

$$T(t) \Big|_{T(t_0)}^{T(t)} = \frac{S}{B-K} \cdot e^{-K \cdot t} + c_2 \cdot e^{-B \cdot t} \Big|_{t_0}^t \quad (47)$$

- $T(t) = T - T_a / t = t$

$$T - T_a = \frac{S}{B-K} \cdot e^{-K \cdot t} + c_2 \cdot e^{-B \cdot t} \quad (48)$$

- $T(t_0) = T_0 - T_a / t_0 = 0$

$$T_0 - T_a = \frac{S}{B-K} + c_2 \quad (49)$$

Despejando c_2 y sustituyendo en la ecuación (48),

$$c_2 = (T_0 - T_a) - \frac{S}{B - K} \quad (50)$$

Ecuación de calentamiento en el tiempo,

$$T(t) = T_a + \frac{S}{B - K} \cdot (e^{-K \cdot t} - e^{-B \cdot t}) + (T_0 - T_a) \cdot e^{-B \cdot t} \quad (51)$$

2.14.2 Modelo de calentamiento propuesto

La razón de calentamiento se calcula mediante la ecuación (52),

$$\frac{dT}{dt}(t_{n+1}) = \frac{T_{n+1} - T_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (52)$$

Donde,

dt/dt es la razón de calentamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$); T_{n+1} es la temperatura de la masa de granos en el tiempo $n+1$ ($^{\circ}\text{C}$); T_n es la temperatura de la masa de granos en el tiempo n ($^{\circ}\text{C}$)

La ecuación de calentamiento del grano, se obtiene al dar solución a la ecuación diferencial de orden uno, según la ecuación (53).

$$T' = P(t) \quad (53)$$

$$\int dT(t) = \int P(t) dt \quad (54)$$

La solución al sistema anterior, se obtiene al resolver con los parámetros iniciales.

$$t_0 = 0$$

$$T(t_0) = T_0$$

2.15 Modelo de variación de la materia seca

2.15.1 Ley de la cinética de las reacciones químicas

La ley general de las reacciones químicas se describe mediante la ecuación (55).

$$\frac{dM}{dt} = \pm k \cdot M^n \quad (55)$$

donde,

k es el coeficiente de variación de la masa seca de los granos ($\% \cdot \text{min}^{-1}$); dM variación de la masa seca de los granos de café tostados (%); dt es la variación del tiempo en que ocurren las reacciones (min); n es el orden de la reacción (adimensional).

Al considerarse que la masa seca del café durante el proceso de torrefacción no varía desde el inicio y que la variación comienza en el momento en que ocurren las reacciones químicas de transformación, en donde ocurre transporte de componentes volátiles y CO_2 hacia afuera del grano. La transformación de la materia seca en el proceso de torrefacción fue considerada como una reacción de primer orden ($n=1$). La ecuación (55) se puede utilizar para describir el proceso de la torrefacción de la materia seca en los granos de café, según la ecuación (56).

$$\frac{dM}{dt} = k \cdot M \quad (56)$$

Una solución de la ecuación (56), corresponde a la siguiente.

$$\frac{M}{M_0} = e^{k \cdot (t-t_0)} \quad (57)$$

Donde,

M es el valor de la masa seca en el tiempo (%); M_0 es el valor inicial de masa seca (%); k es el coeficiente de variación de la masa seca de los granos ($\% \cdot \text{min}^{-1}$); t_0 es el tiempo en el que inician las reacciones químicas de la materia seca (min).

2.15.2 Efecto de la temperatura

La tasa de variación de la materia seca se relaciona con la temperatura del tostador, según el modelo de Arrhenius, mediante la ecuación (9).

Al integrar las Ecuaciones (57) y (9), se obtiene una ecuación de la variación relativa de la materia seca.

$$\frac{M}{M_0} = e^{k_0 \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{R \cdot T_a}\right)} \cdot (t-t_0)} \quad (59)$$

2.16 Análisis estadístico

Se aplicó un diseño experimental factorial de 4^3 , con un total de 3 factores y 4 niveles de factor.

- Factor A: Temperatura (Cuantitativo).
- Factor B: Masa (Cuantitativo).
- Factor C: Grado de tueste (Cualitativo)

Se realizaron un total de 64 tratamientos con tres repeticiones, para un total de 192 corridas. Se evaluaron 4 temperaturas de calentamiento del tostador (260, 280, 300 y 320 °C), cuatro masas iniciales (400, 600, 800 y 1000 g) y se obtuvieron los cuatro tipos de tostado: Medio claro (MC); media (M); moderadamente oscura (MO); y oscura (O).

Los niveles del Factor C (Grado de tueste), se realizaron mediante la inspección visual con asesoría de una persona con entrenamiento en tostado y utilizando la escala de color del SCAA, que permite obtener los diferentes grados de tueste. Los datos obtenidos son sometidos a un análisis de varianza y comparados con la prueba F.

Variables respuesta: tiempo, temperatura del grano, temperatura de la pared, temperatura interna, pérdida de masa, materia seca, densidad aparente; Variación Volumétrica (expansión aparente), humedad final y color.

El software estadístico utilizado para el diseño experimental y el análisis fue Minita® 17.1.0. Para el ajuste de los modelos matemáticos utilizados, fue utilizado el programa SIGMA PLOT 12.0. El grado de ajuste de los modelos, fue evaluado a partir de la magnitud del coeficiente de determinación (r^2), del error medio relativo (P) y de la desviación estándar (SE), según las ecuaciones (60) y (61).

$$P = \frac{100}{n} \cdot \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (60)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (61)$$

donde,

Y es el valor observado experimentalmente; \hat{Y} es el valor estimado por el modelo; n es el número de datos observados; GLR son los grados del residuo (número de datos observados menos el número de parámetros del modelo).

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Evaluación térmica del tostador convencional

3.1.1 Calentamiento del tostador

En la Figura 3.1, se muestra la forma en la que el sistema pared cilindro y ambiente interno del tostador convencional de cilindro horizontal eleva su temperatura, por efecto del calor recibido de la combustión en el quemador de gas; el calentamiento descrito se realiza sin producto en el interior del tostador.

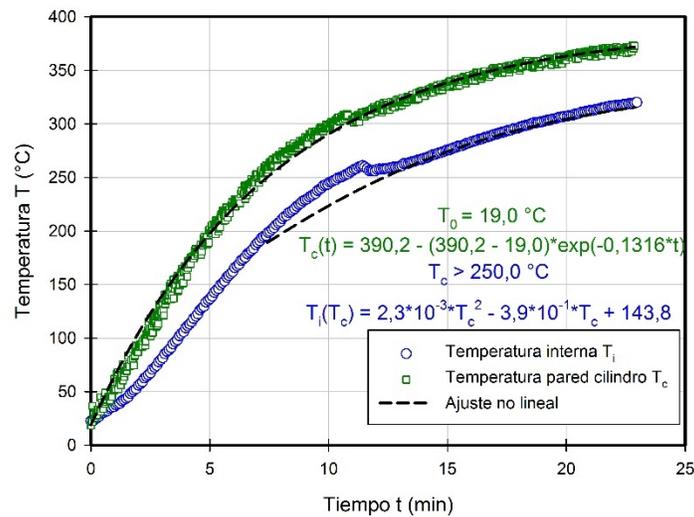


Figura 3.1. Modelos de calentamiento de cilindro rotativo (pared) e interior del tostador convencional (aire).

El calentamiento del cilindro $T_c(t)$ permite ajustar la Ecuación (21), que considera como bases teóricas la Ley de enfriamiento de Newton, aplicado a calentamiento. El modelo se ajustó con un coeficiente de correlación (r^2) de 99,51%, los parámetros T_a y k se obtuvieron con un valor-p menor a 0,0001, y la desviación estándar del modelo fue 6,86%, tomando como valor inicial de la temperatura de $T_0 = 19,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Los parámetros del modelo se aproximaron para 8 repeticiones de calentamiento, obteniéndose que la temperatura de calentamiento del sistema es $T_a = 390,22 \text{ }^\circ\text{C}$ y el valor de la constante de calentamiento $k = 0,1316 \text{ min}^{-1}$. En el Cuadro 3.1, se muestran las medias resumen de las temperaturas iniciales de la pared del tostador, para las condiciones de operación. Dichas temperaturas se relacionan con la temperatura interna del tostador al inicio de cada prueba.

Cuadro 3.1. Relación de la temperatura del cilindro rotativo y la temperatura interna iniciales del tostador, durante condiciones de operación.

Temperatura interna T_i ($^\circ\text{C}$)	Temperatura pared T_p ($^\circ\text{C}$)	Dif. de Temp. ΔT ($^\circ\text{C}$)	Tiempo calentamiento t_c (min)
261,9 \pm 0,9	312,3 \pm 8,2 A	50,4 \pm 8,4 A	10,58 \pm 1,07
280,8 \pm 0,8	333,6 \pm 5,1 B	52,8 \pm 5,4 B	12,54 \pm 2,35
300,7 \pm 1,3	359,0 \pm 3,1 C	58,3 \pm 3,1 B	16,85 \pm 0,54
320,5 \pm 0,7	368,0 \pm 4,3 D	47,5 \pm 4,3 C	22,45 \pm 0,73

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Figura 3.2, se muestra el ajuste realizado para la temperatura interna como función de la temperatura del cilindro. El ajuste se realiza tomando los valores predichos por el modelo de calentamiento del cilindro y asociándolos en el tiempo con los valores de temperatura interna.

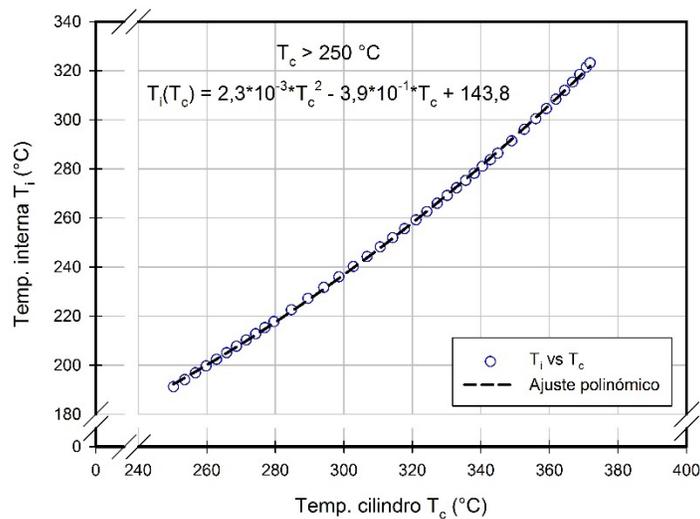


Figura 3.2. Relación de la temperatura interna y temperatura del cilindro en el calentamiento.

Para el ajuste de la temperatura interna y la temperatura del cilindro, se aproximó un modelo polinómico de grado 2, con el cual se obtuvo un coeficiente de relación (r^2) de 99,98 %. Los parámetros de la ecuación fueron obtenidos para un valor-p menor a 0,0001 y la desviación estándar del modelo (SE) fue de 0,60 %.

Para cada una de las pruebas de tostado siempre fue necesario realizar pruebas preliminares de calentamiento y tostado de café, ya que el sistema debe estabilizarse en su totalidad por los distintos gradientes de temperatura que se encuentran presentes en la estructura y proceso dentro del tostador.

3.1.2 Evaluación de la pared interna del tostador

En la Figura 3.3, se observa la variación de temperatura de la pared del cilindro rotativo durante el tiempo de tostado, la cual, disminuyó al ser introducida la masa de granos en el interior y posteriormente se presenta un incremento de temperatura. La diferencia entre la temperatura de la masa de granos y la pared fue de al menos 12 veces considerando que la temperatura inicial promedio de los granos fue de 24,7 °C.

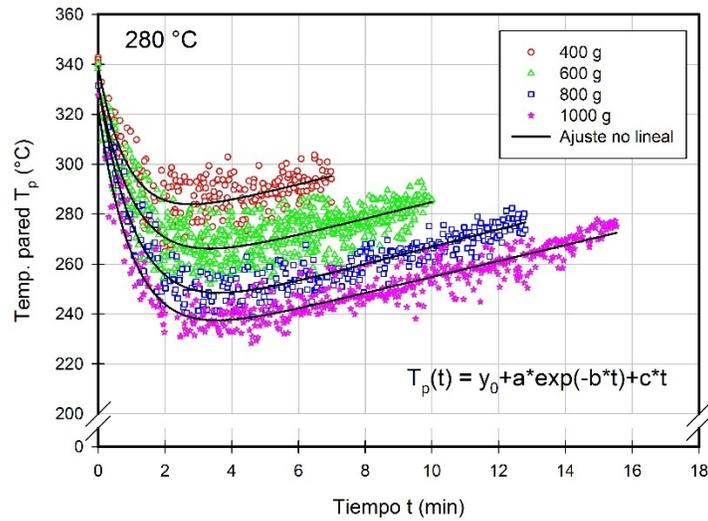


Figura 3.3. Efecto de la masa sobre la temperatura de la pared del cilindro.

El mejor modelo matemático fue un ajuste exponencial decreciente – lineal, los coeficientes de correlación varían desde 66 a 85%, para las masas menores (400 y 600 g) y mayores (800 y 1000 g), respectivamente. Lo anterior se asocia a una mayor variación de la temperatura de la pared que sucede con poca masa y proceso rápido.

El proceso de torrefacción en un tostador convencional de cilindro rotativo se realiza en condiciones transitorias, según el comportamiento de la pared interna del tostador (Vargas, 2016), lo que hace complejo los análisis del comportamiento de los fenómenos de transferencia de energía, aspecto que se comprueba en el presente trabajo y se ilustra en la Figura 3.3.

En la Cuadro 3.2 se muestran los gradientes de enfriamiento y calentamiento ocurridos al introducir las cuatro masas evaluadas.

Cuadro 3.2. Cambios en la temperatura de la pared por efecto del enfriamiento y calentamiento durante el tostado.

Masa mi (g)	Enfriamiento $-\Delta T_1$ (°C)	Calentamiento $+\Delta T_2$ (°C)
400	56	11
600	74	19
800	91	28
1000	102	35

El gradiente de temperatura de la pared del tostador se incrementa conforme se incrementa la masa colocada en el interior, para las condiciones de enfriamiento y calentamiento descritas.

El cambio en la temperatura del cilindro ocurre una vez colocada la masa de granos, el gradiente de caída de la temperatura interna aumenta conforme se incrementó la masa colocada en el interior. Mendes (2012) y Vargas (2016) determinaron que existe un gradiente de caída de temperatura en la pared interna del tostador con variaciones desde 30 a 45 °C, que ocurren como consecuencia de la introducción de una masa constante de 350 g y elevar la temperatura del tostador ajustando el regulador de quema de gas, lo que está de acuerdo con la masa de 400 g, evaluada en la presente investigación.

En el Cuadro 3.3, se muestran los parámetros estadísticos asociados al modelo ajustado para la temperatura de la pared del cilindro.

Cuadro 3.3. Parámetros estadísticos del modelo a ajuste para la temperatura de la pared.

	400 g	600 g	800 g	1000 g
Coefficientes de regresión				
A	67,7380	80,4560	100,6507	99,9939
B	1,1150	0,9295	0,8990	0,9549
C	3,3994	3,3420	3,4957	3,2100
y ₀	271,5024	251,4653	231,9621	222,6978
Valor-p				
A	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
B	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
C	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
y ₀	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Parámetros estadísticos				
R	0,8120	0,8183	0,9236	0,9246
r ²	0,6593	0,6696	0,8531	0,8549
Adj. r ²	0,6549	0,6683	0,8517	0,8541
SE	7,7136	7,3764	5,3072	5,1982
Prueba-t				
A	18,6285	38,8461	38,7539	40,2578
B	7,9010	17,6451	19,7997	24,5968
C	5,2295	15,5446	23,2956	40,0516
y ₀	77,7829	160,7016	170,1442	266,4809

Los modelos fueron aproximados con desviaciones estándar de los modelos (SE) menores a 7,71% y los parámetros “a”, “b”, y “y₀” con valores-p menores a 0,0001; lo que permite concluir que el modelo exponencial decreciente – lineal, aproxima adecuadamente el comportamiento de la pared interna del tostador, por efecto de las masas colocadas.

3.1.3 Evaluación de la temperatura interna

En la Figura 3.4, se muestra el registro de la temperatura interna del tostador registrado en el aire. La temperatura disminuye por el efecto de la masa colocada en el

interior. Dicha caída se presenta debido al diferencial de temperaturas entre la masa de granos ($T_{\text{promedio}}=24,7^{\circ}\text{C}$) y el sistema.

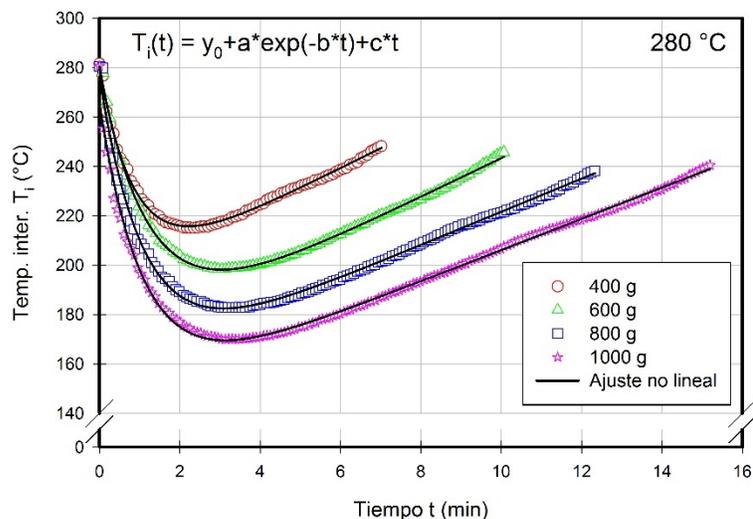


Figura 3.4. Comportamiento de la temperatura de interior del tostador al introducir la masa de granos.

Para la evaluación realizada por masa, se aproximó un modelo combinado exponencial decreciente – lineal, el cual en todos los casos obtuvo un coeficiente de correlación (r^2) del 99%. La importancia del estudio de este parámetro, radica que en la industria la mayoría de los sensores de temperatura son colocados en la cámara interna del tostador, por la facilidad constructiva lo cual permite un buen registro de lo sucedido en el interior, es decir, permite interpretar el tueste y existe buena correlación con la temperatura de los granos. En el Cuadro 3.4, se muestran los parámetros estadísticos para los modelos ajustados a la temperatura interna del tostador, tomando como temperatura inicial 280 °C.

Cuadro 3.4. Parámetros estadísticos del ajuste matemático para el comportamiento de la temperatura interna del tostador, por el efecto de masas.

	400 g	600 g	800 g	1000 g
Parámetros de regresión				
A	89,7258	114,6875	122,0400	122,4467
B	1,1480	0,8170	0,9105	0,9200
C	8,0752	7,8544	6,7267	6,3233
y ₀	190,8230	164,7584	154,3400	142,8751
Valor-p				
A	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
B	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
C	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
y ₀	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Parámetros estadísticos				
R	0,9974	0,9982	0,9970	0,9974
r ²	0,9948	0,9963	0,9940	0,9949
Adj. r ²	0,9946	0,9962	0,9939	0,9948
SE	1,0059	1,0830	1,5662	1,6607
Prueba-t				
A	115,7512	164,3359	138,7273	136,1060
B	51,3447	71,9812	63,8424	67,1348
C	59,0642	92,7251	97,4617	135,9616
y ₀	259,6716	253,6734	257,4100	298,8928

El valor-p de los coeficientes del ajuste fue menor a 0,0001 y la desviación estándar del modelo fue menor a 1,66%.

El efecto de los factores de la investigación sobre la temperatura interna se analiza mediante el cambio provocado sobre la temperatura inicial del tostador (ΔT). En la Figura 3.5, se muestran los efectos principales de la temperatura inicial, masa y grado de tueste.

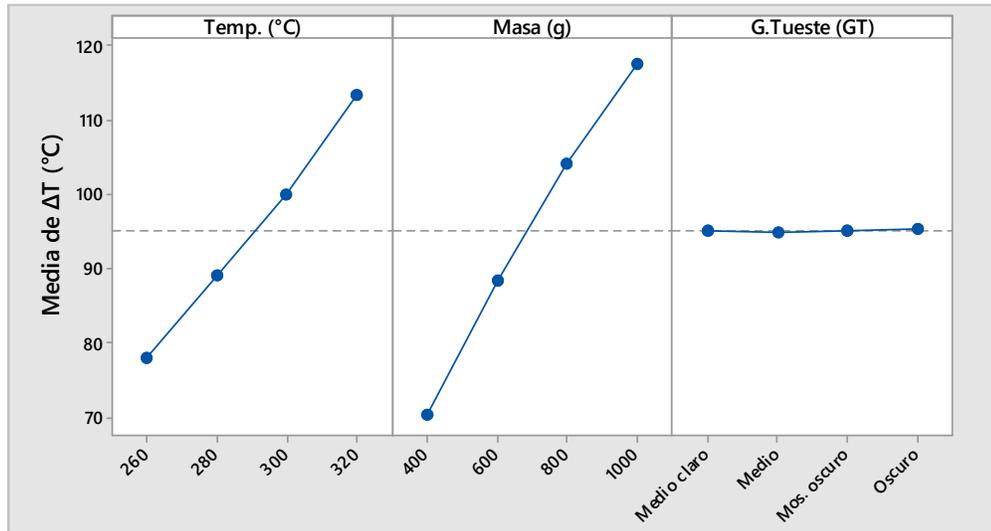


Figura 3.5. Efectos principales de los factores sobre la temperatura interna.

El análisis estadístico determinó que existen diferencias significativas por efecto de los incrementos en los niveles de factor en la temperatura y masa ($p < 0,0001$), y grado de tueste ($p = 0,0333$), para un 95% de confianza.

Los incrementos en el factor de temperatura (+20 $^{\circ}C$) aumentan la caída de temperatura en +11,7 $^{\circ}C$, mientras que los incrementos de masa (+200 g) aumentan el diferencial en +15,7 $^{\circ}C$.

En la Figura 3.6, se ilustran las interacciones entre los factores temperatura, masa y grado de tueste. Es apreciable que no existen interacciones entre los factores para las combinaciones, por lo que los efectos obedecen a los factores de manera individual.

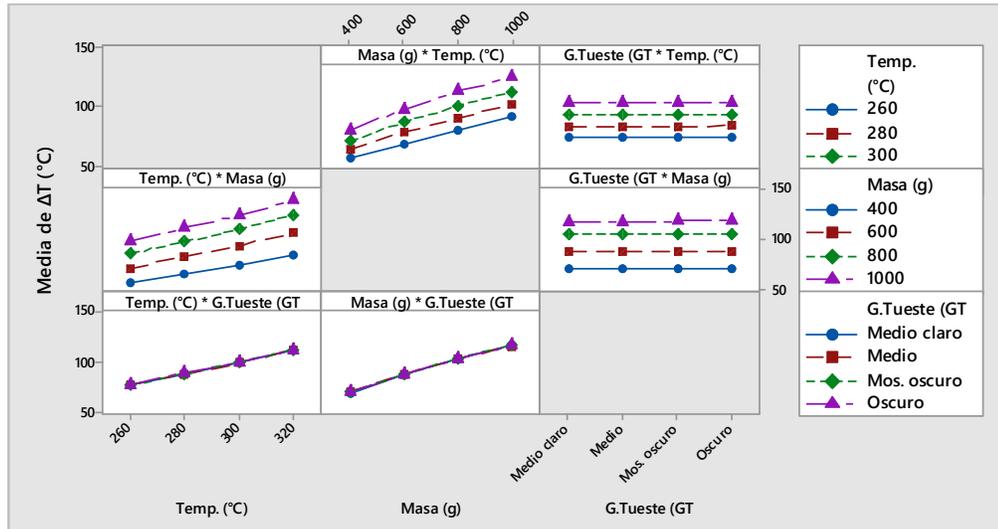


Figura 3.6. Efectos de las interacciones de los factores sobre el cambio en la temperatura interna.

El mínimo cambio reportado se dio para la masa menor (400 g) y temperatura menor (260 °C); caso similar en la condición de temperatura y masa mayores (320 °C y 1000 g), en el cual se presenta el máximo cambio de temperatura. Dichos tiempos mínimos y máximos ($2,12 \pm 0,06$ min y $3,73 \pm 0,14$ min) corresponden a los tiempos de ocurrencia de las caídas de temperatura mínimas y máximas ($57,4 \pm 0,6$ °C y $138,4 \pm 0,5$ °C), respectivamente.

La caída de temperatura interna dentro del tostador fue reportada por Schenker (2000), al evaluar dos masas (320 y 400 kg) en un tostador industrial del tipo tazón giratorio. Para cada evaluación, se registró una caída en la temperatura como consecuencia del ingreso de la masa de granos verdes.

3.1.4 Evaluación del tiempo de recuperación de la temperatura del sistema

El tiempo de recuperación es el tiempo necesario para que el tostador recupere la temperatura inicial a la cual se está realizando el proceso de torrefacción, después de realizada la extracción de la masa con un grado de tueste definido. En la Figura 3.7, se ilustra el comportamiento típico de la temperatura interna del sistema de torrefacción, en un

tostador convencional. En dicha figura se señalan dos zonas en el tiempo, que corresponden respectivamente a: (A) tiempo de torrefacción y (B) tiempo de recuperación.

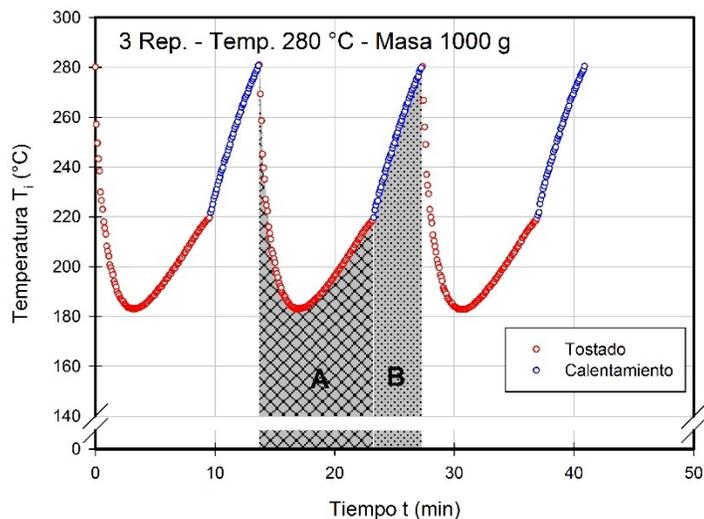


Figura 3.7. Registro de torrefacción y recuperación del tostador.
A) tiempo de tostado; B) tiempo de recuperación.

En la Figura 3.8, se muestran los efectos de la temperatura, masa y grado de tueste sobre el tiempo de recuperación de la temperatura interna del tostador.

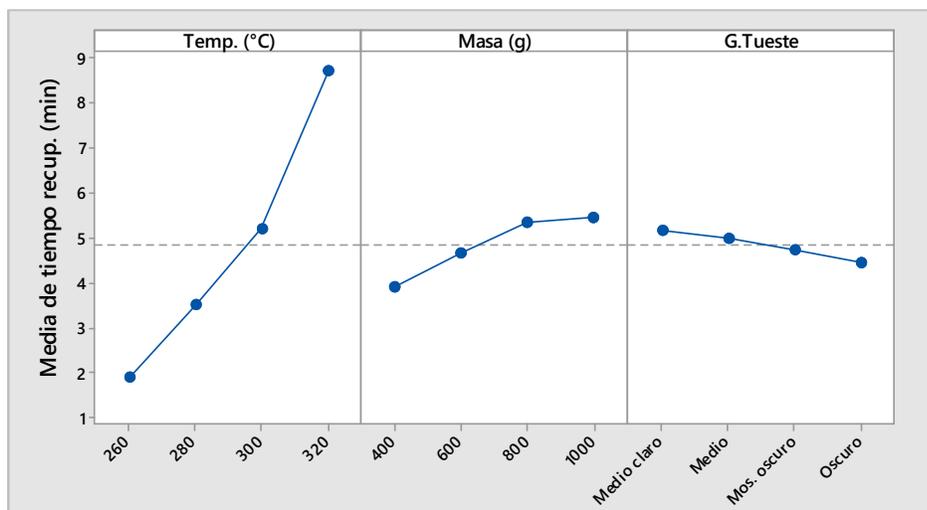


Figura 3.8. Efectos principales de los factores sobre el tiempo de recuperación.

La temperatura inicial, masa y grado de tueste mostraron diferencias significativas sobre el tiempo de recuperación ($p < 0,0001$), como consecuencia de los incrementos en los niveles del factor, para un 95% de confianza de la prueba.

El incremento de los niveles del factor temperatura (20 °C) aumentan el tiempo de recuperación en 2,22 minutos, el incremento en el factor masa (200 g) aumentan el tiempo de recuperación en 0,54 min, mientras que los incrementos en el factor grado de tueste, propician disminuciones en el tiempo de 0,23 min, los anteriores son promedios ajustado, obtenidos a partir de los gráficos de efectos.

En la Figura 3.9, se muestran las distintas combinaciones de interacciones de los principales factores. De la figura, se concluye que no existe interacción de los factores sobre el tiempo de recuperación, y que la significancia de las interacciones en los valores obedece a los efectos de los factores individualmente.

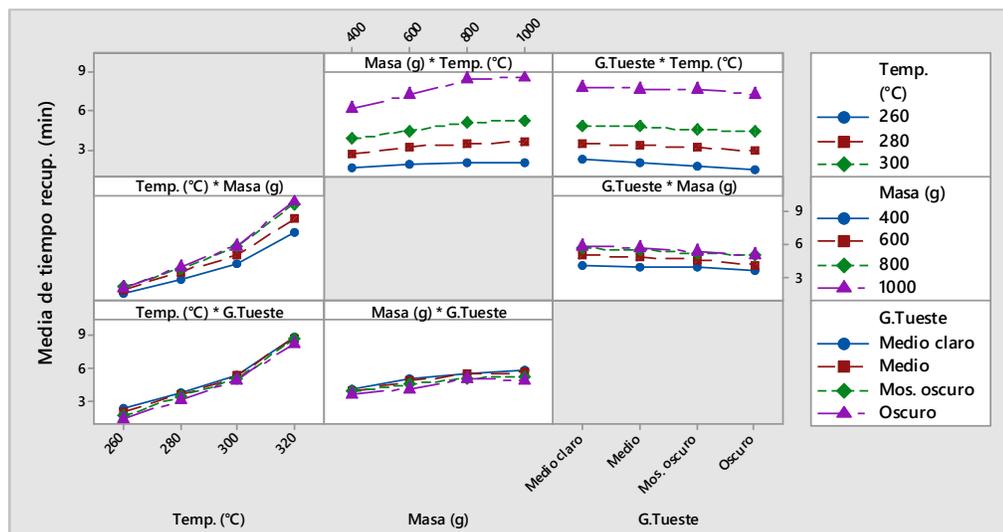


Figura 3.9. Efectos de las interacciones de los factores sobre el tiempo de recuperación.

En el Cuadro 3.5, se muestran los tiempos de recuperación promedio de las distintas masas y grados de tueste evaluados por temperatura.

Cuadro 3.5. Tiempos medios de recuperación según la temperatura inicial del tostador ($n=48$).

Temperatura T_i (°C)	Tiempo recuperación t_R (min)
261,87 ± 0,86	1,91 ± 0,47 A
280,76 ± 0,77	3,52 ± 0,53 B
300,74 ± 1,28	5,22 ± 0,73 C
320,52 ± 0,68	8,73 ± 1,22 D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Según lo mostrado en el Cuadro 3.5, el tiempo de recuperación del tostador para los diferentes tratamientos evaluados, depende principalmente de la temperatura inicial del tostador. Conforme se incrementa la temperatura inicial del tostador, mayor es el tiempo de recuperación. Dicha dependencia se describe mediante un modelo polinómico de grado dos, como se muestra en la Figura 3.10.

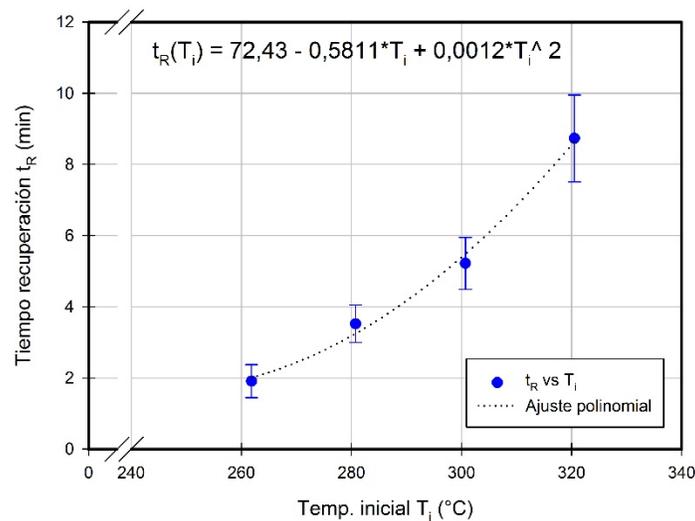


Figura 3.10. Ajuste polinómico del tiempo de recuperación como función de la temperatura inicial.

Para el ajuste polinómico se obtuvo un coeficiente de relación (r^2) de 99,37%, el valor-p para los parámetros del modelo fue menor a 0,3525 y la desviación estándar del modelo de 0,40%.

3.2 Calentamiento de la masa granos durante el proceso de torrefacción

3.2.1 Modelo de calentamiento

En la Figura 3.11, se muestra la evaluación del calentamiento de la masa de granos en movimiento, el mismo ocurre de manera constante ya que el tostado se obtuvo de manera continua, sin interrupción en la cantidad de calor suministrada por el tostador. Para dicho ajuste es utilizada la Ecuación (51), considerando la temperatura promedio inicial de la masa de granos verdes $T_0 = 24,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

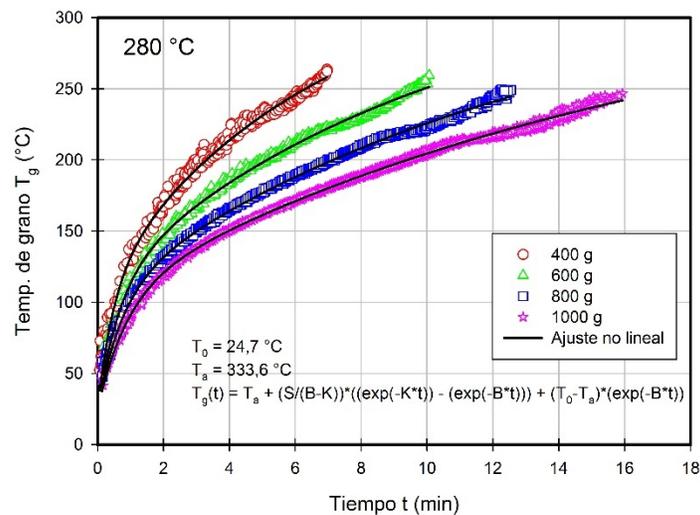


Figura 3.11. Cinética de calentamiento de los granos (T_g) para diferentes masas y mismo grado de tueste (*oscuro*).

El modelo de Pabis&Henderson mediante la ecuación 51, se ajustó adecuadamente para los datos de calentamiento de la masa de granos de café durante la torrefacción. En el Cuadro 3.6, se observan los parámetros del ajuste del modelo para cada masa, donde, el coeficiente de correlación (r^2) para todas las masas fue mayor a 99% y los parámetros del modelo S, B y K fueron determinados adecuadamente.

Cuadro 3.6. Parámetros estadísticos determinados para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de los granos durante el tueste de café – Modelo Pabis.

	400 g	600 g	800 g	1000 g
Constantes de regresión				
S	160,9260	121,4838	102,0262	84,0038
B	0,1558	0,0984	0,0751	0,0575
K	2,0368	1,4887	1,3426	1,1132
Valor-p				
S	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
B	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
K	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Parámetros estadísticos				
R	0,9951	0,9981	0,9986	0,9989
r ²	0,9902	0,9961	0,9973	0,9978
Adj. r ²	0,9902	0,9961	0,9973	0,9978
SE	4,6453	2,8053	2,4615	2,1482
Prueba-t				
S	32,1242	63,4706	89,6638	93,4692
B	97,3660	170,4434	265,3966	287,4906
K	25,3350	49,1321	70,7302	75,0525

La desviación estándar del ajuste estimado del modelo (SE) debe ser menor al 10%, lo cual para efectos del ajuste en esta investigación fue menor al 4,1%, lo que demuestra que el modelo se adecuó a las masas estudiadas.

El modelo de temperatura se compone gráficamente de dos etapas de calentamiento, la primera se observa que ocurre cerca de los 0,0 a 2,0 minutos, donde la temperatura del grano aumenta rápidamente y posteriormente se desarrolla de manera lineal hasta finalizar la torrefacción. En la Figura 3.12, se observan las bandas de confianza del modelo para las cuatro masas evaluadas.

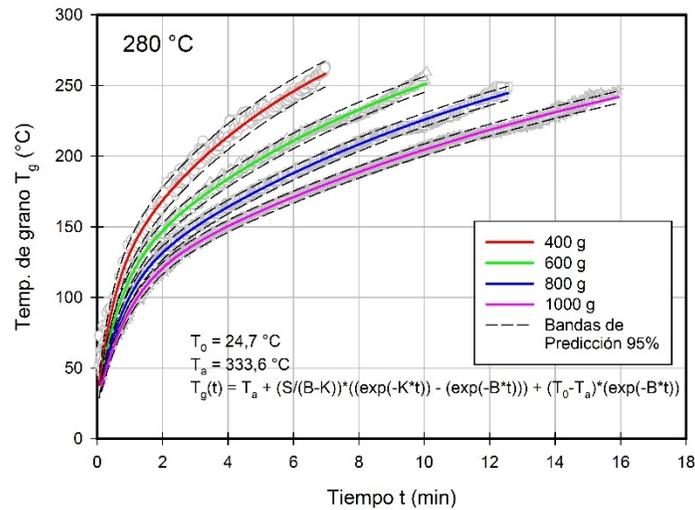


Figura 3.12. Modelo de calentamiento de la masa de granos de café durante el proceso de torrefacción con bandas de confianza a 95%, para cuatro masas.

La amplitud de las bandas de predicción disminuye conforme se incrementa la masa dentro del tostador, lo anterior asociado a una mayor uniformidad de la temperatura con mayor cantidad de granos. Un calentamiento rápido para la masa menor, produce desuniformidad de la temperatura.

Es importante mencionar, que la transferencia de energía por efecto del quemador de gas se mantuvo constante durante todo el proceso de torrefacción, por lo que las razones de calentamiento presentadas obedecen a cambios en la cantidad de masa total, considerando diferencias de materia seca y cantidad de agua, por lo que la masa menor se calienta con mayor rapidez y al incrementar la masa disminuye la velocidad de calentamiento.

En la Figura 3.13, se muestra la comprobación del modelo de calentamiento de la masa de granos respecto a los valores reales de temperatura.

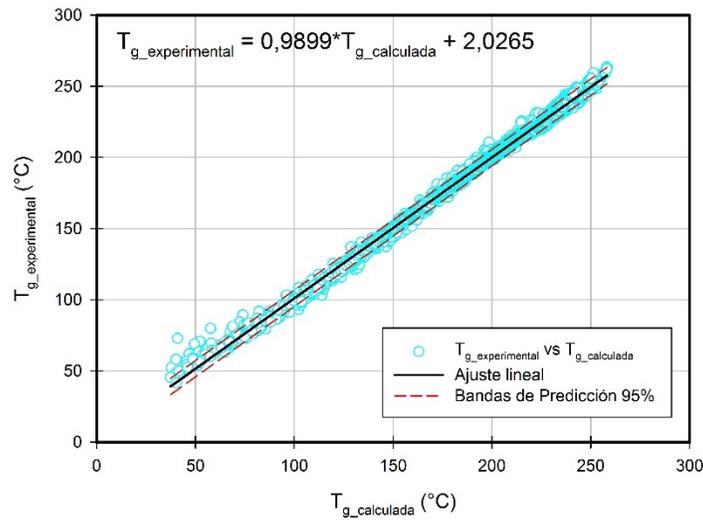


Figura 3.13. Comparación de la temperatura de los granos experimental y el modelo matemático de Pabis (n=2330).

El modelo de temperatura de Pabis, presentó un ajuste general (r^2) de 99,61, donde se aprecia que los valores iniciales de temperatura de la masa de granos no se ajustan necesariamente al modelo, lo que limita al modelo para predecir los valores al inicio del proceso, debido al calentamiento desuniforme al inicio.

El presente modelo de ajuste fue utilizado por Vargas (2016), el cual obtuvo ajustes mayores al 98%, cuando modeló para café arabica en un tostador convencional para cuatro temperaturas del tostador, ajustadas mediante la regulación de la válvula de gas.

Bustos (2015) utilizó un modelo similar de predicción de la temperatura de calentamiento del grano, basado en un modelo de masa concentrada, en el cual, la temperatura del grano depende solamente del tiempo. Determinó que al utilizar un modelo de predicción del calentamiento y omitir algunas de las fuentes de ganancia o pérdida de energía (*calor por reacciones y por evaporación*), el modelo subestima o superestima el valor de la temperatura de los granos, esto ocurre principalmente al inicio de las reacciones de torrefacción ($T_g > 150^\circ\text{C}$).

El modelo utilizado en la presente investigación subestima el calor adicionado por las reacciones de torrefacción, provocando que las aproximaciones de la constantes del modelo sean superestimadas, además, la cinética de calentamiento de los granos en un tostador convencional es diferente al tostador de lecho fluidizado, por las condiciones isotérmicas en las que se lleva a cabo el proceso, en donde predomina la transferencia de energía mediante la convección (Bustos, 2015; Vargas , 2016; Hernández et al, 2007; Fabbri et al, 2011)

3.2.2 Modelo matemático basado en la naturaleza de calentamiento de los granos de café

Para realizar el cálculo de cada una de las razones de calentamiento, se procedió a calcular las diferencias de temperatura cada 15 s. En la Figura 3.14 y 3.15, se muestra el ajuste no lineal para los valores de la razón de calentamiento de las masas, para cuales presenta ajuste *decreciente exponencial simple con tres parámetros*.

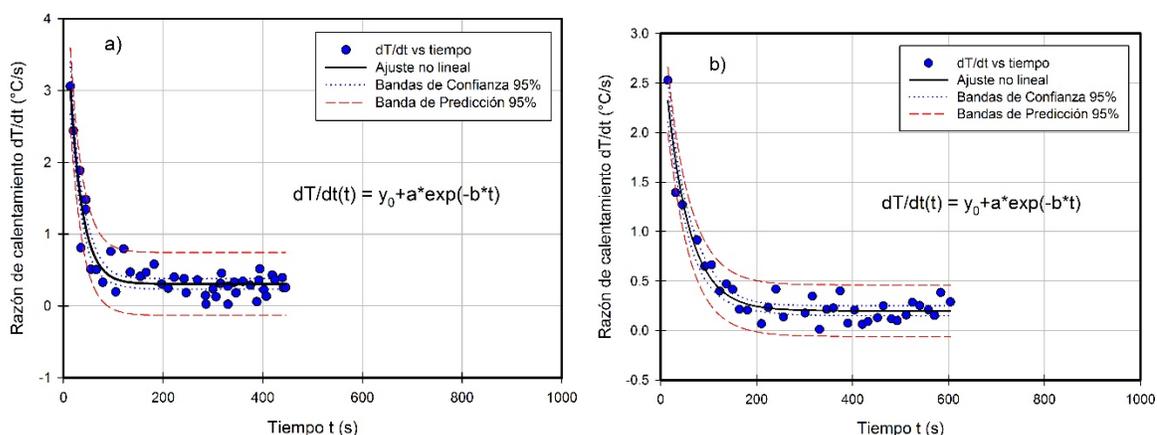


Figura 3.14. Ajustes no lineales para la razón de calentamiento de la masa de granos.
a) 400 g b) 600 g.

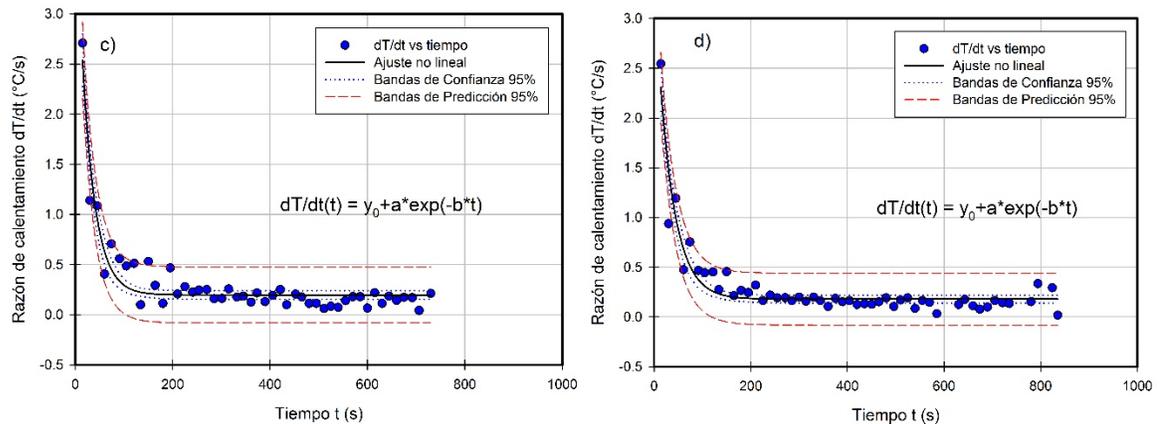


Figura 3.15. Ajustes no lineales para la razón de calentamiento de la masa de granos.
c) 800 g d) 1000 g

Mediante las razones calculadas, es apreciable que al inicio de la torrefacción sucede un fenómeno de calentamiento de manera rápida. Dicha razón de calentamiento sucede aproximadamente durante los primeros 2 minutos y posteriormente se da un calentamiento constante hasta el final del proceso, lo que está de acuerdo para tostadores convencionales en procesos no isotérmicos mencionado por Vargas (2016).

En el Cuadro 3.7 y 3.8, se muestran los parámetros respectivos a los ajustes realizados para cada masa evaluada, el coeficiente de correlación (r^2) para todas las masas fue mayor a 88%, los parámetros del modelo y_0 , a y b fueron determinados con un valor-p menor que 0,0001.

Cuadro 3.7. Parámetros estadísticos de las regresiones de cinética de calentamiento.

	400 g	600 g	800 g	1000 g
Coefficientes de regresión				
y ₀	0,3065	0,2011	0,1974	0,1797
A	4,7980	2,9076	4,1014	3,2708
B	0,0404	0,0209	0,0374	0,0307
Valor-p				
y ₀	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
A	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
B	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Parámetros estadísticos				
R	0,9402	0,9673	0,9481	0,9458
r ²	0,8840	0,9357	0,8989	0,8944
Adj. r ²	0,8783	0,9318	0,8944	0,8900
SE	0,2137	0,1252	0,1370	0,1283
Prueba-t				
y ₀	8,3231	7,9954	9,1926	9,1056
A	8,7104	14,3228	10,2507	11,6258
B	8,5543	10,2450	9,4683	9,7888

Es importante que la desviación estándar del ajuste estimado del modelo (SE) sea ser menor al 10%, lo cual para efectos del ajuste en esta investigación fue menor al 0,14%, lo que demuestra que el modelo se adecuó a las masas estudiadas. De los ajustes obtenidos para las diferentes cinéticas de calentamiento, se obtiene la ecuación (48), la cual es un ajuste general.

$$\frac{dT}{dt} = K_0 + a \cdot e^{-b \cdot t} \quad (48)$$

donde,

K_0 , es un parámetro inicial para la razón de calentamiento ($^{\circ}\text{C/s}$); a , es un factor pre-exponencial ($^{\circ}\text{C/s}$); b , es la constante de calentamiento (s^{-1}).

Al resolver la ecuación (48), se obtiene:

$$T \Big|_{T_0}^T = K_0 \cdot t - \frac{a}{b} \cdot e^{-b \cdot t} + c_1 \Big|_{t_0}^t \quad (49)$$

Para las condiciones iniciales $t_0 = 0$; $T(t_0) = T_0$,

$$T_0 = -\frac{a}{b} + c_1 \quad (50)$$

$$c_1 = \frac{a}{b} + T_0 \quad (51)$$

Sustituyendo la ecuación (49) y evaluando la condición para T_{n+1} , se obtiene la ecuación general de calentamiento de la masa de granos.

$$T(t) = T_0 + K_0 \cdot t + \frac{a}{b} \cdot (1 - e^{-b \cdot t}) \quad (52)$$

En la Figura 3.16, se muestra la evaluación de calentamiento de la masa de granos en movimiento para el modelo propuesto. Para dicho ajuste es utilizada la temperatura promedio inicial de la masa de granos verdes $T_0 = 24,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

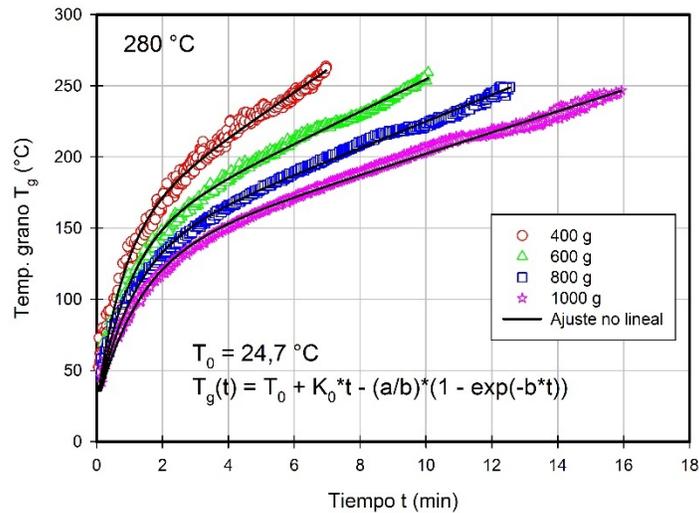


Figura 3.16. Modelo de calentamiento de los granos según su masa inicial – Modelo matemático propuesto.

El modelo se ajustó adecuadamente para los datos de calentamiento de la masa de granos de café durante la torrefacción.

En el Cuadro 3.9, se observan los parámetros del ajuste del modelo para cada masa, además, el coeficiente de correlación (r^2) para todas las masas fue mayor a 99%, los parámetros del modelo K_0 , a y b fueron determinados con un valor- p menor que 0,0001.

La desviación estándar del ajuste estimado del modelo (SE) debe ser menor al 10%, lo cual para efectos del ajuste en esta investigación fue menor al 4,4%, lo que demuestra que el modelo se adecuó a las masas estudiadas.

Cuadro 3.8. Parámetros estadísticos determinados para el modelo de regresión no lineal del calentamiento de los granos durante el tueste – Modelo propuesto.

	400 g	600 g	800 g	1000 g
Coefficientes de regresión				
K ₀	15,7492	11,3073	9,3319	7,4484
A	-153,6766	-119,2672	-96,9938	-80,0694
B	1,2170	1,0210	0,9068	0,7761
Valor-p				
K ₀	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
A	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
b	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Parámetros estadísticos				
R	0,9938	0,9973	0,9976	0,9982
r ²	0,9876	0,9947	0,9953	0,9963
Adj. r ²	0,9876	0,9947	0,9953	0,9963
SE	5,2232	3,2930	3,2303	2,7967
Prueba-t				
K ₀	54,8872	111,1684	158,5880	182,2626
a	-54,9997	-93,0161	-113,5085	-115,0170
b	36,9979	65,8154	82,7386	86,7013

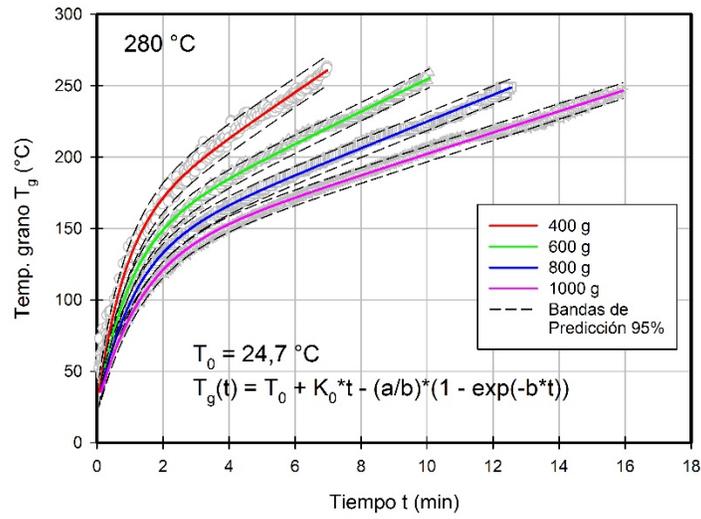


Figura 3.17. Modelo de calentamiento de la masa de granos de café durante el proceso de torrefacción con bandas de confianza a 95%, para cuatro masas – Modelo propuesto.

Al igual que en el caso anterior, la amplitud de las bandas de predicción disminuye conforme se incrementa la masa, manifestando nuevamente que el efecto de transferencia calor por conducción predomina al incrementarse la masa dentro del tostador.

En la Figura 3.18, se muestra la comprobación del modelo de calentamiento de la masa de granos respecto a los valores reales de temperatura.

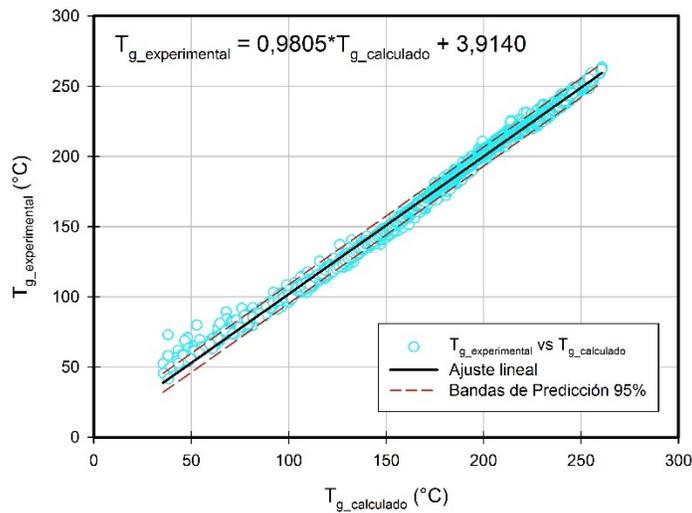


Figura 3.18. Comparación de la temperatura de los granos experimental y el modelo matemático propuesto.

El modelo de temperatura propuesto, presentó un ajuste general (r^2) de 99,47%, donde se aprecia que los valores iniciales de temperatura de la masa de granos no se ajustan necesariamente al modelo, lo que obedece a la naturaleza poco uniforme de la temperatura al inicio del proceso de torrefacción.

Fabbri et al. (2011) y Bottazi et al. (2012) determinaron la existencia de un gradiente de temperatura entre la superficie y el centro de los granos de café, durante el proceso de torrefacción; con un valor promedio de 14°C, con una duración de 300 s (5 min) después de colocada la masa en el tostador, lo que puede asociarse al calentamiento poco uniforme de los granos en su superficie.

3.2.3 Temperatura final del grano tostado

En la Figura 3.19, se muestra el efecto de los factores temperatura, masa y grado de tueste, sobre la temperatura final del grano de café tostado.

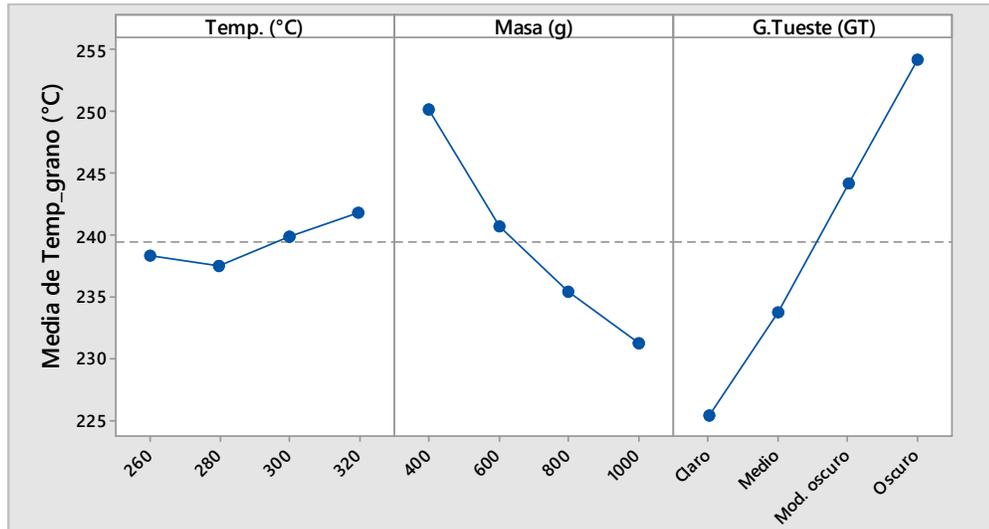


Figura 3.19. Efecto de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre la temperatura final de grano.

El incremento en la temperatura del tostador (+20 °C) provocó efectos sobre la temperatura final de la masa de granos, estadísticamente fue similares en las temperaturas de 260 y 280 °C ($p>0,05$). La diferencia de temperatura final de la masa de café tostado para el tratamiento de mínima y máxima temperatura inicial del tostador es de 3,84 °C, lo que puede llegar a ser imperceptible, por el comportamiento térmico que se desarrolla dentro del tostado. Es decir, los incrementos en la temperatura de calentamiento no llegan a ser representativos para diferenciar la temperatura final del proceso por su efecto sobre el café tostado.

El aumento en la cantidad de granos con incrementos en masa (+200 g) generó disminuciones significativas en la temperatura final del café tostado para los diferentes grados de tueste, es decir, al incrementar la masa se obtiene un mismo grado de tueste a una temperatura menor del grano. Las diferencias entre las masas de 400 y 600 g pueden llegar hasta los 10 °C, mientras que las masas de 600, 800 y 1000 g presentan diferencias de 5 °C, en la temperatura final del proceso, según se observa en Figura 3.19.

Los incrementos en el grado de tueste (+grado tueste) generan aumentos en valor final de la temperatura del café tostado, dichos aumentos son aproximadamente de 10 °C entre grados de tueste, lo que está de acuerdo con Vargas (2016), que obtuvo muestras a cada 10°C de café tostado, lo que generó diferencias en los grados de tueste con cambios de temperatura del tostador y masa constante (350 g).

En la Figura 3.20, se muestran las interacciones entre los factores del experimento y su efecto sobre la temperatura final del grano (T_g).

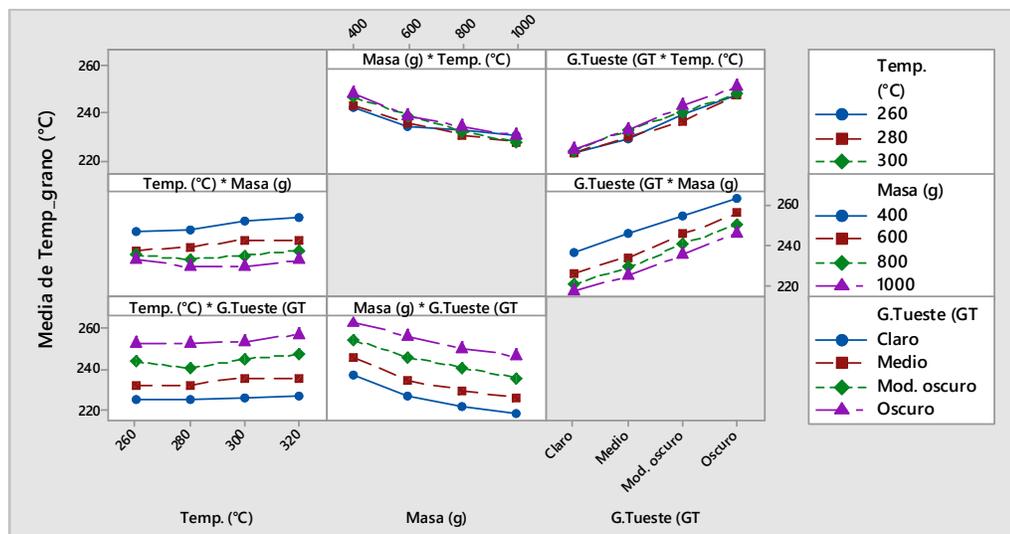


Figura 3.20. Efectos de las interacciones entre los factores sobre la temperatura final de grano.

En la Figura 3.20 se observa que no hay interacción entre los factores del experimento y que el efecto sobre de la temperatura final del café tostado obedece a los efectos de los factores de manera individual.

Los modelos lineales representan el calentamiento de la masa de granos cuando se llega a cada grado de tueste, se ajustaron con un coeficiente de correlación (r^2) mayor a 96%, con una desviación estándar de los modelos menor a 2,55% y los parámetros fueron obtenidos con un valores-p menores 0,0178, según se muestra en la Figura 3.21.

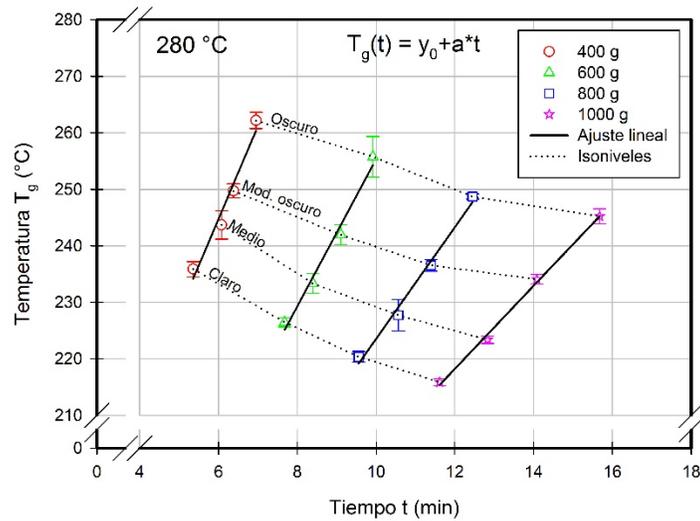


Figura 3.21. Temperatura de la masa de granos para los cuatro grados de tueste.

En el Cuadro 3.10 y 3.11, se muestran los parámetros estadísticos asociados a cada uno de los coeficientes de los modelos de temperatura de la masa de granos de café para los diferentes grados de tueste.

Cuadro 3.9. Parámetros estadísticos de los modelos de calentamiento de la masa de granos.

	400 g	600 g	800 g	1000 g
Coefficientes de ajuste				
y_0	146,1553	124,8971	124,7678	129,9462
a	16,4335	13,0489	9,8771	7,3555
Valor-p				
y_0	0,0088	0,0074	0,0044	0,0009
a	0,0178	0,0087	0,0058	0,0015

Parámetros estadísticos				
R	0,9822	0,9913	0,9942	0,9985
r ²	0,9647	0,9826	0,9885	0,9970
Adj. r ²	0,9471	0,9739	0,9828	0,9956
SE	2,5553	2,0417	1,6034	0,8538
Prueba-t				
y ₀	10,5771	11,5345	15,0009	33,6011
a	7,3936	10,6203	13,1139	25,9353

3.2.4 Relación entre la temperatura final de la masa de granos y la temperatura interna el tostador

En la Figura 3.22, se muestra la relación entre la temperatura final del grano y la temperatura interna del tostador (aire).

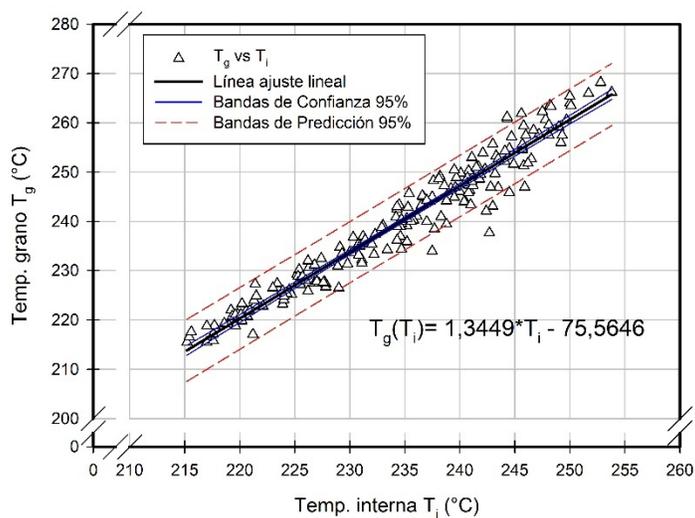


Figura 3.22. Relación entre la temperatura de la masa de granos tostados (T_g) y la temperatura interna del tostador (T_i), aire en contacto con el grano.

El modelo lineal que relaciona la temperatura de la masa de granos con la temperatura interna del tostador, durante en el rango de temperaturas de los tuestes

comerciales, obtuvo un coeficiente de correlación (r^2) de 94,44 %, los parámetros a y y_0 del modelo se obtuvieron para un *valor-p* menor a 0,0001 y la desviación estándar del modelo fue 3,15 %.

Al igualar las temperaturas de la masa de granos y la temperatura interna, es posible determinar la temperatura de equilibrio, en la cual, la masa de granos en calentamiento alcanza el equilibrio con la temperatura interna del tostador. A partir de ahí, la temperatura de la masa de granos es mayor a la interna. Esto se consigue haciendo $T_i = T_g$, al despejar de la ecuación presentada en la Figura 3.22, se obtiene que la temperatura de equilibrio es aproximadamente 219,1 °C.

Los *cracks* son explosiones, rupturas o quebramientos de la estructura del grano de café, como consecuencia de la salida de CO₂ y el vapor de agua, para la temperatura de 219,1 °C durante la ejecución de las pruebas reportó la mayor incidencia de cracks, posterior al primer *crack* para las masas de 600, 800 y 1000 g se reportó para la temperatura de la 210 °C, momento en el que se obtuvo el grado de tueste medio claro.

3.3 Efecto de la temperatura de calentamiento, masa inicial y grado de tueste sobre el tiempo de torrefacción

En la Figura 3.23 se muestra el efecto de los factores de temperatura, masa y grado de tueste sobre el tiempo de torrefacción (t). Dicho gráfico se construye con las medias ajustadas de los efectos de cada factor sobre el tiempo de tostado.

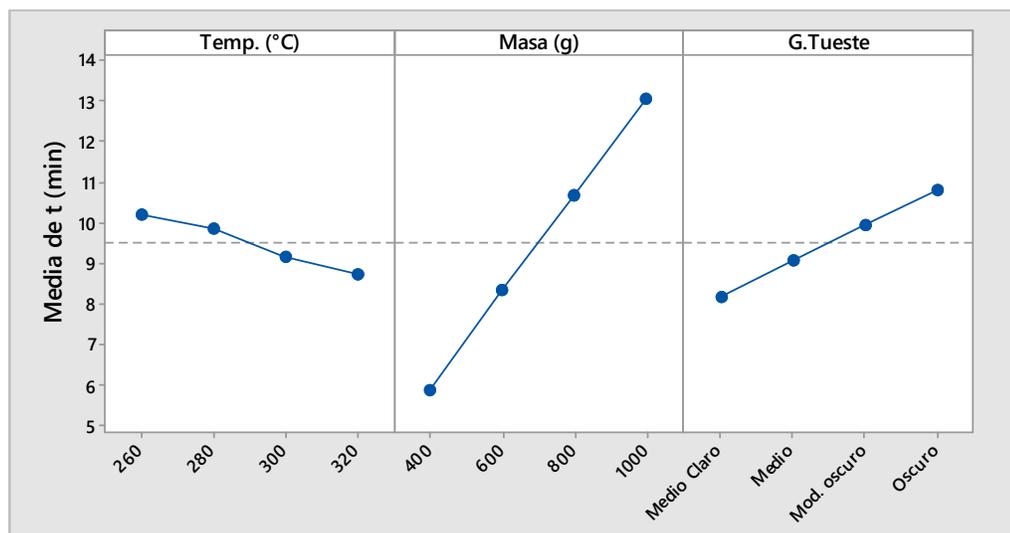


Figura 3.23. Efectos principales de los factores sobre el tiempo de torrefacción.

Del análisis estadístico, se obtiene que existe un efecto significativo de cada uno de los factores analizados ($p < 0,0001$), sobre el tiempo de tueste, para un nivel de confianza de un 95%.

El efecto de los incrementos de temperatura en 20 °C, significó disminuciones en el tiempo de tostado de 0,50 min, los efectos de los incrementos en la masa de 200 g, aumentaron el tiempo de tueste en aproximadamente 2,40 min y el efecto de incrementar el grado de tueste, causa aumentos de 0,90 min. Todos los valores anteriores, son promedios obtenidos a partir de los modelos lineales de tiempo como función de los factores del experimento, gráfico de efectos (Figura 3.23).

Los incrementos en la temperatura de calentamiento del tostador no aportaron mayor significancia en el tiempo de tueste, para la temperatura menor (260 °C) los tiempos son los adecuados, según las recomendaciones que permiten mantener la calidad, sin embargo, la masa es un factor importante que afecta más el tiempo de torrefacción.

En el Cuadro 3.12 se muestra el cambio promedio en el tiempo de tostado por causa del incremento máximo en los niveles de los factores de la investigación, el mayor efecto por incremento del factor se obtiene al variar la masa (400 – 1000 g) en el cual el tiempo se incrementa en promedio 7,18 min, mientras que pasar del grado de tueste medio claro al oscuro incrementa el tiempo de tueste 2,64 min; la temperatura muestra un efecto opuesto a los anteriores, ya que el variar la temperatura de 260 hasta 320 °C disminuyó el tiempo de tueste 1,43 min en promedio.

Cuadro 3.10. Cambio promedio en el tiempo de tueste por el diferencial máximo entre los factores de temperatura, masa y grado de tueste.

Factor	Δ Máx. ¹	Δt (min)
Temperatura	60 °C	-1,43
Masa	600 g	7,18
Grado de tueste	M.C. – O.	2,64

Al analizar la interacción entre factores (Figura 3.24), se obtiene que no existe una interacción entre los factores del experimento temperatura y masa, ya que los aportes en el tiempo son constantes para todas las evaluaciones y gráficamente son paralelas. El aporte de significancia sobre el tiempo es debido a los factores individuales y no como resultado de su interacción.

¹ Δ Máx.: corresponde a la diferencia entre el los niveles superior e inferior de los factores de temperatura (T), masa (M) y grado de tueste (GT).

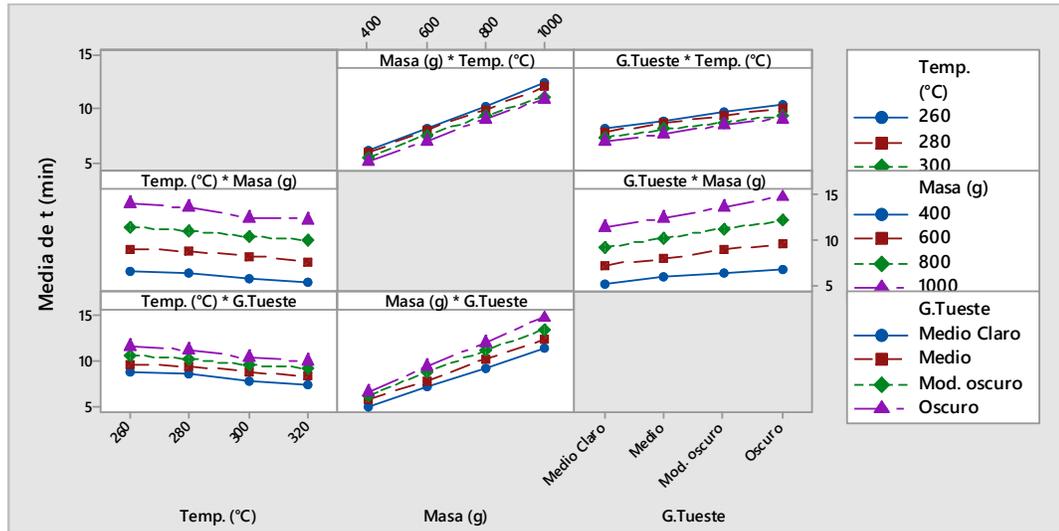


Figura 3.24. Efectos de las interacciones de los factores sobre el tiempo de torrefacción.

El mayor tiempo de tostado se obtuvo para la temperatura de 260 °C, la masa de 1000 g y el grado de tueste oscuro (16,17±0,04 min), y el menor tiempo para la temperatura de 320 °C, la masa de 400 g y grado de tueste medio claro (4,39±0,05 min).

En el Cuadro 3.13, se muestran los tiempos necesarios para obtener los grados de tueste, para cada una de las masas y temperaturas evaluadas. El análisis de los tiempos se realiza evaluando el efecto de la masa y la temperatura, para cada grado de tueste, es decir; el análisis de medias se realizó por columna. Se realiza una categorización utilizando el factor *Grado de tueste*, ya que, para efectos industriales, los grados de tueste se consideran productos distintos, por las características físicas que los mismos contienen.

Cuadro 3.11. Comparativo del tiempo de torrefacción por temperatura y masa iniciales, para cada grado de tueste (n=3).

Temp. Ti (°C)	Masa mi (g)	Tiempo t (min)			
		Medio claro	Medio	Mod. Oscuro	Oscuro
262	400	5,52 ± 0,17 ^K	6,23 ± 0,18 ^I	6,82 ± 0,12 ^J	7,33 ± 0,12 ^I
	600	7,67 ± 0,08 ^H	8,11 ± 0,20 ^G	9,48 ± 0,12 ^F	10,23 ± 0,03 ^G
	800	9,81 ± 0,05 ^E	10,87 ± 0,13 ^D	12,04 ± 0,21 ^C	12,76 ± 0,06 ^D
	1000	12,26 ± 0,09 ^A	13,32 ± 0,03 ^A	14,29 ± 0,05 ^A	16,17 ± 0,04^A
281	400	5,36 ± 0,03 ^K	6,08 ± 0,18 ^I	6,38 ± 0,12 ^K	6,95 ± 0,03 ^I
	600	7,68 ± 0,13 ^H	8,39 ± 0,11 ^G	9,11 ± 0,09 ^G	9,92 ± 0,17 ^G
	800	9,56 ± 0,05 ^E	10,57 ± 0,26 ^D	11,39 ± 0,13 ^D	12,45 ± 0,10 ^D
	1000	11,62 ± 0,10 ^B	12,83 ± 0,03 ^B	14,08 ± 0,23 ^A	15,68 ± 0,36 ^B
301	400	4,71 ± 0,16 ^L	5,59 ± 0,14 ^J	5,99 ± 0,11 ^L	6,38 ± 0,09 ^J
	600	6,96 ± 0,01 ^I	8,01 ± 0,03 ^G	8,63 ± 0,14 ^H	9,10 ± 0,06 ^H
	800	8,79 ± 0,08 ^F	9,89 ± 0,12 ^E	10,86 ± 0,13 ^E	11,91 ± 0,26 ^E
	1000	11,13 ± 0,35 ^C	11,83 ± 0,12 ^C	12,82 ± 0,08 ^B	13,93 ± 0,03 ^C
321	400	4,39 ± 0,05^L	5,01 ± 0,03 ^K	5,49 ± 0,02 ^M	5,90 ± 0,07 ^K
	600	6,31 ± 0,08 ^J	7,15 ± 0,17 ^H	8,10 ± 0,03 ^I	8,71 ± 0,06 ^H
	800	8,36 ± 0,03 ^G	9,48 ± 0,02 ^F	10,64 ± 0,05 ^E	11,38 ± 0,08 ^F
	1000	10,48 ± 0,14 ^D	11,76 ± 0,04 ^C	12,87 ± 0,07 ^B	13,94 ± 0,08 ^C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Según ICO (2016) y Clarke & Macrae (1987), el tiempo de tueste para cafés de calidad debe ser aproximadamente entre 8 a 15 minutos, de tal forma que se mantengan las características de calidad del café tostado. En la presente investigación todos los tiempos de los diferentes tratamientos cumplen con los tiempos especificados, lo que permite afirmar

que las condiciones de calentamiento y masa definidos, permiten obtener los diferentes grados de tueste manteniendo la calidad del café.

Vargas (2011) determinó que la torrefacción a alta temperatura permite obtener tiempos inferiores a 15,8 minutos, para los cuales las evaluaciones de la calidad de taza obtuvieron buenas puntuaciones, además, estableció como límite de tiempo para obtener cafés con buena puntuación, tiempos menores a 17 minutos en torrefacción.

Los resultados de esta investigación están de acuerdo con Nagaraju et al (1997), quienes compararon las masas de 1000 y 750 g, determinando que diferencias de 250 g generaron diferencias significativas en el tiempo de tostado, cuando se trabajó con el mismo tipo de tueste en los granos y bajo las mismas condiciones de temperatura de proceso, con la diferencia que el tostador trabajó con aire caliente y la forma del grano fue elipsoidal denominado como caracolillo (peabeans coffee).

3.3.1 Evaluación de la capacidad de trabajo

La capacidad de trabajo del tostador es la cantidad de masa capaz de procesar en un tiempo determinado, afectado por la cantidad de masa colocada en el interior, la temperatura de operación y el grado de tueste objetivo. Al conocer los tiempos de tostado para las diferentes condiciones de operación, se puede realizar una evaluación de la capacidad de trabajo del tostador para hacer un uso eficiente de la energía y optimizar el tiempo de proceso.

En la figura 3.25, se muestran el efecto sobre la capacidad de trabajo de los incrementos para los niveles de los factores de temperatura, masa y grado de tueste en tostador convencional.

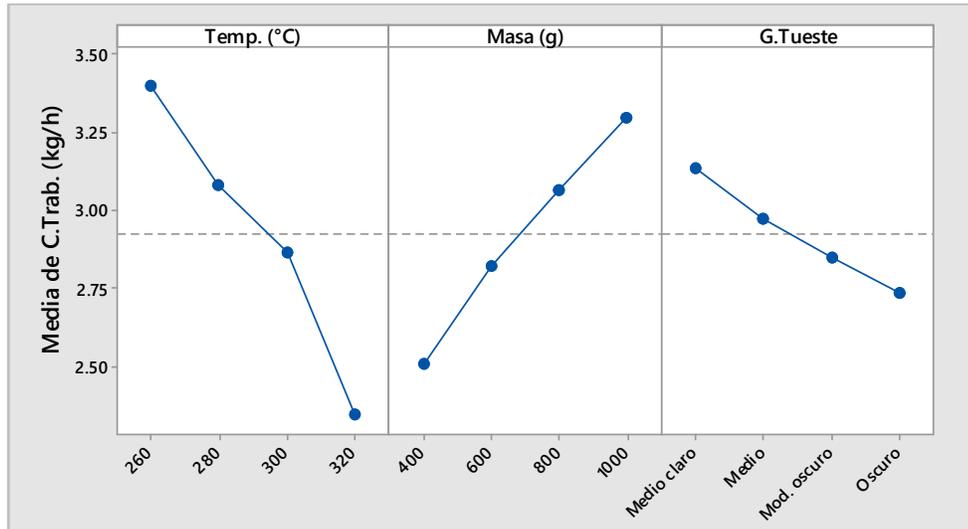


Figura 3.25. Efectos principales de los factores sobre la capacidad de trabajo.

Del análisis estadístico, los factores de temperatura de calentamiento, masa y grado de tueste tienen un efecto significativo ($p < 0,0001$) sobre la capacidad de trabajo del tostador, con una confianza de la prueba de 95%.

El efecto de la temperatura muestra que incrementos de 20 °C, provocan disminuciones en la capacidad de trabajo en 0,34 kg/h, mientras que incrementos de 200g en los niveles de masa, incrementan la capacidad de trabajo en 0,26 kg/h, finalmente, incrementos en los niveles del factor grado de tueste, disminuyen la capacidad en 0,13 kg/h.

La mayor capacidad de trabajo se obtuvo para la temperatura de 260 °C, masa de 1000 g y grado de tueste Claro (4,09 kg/h), mientras que la menor capacidad de trabajo se obtuvo con la temperatura de 320 °C, masa de 400 g y grado de tueste Oscuro (1,83 kg/h).

A mayor temperatura de proceso, disminuye el tiempo de tueste y aumentan los tiempos de recuperación del sistema, lo cual impacta de forma negativa la capacidad de trabajo.

3.3.2 Efecto de la masa inicial sobre el tiempo de tostado

La masa demostró tener un efecto superior al de la temperatura sobre el tiempo de tostado, de ahí que sea importante analizar el comportamiento de este proceso, de manera que permita aproximar los tiempos de tostado a partir de la masa que se va a procesar.

En la Figura 3.26, se muestra la relación lineal de la masa de granos crudos con el tiempo de proceso, para cuatro grados de tueste, con un coeficiente de determinación de 99%.

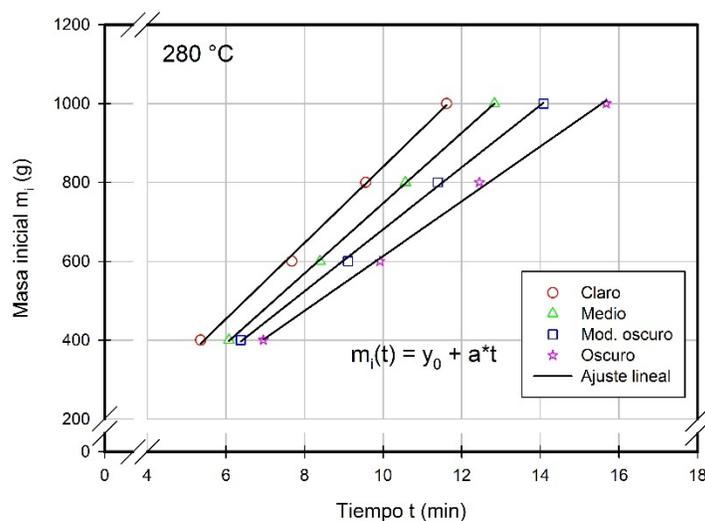


Figura 3.26. Efecto de la masa de granos crudos sobre el tiempo de tueste (t).

La ecuación general de la Figura 3.26, muestra el efecto lineal de la masa inicial sobre el tiempo de torrefacción, se muestra en la ecuación (62).

$$m_i(t) = y_0 + a \cdot t \quad (62)$$

donde, m_i es la función de masa inicial en el tiempo (g); y_0 es un valor de intersección de la ecuación de ajuste sobre el eje y (g); a es la pendiente de la ecuación de ajuste que describe la razón de masa en el tiempo ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$); t es el tiempo (min)

En el Cuadro 3.14, se muestran los parámetros del modelo lineal por cada grado de tueste. Al estudiar el parámetro a (pendiente), describe la relación entre la masa inicial y el tiempo, se observa que conforme se incrementa el grado de tueste, disminuye dicho valor. La razón principal es que, al incrementar la masa consecuentemente se incrementa el tiempo para obtener una condición determinada de tueste, es decir; existe una interacción entre los grados de tueste y la masa inicial, los resultados están de acuerdo a lo encontrado por Abarca et al. (2016), con evaluaciones de masa cada 250 g (250 – 1250 g) y café *C. arabica*.

Cuadro 3.12. Parámetros estadísticos de los modelos de masa inicial como función del tiempo.

	Claro	Medio	Mod. oscuro	Oscuro
Coefficientes de regresión				
y_0	-126,3535	-143,7804	-105,2573	-81,8912
A	96,6338	89,1187	78,6363	69,5100
Valor-p				
y_0	0,0373	0,0025	0,0330	0,0844
A	0,0009	<0,0001	0,0006	0,0010
Parámetros de regresión				
R	0,9991	0,9999	0,9994	0,9990
r^2	0,9983	0,9999	0,9989	0,9980
Adj. r^2	0,9974	0,9998	0,9983	0,9971
SE	13,1104	3,7168	10,4920	13,9710
Prueba-t				
y_0	-5,0307	-19,8174	-5,3657	-3,2204
A	34,0820	120,3128	42,6009	31,9788

3.3.3 Modelo de predicción del tiempo de torrefacción

Estudiar el efecto de la masa de granos crudos sobre el tiempo, permite determinar un modelo que aproxime de forma práctica los tiempos de tueste para condiciones predeterminadas por un usuario tostador. Es por ello, que se propone el siguiente modelo basado en la masa inicial y en un parámetro físico cuantificable como lo es la pérdida de masa total.

Al despejar la ecuación (62) para obtener una función de tiempo dependiente de la masa inicial (m_i).

$$t(m_i) = \frac{m_i - y_0}{a} \quad (63)$$

En la Figura 3.27, se muestran los ajustes de los parámetros de la Cuadro 3.14 asociados a cada uno de los grados de tueste según la pérdida de masa total (ΔM).

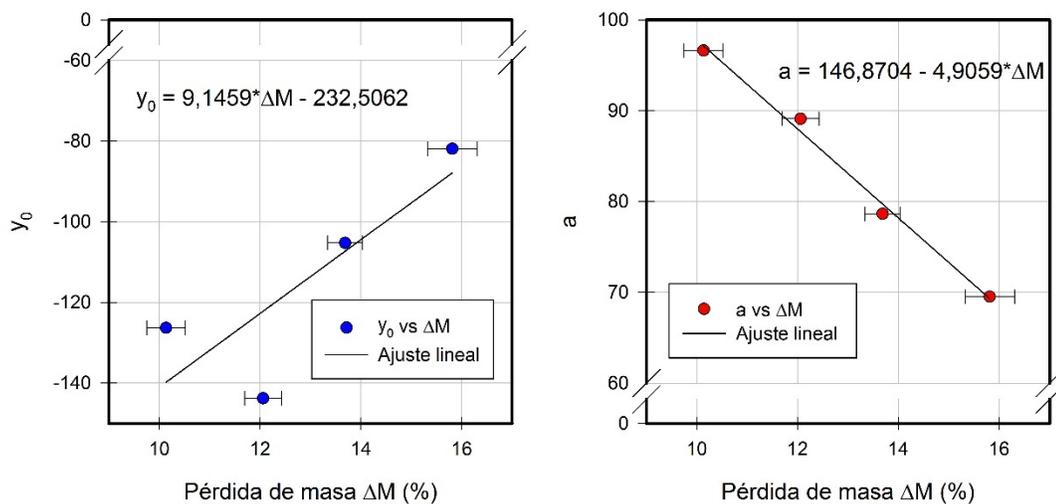


Figura 3.27. Modelos de ajuste para los parámetros del efecto de masa sobre el tiempo de tueste y la pérdida de masa.

De la Figura 3.27, se obtienen los respectivos ajustes

$$y_0 = 9,1459 \cdot \Delta M - 232,5062 \quad (64)$$

$$a = 146,8704 - 4,9059 \cdot \Delta M \quad (65)$$

Las ecuaciones (64) y (65) fueron obtenidas con un coeficiente de relación de 67,99% y 99,17%, respectivamente. Las desviaciones estándar de ambos modelos son 18,53% y 1,33%.

Al sustituir en la Ecuación (63), se obtiene una ecuación del tiempo de torrefacción como función de la masa inicial y el grado de tueste, representado como una pérdida de masa.

$$t(m_i, \Delta M) = \frac{m_i - 9,1459 \cdot \Delta M + 232,5062}{146,8704 - 4,9059 \cdot \Delta M} \quad (66)$$

En la Figura 3.28, se muestra la relación entre el tiempo de tostado determinado experimentalmente y el tiempo de tostado calculado, en el cual el modelo lineal cuenta con un coeficiente de ajuste (r^2) de 99,57%, una desviación estándar del modelo de 0,19%, lo cual valida la ecuación (66) como un buen modelo de predicción del tiempo de tostado a partir de la masa inicial y el cambio de masa durante la torrefacción asociado a un grado de tueste.

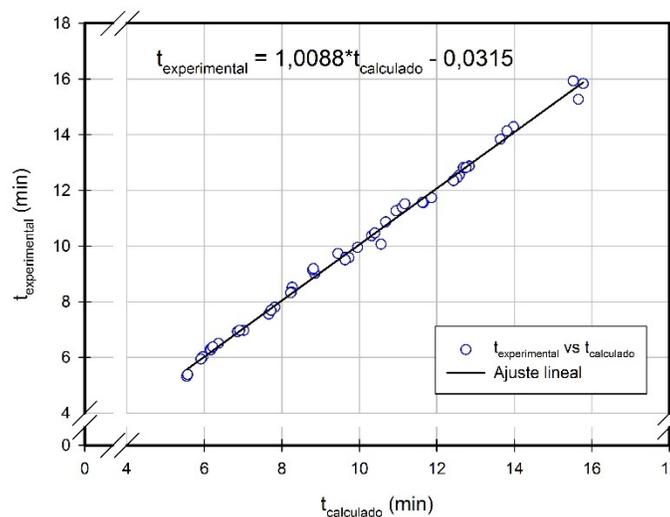


Figura 3.28. Comparación del modelo de predicción del tiempo de torrefacción (n=48).

3.4 Variación de las propiedades físicas del café en la torrefacción

3.4.1 Pérdida de masa en el tostado

Según Clarke & Macrae (1987), los grados de tueste generalmente son obtenidos subjetivamente por la experticia de un maestro tostador, el cual los asocia a un color, según la normativa de la SCAA. La apreciación más evidente de los cambios ocurridos en el tueste se manifiesta en la coloración externa, que va desde marrón claro hasta casi negro. Los grados de tueste se pueden relacionar con la pérdida de masa total. En la Figura 3.29, se muestra el efecto de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre la pérdida de masa. Dicha figura, se elabora con los efectos netos (*medias ajustadas*) por factor.

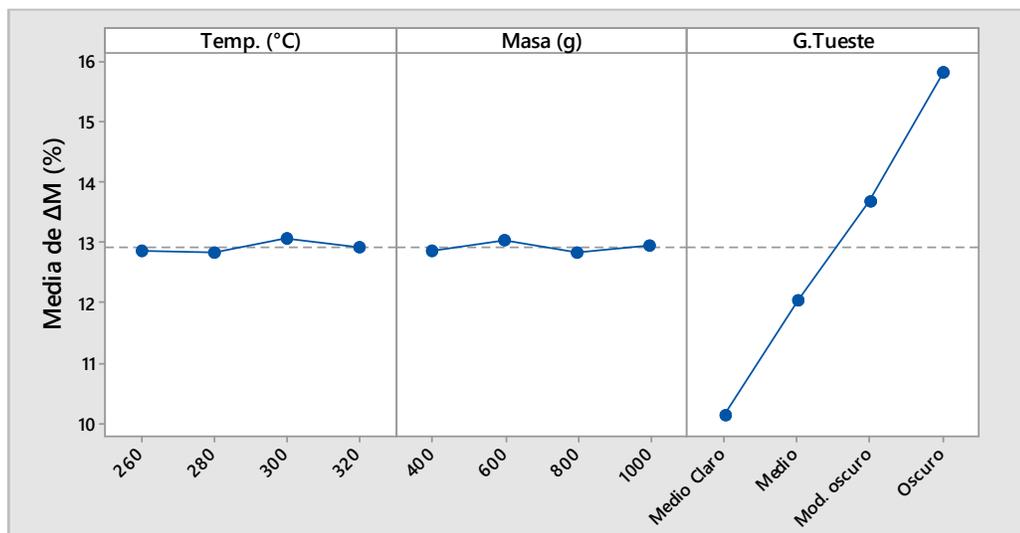


Figura 3.29. Efectos principales de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre el porcentaje de pérdida de masa.

El incremento de los niveles de los factores temperatura, masa y grado de tueste, tienen efecto sobre la pérdida de masa total, para un nivel de confianza de la prueba de 95%. El efecto de la temperatura ($p=0,002$) y masa ($p=0,006$) se considera constante en los niveles de factor analizados, sin embargo; el mayor efecto sobre la pérdida de masa total se

presentó por causa de los cambios en el grado de tueste ($p < 0,0001$), observado en la Figura 3.29.

En el Cuadro 3.15 se muestran los 4 grados de tueste asociados a los valores de pérdida de masa total. Las diferencias entre los valores medios oscilan entre 1,6 - 2,1 % en la pérdida de masa de los granos tostados. El análisis estadístico de la información muestra diferencias significativas dentro de grados de tueste iguales, sin embargo; la apreciación física (*color*) según la escala Agtron, no mostró diferencia entre tratamientos cuando la diferencia entre los valores de pérdida de masa fue menor a 1%.

Cuadro 3.13. Pérdidas de masa total de los granos de café por grado de tueste ($n=48$).

Grado de Tueste	Pérdida de masa ΔM (%)
Claro	10,13 \pm 0,39 ^A
Medio	12,06 \pm 0,36 ^B
Moderadamente Oscuro	13,68 \pm 0,35 ^C
Oscuro	15,81 \pm 0,49 ^D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El estudio realizado por Vargas (2011), caracterizó los grados de tueste de los granos de café con la pérdida de masa total, como sigue: Medio claro (15,85%), Medio (17,02%), Moderadamente oscuro (18,74%) y Oscuro (20,58%), con granos de café *C. arabica* y con contenido de humedad inicial de $0,1386 \text{ kg}_a \cdot \text{kg}_{ms}^{-1}$. Otros autores como Mendes (2012) y Schwartzberg (2002), aproximaron los grados de tueste a partir de la pérdida de masa total de los granos. Dichos autores trabajaron con una materia prima con una humedad de $0,1289 \text{ kg}_a \cdot \text{kg}_{ms}^{-1}$ y otras variedades (*C. canephora*), sin embargo, dicho parámetro caracterizó de manera óptima los grados de tueste.

Según Illy & Viani (1995), la distribución porcentual de la pérdida de masa total durante el tueste es de 90% correspondiente a agua, de la cual 72% es agua del contenido de humedad inicial y 18% agua generada por las reacciones de pirolisis. El restante 10% de la pérdida total es principalmente debido a la liberación de CO₂ y pequeñas cantidades de compuestos volátiles que se forma en el proceso. Los valores de pérdida de masa total del presente trabajo no se asemejan a los estudios consultados, lo que se atribuye al contenido de humedad más bajo en la materia prima utilizada, sin embargo, la variable pérdida de masa total resulta como un buen indicador del grado de tueste.

Según la información anterior se define como una condición de *Isonivel* (mismo grado de tueste) los valores de pérdida de masa que se encuentren dentro del rango de valores de $\pm 0,50$ %.

3.4.2 Cinética de pérdida de masa durante el tueste

A pesar de que la pérdida de masa asociada a un grado de tueste no depende de la temperatura del proceso ni la masa, la velocidad en la que ocurre dicho cambio puede llegar a ser dependiente de dichos factores. En la Figura 3.30, se muestran las cinéticas de pérdida de masa durante el proceso de torrefacción. La pérdida de masa para los grados de tueste comercial, son alcanzados de forma lineal, es decir; son proporcionales en el tiempo.

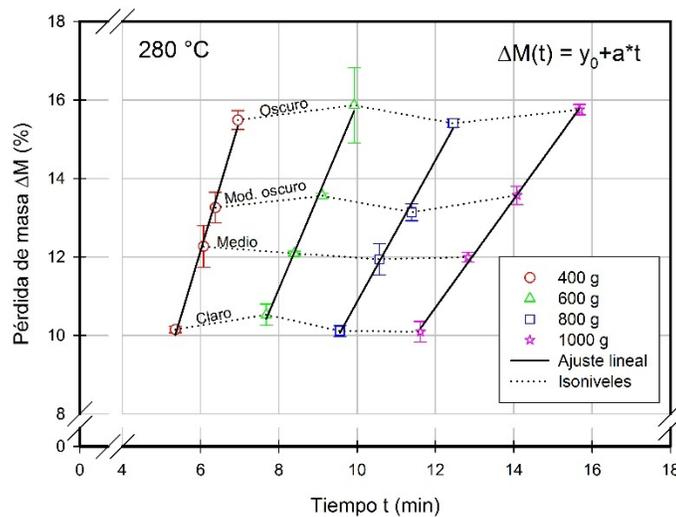


Figura 3.30. Cinética de pérdida de masa (ΔM), para las masas de grano crudo evaluadas.

La cinética de pérdida de masa fue ajustada a modelos líneas con un coeficiente de relación (r^2) de 99%. Las desviaciones estándar de los modelos de ajuste fueron menores a 0,21% y los parámetros de los modelos y_0 y a fueron obtenidos con valores-p menores a 0,0213.

Cuadro 3.14. Análisis estadístico del modelo lineal de la cinética de pérdida de masa.

	400 g	600 g	800 g	1000 g
Coefficientes de regresión				
y_0	-7,8308	-7,6932	-7,1493	-5,8636
a	3,3315	2,3599	1,8013	1,3811
Valor-p				
y_0	0,0213	0,0209	0,0195	0,0079
a	0,0031	0,0029	0,0026	0,0008

Parámetros estadísticos				
R	0,9969	0,9971	0,9974	0,9992
r ²	0,9937	0,9941	0,9948	0,9984
Adj, r ²	0,9906	0,9912	0,9922	0,9977
SE	0,2149	0,2130	0,1954	0,1159
Prueba-t				
y ₀	-6,7397	-6,8113	-7,0528	-11,1735
a	17,8256	18,4136	19,6237	35,8864

La cinética de pérdida de masa representada por el valor de la constante a , disminuye conforme se incrementa la masa inicial colocada en el tostador. Dicho comportamiento es similar al determinado por Vargas et al. (2016), Mendes (2012) y Bustos (2015), en el que obtuvieron incrementos en las cinéticas de pérdida de masa lineales al aumentar la temperatura del tostador y mantener la masa constante.

3.4.3 Expansión aparente

La expansión es un parámetro físico que cuantifica el cambio de volumen de la muestra de café, después del proceso de torrefacción. En la Figura 3.32, se muestran los efectos de la temperatura, masa y grado de tueste sobre dicho parámetro.

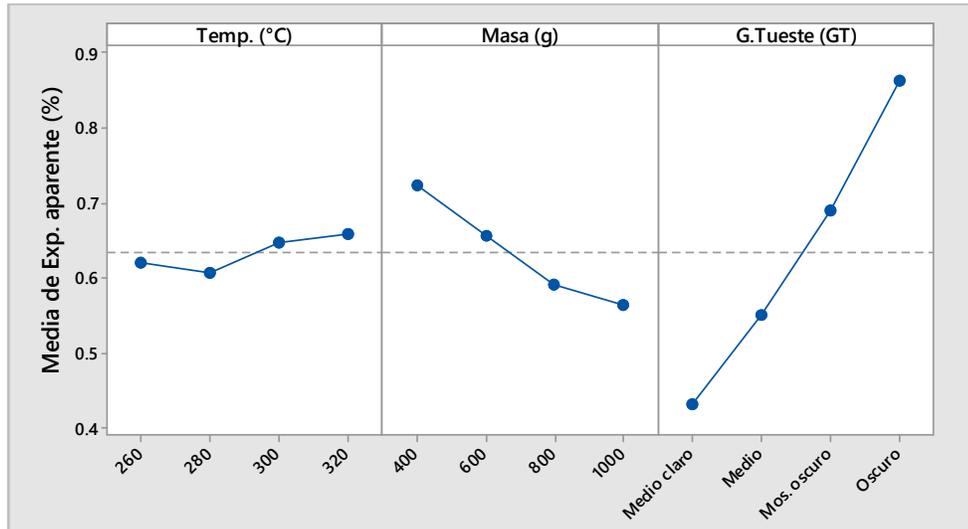


Figura 3.31. Efectos principales de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre expansión aparente de los granos tostados.

Del análisis de estadística se obtiene que los cambios en los distintos niveles de los factores, temperatura, masa y grado de tueste, generan deferencias significativas en los valores de expansión aparente ($p < 0,0001$), para una confianza de la prueba de 95%.

El efecto de la temperatura sobre la expansión no permite concluir de qué manera afectan los cambios de dicho factor sobre la expansión aparente, sin embargo, dicho efecto es más apreciable al variar la masa o grado de tueste. Las temperaturas superiores (300 y 320 °C) muestran un efecto similar con valores superiores de expansión, respecto a las temperaturas inferiores (260 y 280 °C), los cuales se manifiestan como efectos estadísticamente similares ($p > 0,05$).

Los incrementos en la masa (200 g) provocan disminuciones en expansión (6%), los cuales pueden llegar a ser proporcionales a su incremento, excepto para la masa de 1000 g. La masa menor (400 g) presentó los valores mayores de expansión y la masa mayor (1000 g) los menores valores en dicha variable.

Los grados de tueste muestran un efecto positivo sobre la expansión aparente, la cual es proporcional al incremento de tueste (14%). Es decir, al incrementar el grado de

tueste, se incrementó su expansión, obteniéndose el valor máximo de expansión de 86% para el grado de tueste oscuro.

Mendes (2012) obtuvo que los valores de expansión volumétrica se incrementan conforme se alcanza un mayor grado de tueste y tienen poca influencia por la temperatura de torrefacción; además reportó valores de expansión máxima de 71% cuando obtuvo grados de tueste oscuro y con granos de café *C. canephora*.

3.4.4 Cinética de la expansión aparente durante el tostado por efecto de masas.

La expansión aparente de los granos de café durante la torrefacción es lineal con respecto al tiempo y manifiesta comportamientos asociados a los procesos de secado y torrefacción (Vargas, 2014; Bustos, 2015; Mendes, 2012).

En la Figura 3.34, se muestra el modelo a ajuste lineal para la expansión aparente, descrito mediante las cinéticas de reacciones de orden cero ($n=0$). Dicho modelo fue utilizado por Vargas (2014) para la etapa de torrefacción, asociándolo a un efecto de la temperatura de la pared del tostador mediante el modelo de Arrhenius, determinó que la energía de activación (E_a) para iniciar el proceso de expansión del grano de café durante la torrefacción es $25.936,58 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$. Es posible utilizar los valores encontrados por dicho autor ya que las condiciones y tipo de tostador, tipo de grano (*C. arabica*) y el modelo de calentamiento ajustados al presente trabajo, cuentan con todas las similitudes.

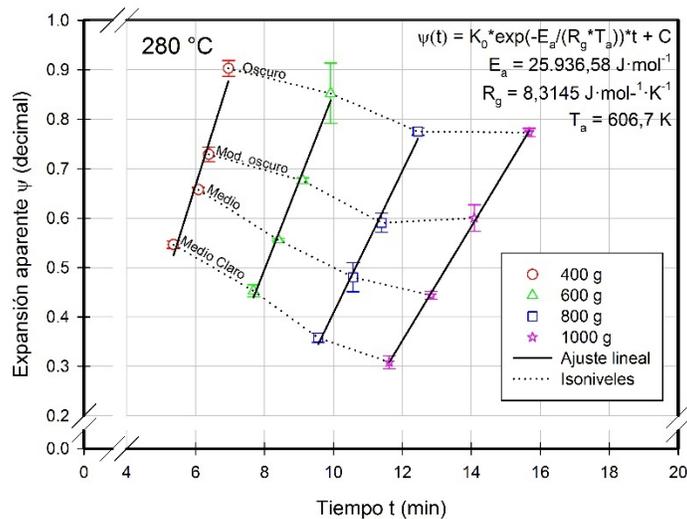


Figura 3.32. Modelo lineal de ajuste para la expansión aparente del café tostado.

El modelo lineal de expansión aparente se ajustó con un coeficiente de relación (r^2) mayor a 96,55%. La desviación estándar (SE) de los modelos fue 0,03% y los parámetros del modelo “ K_0 ” y “ C ” fueron obtenidos con valores-p menores a 0,0696. En el Cuadro 3.18 y 3.19 se muestran los estadísticos respectivos para los modelos de ajuste.

Cuadro 3.15. Parámetros estadísticos del modelo lineal de ajuste de la cinética de expansión aparente.

	400 g	600 g	800 g	1000 g
Parámetros de regresión				
K_0	37,8198	30,4240	24,5356	19,7116
C	-0,6606	-0,9274	-1,0269	-1,0316
Valor-p				
K_0	0,0174	0,0046	0,0043	0,0004
C	0,0696	0,0130	0,0102	0,0009

Parámetros estadísticos				
R	0,9826	0,9954	0,9957	0,9996
r ²	0,9655	0,9908	0,9914	0,9992
Adj. r ²	0,9482	0,9862	0,9870	0,9988
SE	0,0340	0,0202	0,0202	0,0068
Prueba-t				
K ₀	7,4761	14,6770	15,1454	50,8996
C	-3,5905	-8,6771	-9,8113	-33,3890

En la Figura 3.35, se muestra la relación existente entre el valor pre exponencial de la ecuación de expansión aparente. Fue necesario aplicar la función logarítmica para encontrar un ajuste estadísticamente mayor. El Cuadro 3.19 muestra los valores con los cuales se construye la relación entre el factor pre exponencial.

Cuadro 3.16. Valores de ajuste de modelo de cinética de expansión aparente (K₀) por masa.

Masa M₀ (g)	Valor K₀ (min⁻¹)	Valor Ln(K₀)
400	37,8198	3,6328
600	30,4240	3,4152
800	24,5356	3,2001
1000	19,7116	2,9812

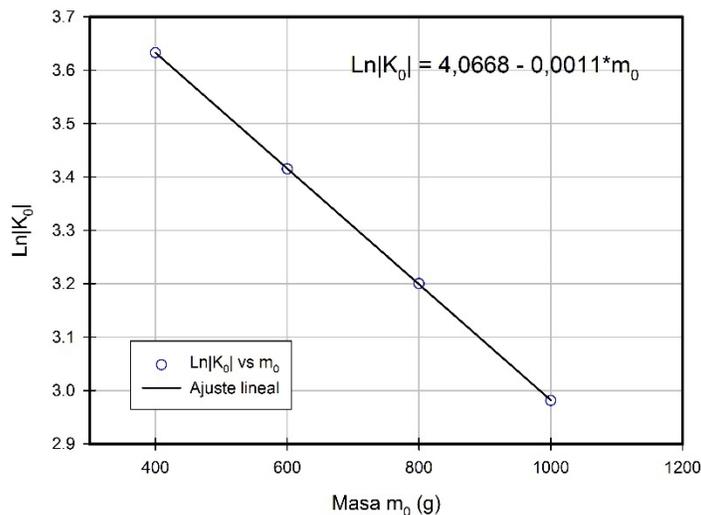


Figura 3.33. Ajuste del valor pre exponencial de la ecuación de expansión aparente por masa inicial.

El modelo lineal de ajuste para el valor de K_0 y m_0 presentó un coeficiente de relación de 99%, la desviación estándar del modelo fue de 0,0011% y los parámetros del modelo se obtuvieron con un valor-p menor a 0,0001.

Al hacer el respectivo despeje, se obtiene la ecuación (67) que relaciona el K_0 con la masa inicial m_0 , en el modelo de expansión aparente.

$$K_0 = e^{(4,0668 - 0,0011 \cdot m_0)} \quad (67)$$

El modelo de expansión aparente del café tostado como función del tiempo, masa inicial y temperatura de la pared, se describe con la ecuación (68).

$$\psi(t, m_0, T_a) = e^{(4,0668 - 0,0011 \cdot m_0)} \cdot e^{\left(\frac{-25.936,58}{8,3145 \cdot T_a}\right)} \cdot t + C \quad (68)$$

3.4.5 Densidad aparente

En la Figura 3.36, se muestran los efectos principales de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre la densidad aparente de los granos de café tostado.

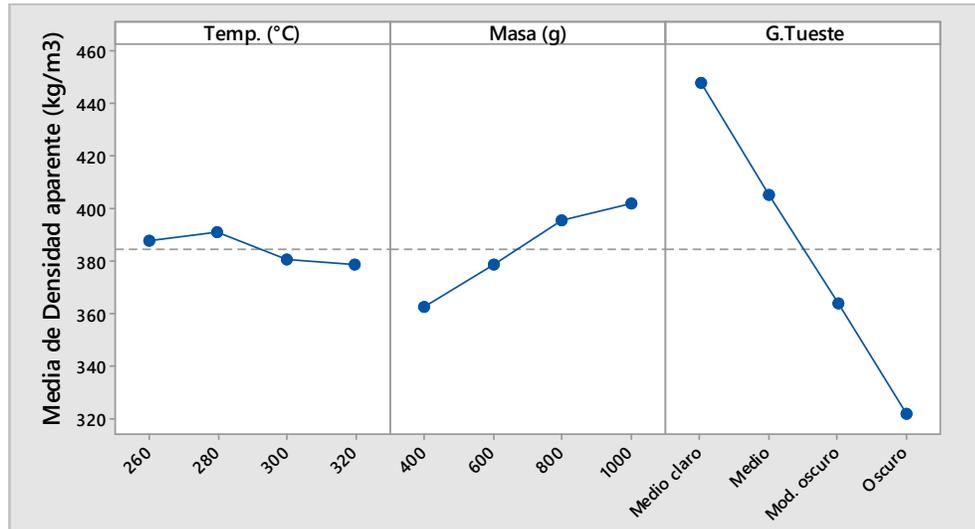


Figura 3.34. Efectos principales de los factores sobre la densidad aparente ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) de los granos de café tostado.

La temperatura, masa inicial y grado de tueste muestran un efecto sobre la densidad aparente final del café tostado ($p < 0,0001$), para una confianza de la prueba de 95%.

Los incrementos en la temperatura no muestran un efecto considerable sobre la densidad aparente del café tostado. Al agrupar los efectos de las temperaturas de 260 – 280 °C y 300 – 320 °C, respectivamente; se obtiene una disminución promedio de 20 kg/m^3 , entre ambos grupos ($p > 0,05$).

Los incrementos de masa afectan de manera positiva la densidad aparente de los granos, con valores promedio de $+13,54 \text{ kg/m}^3$, es decir; permiten obtener valores mayores de densidad aparente, según el gráfico de efectos principales en la Figura 3.34.

El incremento en los grados de tueste en el café afecta de manera negativa la densidad aparente, es decir, al incrementar un grado de tueste la densidad aparente disminuye en $-41,85 \text{ kg/m}^3$.

En la Figura 3.35, se muestran los efectos principales de las interacciones de los factores de la investigación.

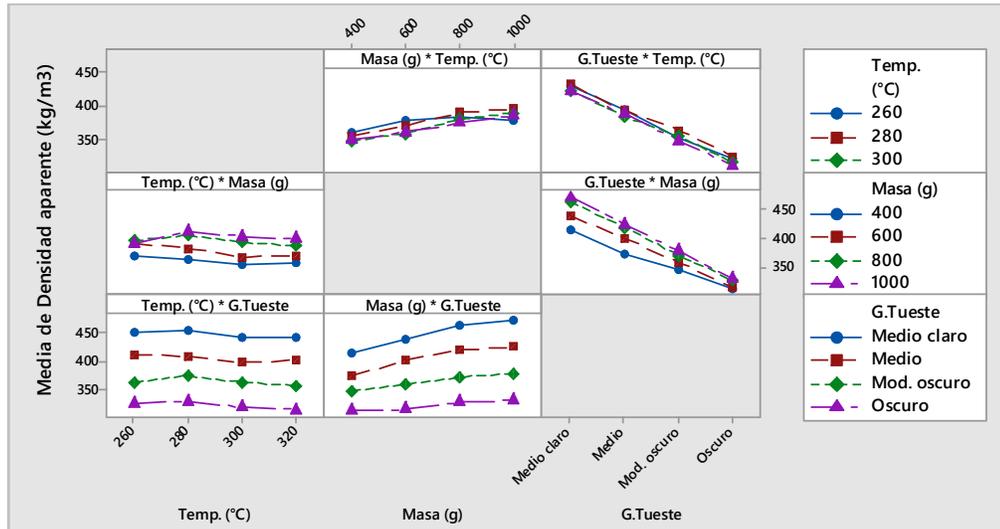


Figura 3.35. Efectos de las interacciones de los factores sobre la densidad aparente.

La interacción entre *Grado tueste* – *Masa* muestra una disminución de los valores de densidad aparente al aumentar el grado de tueste hasta converger en valores similares en el grado de tueste oscuro, lo que corresponde a una uniformidad de los granos para los tuestes oscuros.

El menor valor de densidad aparente ($304,23 \pm 3,08 \text{ kg/m}^3$) para el café tostado se obtuvo con la temperatura de $320 \text{ }^\circ\text{C}$, masa de 600 g y grado de tueste Oscuro; y el mayor valor de densidad ($489,23 \pm 6,13 \text{ kg/m}^3$) se obtuvo para la temperatura de $280 \text{ }^\circ\text{C}$, masa de 1000 g y grado de tueste Medio Claro, lo anterior ubica los valores de densidad con una diferencia de 185 kg/m^3 , por encima del valor reportado por Vargas (2011) quien obtuvo una franja de variación de 100 kg/m^3 , para granos de café *C. arabica* con tueste medio claro (382 kg/m^3) y oscuro (289 kg/m^3).

Los valores de densidad encontrados están de acuerdo a lo reportado por Illy & Viani (2005), en los que la densidad aparente presenta valores de 300 a 450 kg/m^3 en café tostado; en contraste con el café crudo 550 a 700 kg/m^3 .

En el Cuadro 3.20, se muestra el efecto de la masa inicial sobre la densidad final de café tostado por grado de tueste, para la temperatura de $280 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cuadro 3.17. Densidad aparente del café tostado por efecto de masa para la temperatura de 280 °C ($n=3$).

Masa m_i (g)	Densidad aparente ρ_f (kg/m ³)			
	Claro	Medio	Mod. Oscuro	Oscuro
400	413,63 ± 2,13 D	376,81 ± 2,53 C	357,13 ± 4,63 B	316,20 ± 3,52 B
600	438,50 ± 5,01 C	402,16 ± 0,82 B	367,21 ± 1,21 B	323,69 ± 14,44 AB
800	471,35 ± 3,61 B	423,68 ± 10,18 A	388,81 ± 5,69 A	339,27 ± 1,73 A
1000	489,23 ± 6,13 A	434,02 ± 2,87 A	384,57 ± 7,46 A	338,24 ± 2,06 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Los efectos de la masa por grado de tueste tienden a disminuir conforme se incrementa el grado de tueste, es decir, las diferencias de los tratamientos entre las masas por grado de tueste pierden significancia entre más oscuro sea el tueste según lo observado en el Cuadro 3.21, lo que está de acuerdo al análisis mostrado en la Figura 3.37, sobre la interacción entre Grado de tueste y Masa.

El método del densímetro, utilizado para determinar la densidad aparente de los granos tostados reportó valores de incertidumbre de las mediciones entre 0,79 – 16,00 kg/m³, lo que está de acuerdo con Vargas (2011), que obtuvo valores máximos de variación de 11,1 kg/m³; al utilizar un método similar (*One-pint dry U.S.* Vol. 0,55061 L).

La densidad aparente de los granos de café tostado disminuye al incrementarse su temperatura durante el proceso de torrefacción, dicho resultado está de acuerdo con los trabajos realizados por Mendes (2012) con granos de café *C. canephora*.

3.4.6 Cambios en la densidad aparente por efecto del tostado

Según Mendes (2012), la densidad aparente de los granos de café presenta un cambio como consecuencia del proceso de torrefacción; esto debido a la pérdida de agua en la etapa de secado, a la pérdida de materia seca y la expansión de los granos de café durante

la etapa de torrefacción. Los cambios en la densidad aparente permiten agrupar por grado de tueste, tal como se muestra en el Cuadro 3.21.

Cuadro 3.18. Variación de la densidad aparente por Grado de tueste ($n=48$).

Grado de Tueste	Cambio en densidad aparente $\Delta\rho$ (%)	Densidad aparente promedio kg/m^3
Medio Claro	37,07 \pm 3,47	448,00 \pm 24,71
Medio	43,08 \pm 3,21	405,21 \pm 22,84
Mod. Oscuro	48,81 \pm 2,24	364,41 \pm 15,93
Oscuro	54,75 \pm 1,67	322,11 \pm 11,89

Los valores de densidad aparente de los granos tostados varían más de un 50%, al considerar los valores para los grados de tueste oscuro en relación al valor del grano crudo $711,93 \pm 1,80 \text{ kg/m}^3$, lo que corresponde al resultado obtenido y reportado por Mendes (2012), Vargas (2011) e Illy & Viani (1995).

En su estudio Mendes (2012) y Vargas (2011) determinaron que la temperatura tiene poca influencia en los valores finales de densidad aparente por grado de tueste para cafés de las variedades *C. Canephora* y *C. arabica*, respectivamente; lo cual se reafirma mediante esta investigación.

3.4.7 Densidad aparente en función del tiempo de torrefacción

El estudio de la densidad aparente de los granos de café en función del tiempo, permite generar modelos de predicción de las calidades o grados de tueste deseados, dicho comportamiento se describe mediante las cinéticas de densidad, que muestran la rapidez que disminuye la densidad durante el proceso de torrefacción. En la Figura 3.38, se muestra que la variación de la densidad aparente en el tiempo es linealmente decreciente, ubicados en el rango de valores de tueste comercial.

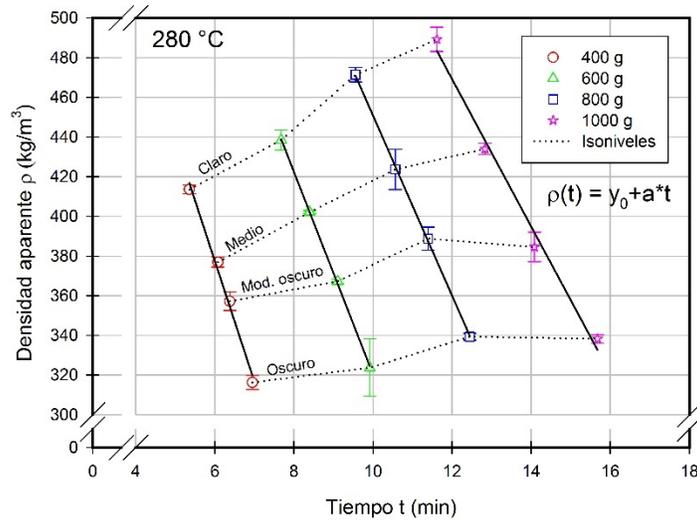


Figura 3.36. Efecto de la masa sobre la variación de la densidad aparente, para cada grado de tueste.

En tostadores convencionales los modelos lineales de pérdida de masa fueron estudiados por Vargas (2011), estableciendo relaciones de variación de la densidad aparente con la temperatura del tostador, el autor obtuvo que la tasa de pérdida de densidad aparente se aumenta con el incremento de la temperatura.

La variación de la densidad aparente por efecto del incremento en masa fue asociado a una menor expansión volumétrica de los granos de café tostado, ya que la pérdida de masa fue similar en cada grado de tueste obtenido, mediante los Isoniveles, que indican una condición similar de grado de tueste.

Vargas (2011) asocia la densidad aparente como indicador de la calidad final del grano tostado, con la cual se puede evaluar de manera indirecta el grado de tueste del café; dicho supuesto se ve alterado cuando se varía la masa de café colocada dentro del tostador, que para efectos del presente trabajo obtuvo valores de densidad similares, pero con diferente grado de tueste, condición observada principalmente para los grados de tueste medio claro hasta moderadamente oscuro, ver Figura 3.36.

En el Cuadro 3.22, se muestran los parámetros estadísticos correspondientes a los modelos lineales de variación de la densidad aparente del café tostado, los cuales obtuvieron coeficientes de correlación (r^2) mayores a 98%, una desviación estándar de los modelos menor a 8,23% y los parámetros de ajuste se obtuvieron con valores-p menores a 0,0054.

Cuadro 3.19. Parámetros estadísticos de los modelos de densidad aparente en función del tiempo de torrefacción.

	280 °C			
	400 g	600 g	800 g	1000 g
Coefficientes de ajuste				
y_0	742,7872	831,2512	904,4477	914,9595
a	-60,8769	-51,1037	-45,3681	-37,1467
Valor-p				
y_0	0,0012	<0,0001	<0,0001	0,0017
a	0,0046	0,0002	0,0002	0,0054
Parámetros estadísticos				
R	0,9954	0,9998	0,9998	0,9946
r^2	0,9909	0,9997	0,9996	0,9893
Adj, r^2	0,9864	0,9995	0,9994	0,9839
SE	4,7378	1,1014	1,3955	8,2393
Prueba-t				
y_0	28,9924	142,3103	124,9385	24,5168
a	-14,7722	-77,1034	-69,2076	-13,5729

3.4.8 Materia seca

La materia seca es estudiada analizando el cambio que sucede tras el proceso de torrefacción, mediante la masa total y el contenido de humedad de los granos tostados.

Según Illy & Viani (2005), el cambio en la materia seca ocurre tras consumirse debido a las reacciones de *Meillard*, en las que se liberan de compuestos volátiles y CO₂, y también durante los procesos de pirolisis. En la Figura 3.39 se muestra el cambio en la materia seca reportado al final del tueste, como una condición final del producto, que no depende de la temperatura, ni de la masa involucrados en el proceso de torrefacción, únicamente depende del grado de torrefacción al que se lleve el producto.

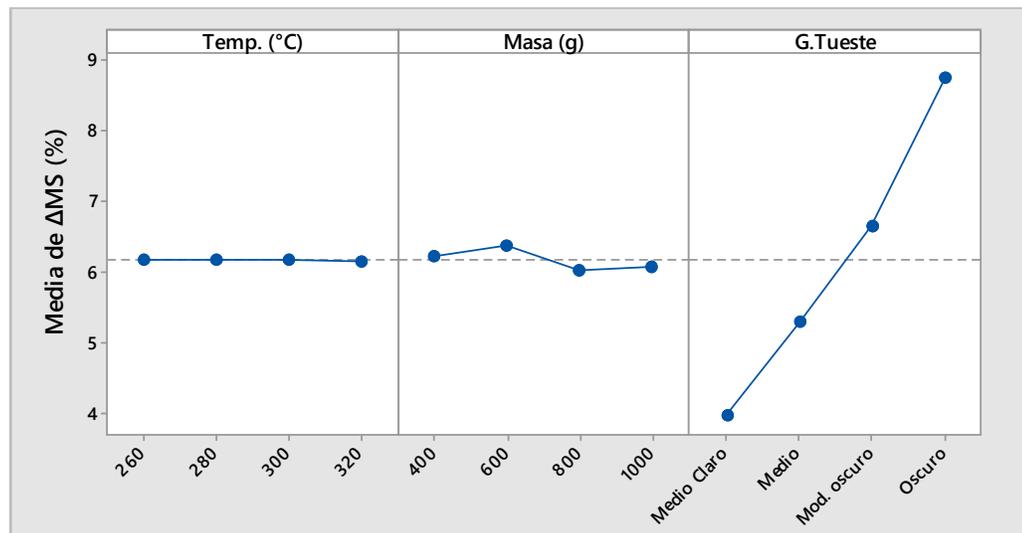


Figura 3.37. Efectos principales de los factores sobre el cambio de materia seca.

Lo anterior, para una confiabilidad del modelo estadístico de 95%, en el que no existe un efecto significativo por causa de los aumentos en los niveles de los factores de temperatura y masa, más sí es significativo por causa del factor grado de tueste.

Al analizar la interacción de los factores temperatura y masa sobre el cambio de la materia seca, según la Figura 3.38, es concluyente que no existe una interacción de los factores sobre la variable estudiada y que la significancia en el modelo únicamente es aportada por la relación existente con el grado de tueste del café tostado.

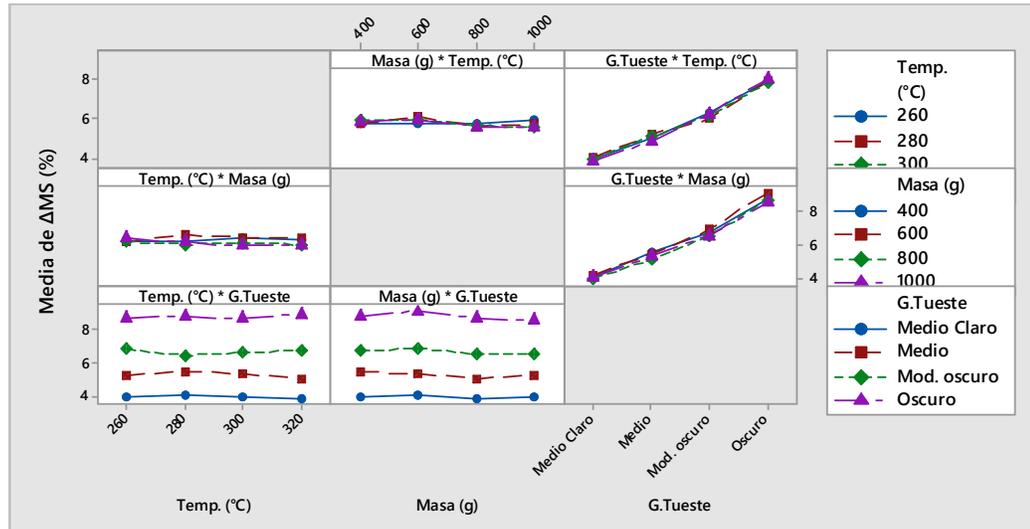


Figura 3.38. Efectos de las interacciones de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre el cambio de materia seca.

Los cambios en la materia seca permiten caracterizar los grados de tueste, según la clasificación presentada por Clarke & Macrae (1987) e indicada en el Cuadro 1.5. En el Cuadro 3.24 se muestran los valores de cambio en la materia seca para los grados de tueste definidos en el presente trabajo y clasificados según la indicación anterior.

Cuadro 3.20. Variación en la materia seca por grado de tueste (n=48).

Grado de Tueste	Cambio de materia seca ΔMS (%)	² Escala ΔMS
Medio Claro	3,99 \pm 0,24 ^A	Claro
Medio	5,30 \pm 0,32 ^B	Medio
Moderadamente Oscuro	6,66 \pm 0,36 ^C	Medio
Oscuro	8,76 \pm 0,51 ^D	Oscuro

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

² Escala ΔMS : Basado en la clasificación de pérdida de materia seca según Clarke & Macrae (1987).

Vargas (2011) obtuvo que cambios en la materia seca permiten diferenciar grados de tueste independiente de la temperatura del tostador, con granos de café arabica y contenido de humedad inicial $0,1386 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, para cambios en la materia seca de 5,4; 6,5; 8,4 y 10,7%; y grados de tueste medio claro, medio, moderadamente oscuro y oscuro, respectivamente; lo cual se comprueba mediante el presente trabajo, validándose que el cambio de materia seca caracteriza los grados de tueste del café.

3.4.9 Cinética del cambio en la materia seca durante el tostado por efecto de masas.

En la Figura 3.39, se muestran las cinéticas de materia seca para las masas evaluadas y el ajuste respectivo para la ecuación de la Ley de las reacciones químicas, con un orden de las reacciones de $n=1$. El modelo de cinética de reacciones de orden uno ($n=1$) fue utilizado por Vargas (2016), dicho autor determinó que la energía de activación (E_a) para iniciar el proceso de variación de la materia seca es de $36\,793,3 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$, cuando utilizó granos de café crudos de la variedad *C. arabica*, con tamaño uniforme, limpio y sin defectos, además; utilizó un tostador convencional con las mismas características al usado en el presente trabajo, utilizó gas como fuente de energía y con capacidad de trabajo con masas pequeñas.

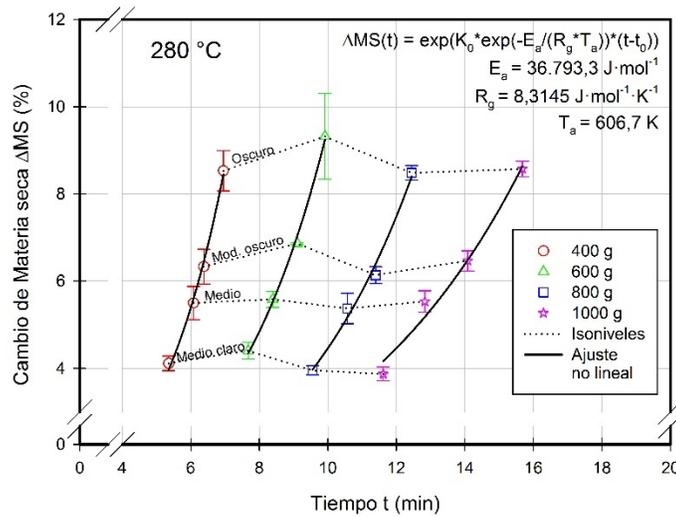


Figura 3.39. Modelos de cinética de la materia seca.

El incremento en los grados de tueste se traduce en mayor cambio en la materia seca de los granos tostados y un mayor tiempo de permanencia en el tostador. El tiempo también es afectado por la masa de granos crudos colocada dentro del tostador, a mayor masa se requiere mayor tiempo para alcanzar una condición similar (*Isonivel*), es decir; obtener un mismo grado de tueste.

El coeficiente de relación (r^2) de los respectivos ajustes fue mayor a 98%, la desviación estándar de los modelos ajustados (SE) fue menor a 0,33% y el valor-p para los parámetros K_0 y t_0 del ajuste fue menor a 0,0781. En el Cuadro 3.24 se muestran los valores para cada una de las masas evaluadas.

Cuadro 3.21. Parámetros estadísticos de la regresión de la cinética de materia seca.

	400 g	600 g	800 g	1000 g
Coefficientes de regresión				
K ₀	695,6479	495,8007	380,1136	263,8223
t ₀	2,4395	3,3204	4,2167	3,6664
Valor-p				
K ₀	0,0026	0,0016	0,0060	0,0101
t ₀	0,0071	0,0050	0,0180	0,0781
Parámetros estadísticos				
R	0,9977	0,9985	0,9945	0,9907
r ²	0,9954	0,9971	0,9890	0,9815
Adj. r ²	0,9930	0,9956	0,9836	0,9722
SE	0,1544	0,1395	0,2428	0,3273
Prueba-t				
K ₀	19,6764	25,1177	12,8994	9,8916
t ₀	11,8059	14,0258	7,3560	3,3656

Para cada uno de los tiempos t_0 , los cuales corresponden al inicio de las reacciones de se aproximó la temperatura a la cual se encuentra la masa de granos, según se muestra en el Cuadro 3.25; los tiempos de inicio de las reacciones se incrementan al aumentar la masa de granos crudos, exceptuando la masa de 1000 g. La temperatura de los granos fue aproximada mediante el uso de las ecuaciones de ajuste del Apartado 3.2 de la presente investigación, correspondiente al modelo físico de calentamiento de los granos de café (Pabis).

Cuadro 3.22. Tiempo de inicio de las reacciones de torrefacción asociado a la temperatura de la masa de granos y el coeficiente de ajuste K_0 .

Masa M_0 (g)	Tiempo t_0 (min)	Temperatura T_g (°C)	Valor K_0 (min⁻¹)	Valor $\ln(K_0)$
400	2,4395	180,3	695,6479	6,5448
600	3,3204	173,2	495,8007	6,2062
800	4,2167	166,9	380,1136	5,9405
1000	3,6664	146,5	263,8223	5,5753

Vargas (2016) determinó que el inicio de las reacciones para una masa de 350 g con evaluaciones por temperatura (290, 310, 345 y 355 °C) es aproximadamente 5 minutos después de colocada la masa y que la temperatura de los granos es de 180 °C, la cual está de acuerdo a los resultados obtenidos para la masa de 400 g en la presenta investigación.

Según Schwartzberg (2002), las reacciones exotérmicas que determinan los aromas, color y sabor, suceden para temperaturas de los granos entre 150 a 180 °C, momento en el que se inicia el consumo de la materia seca, lo que está de acuerdo con los resultados obtenidos a partir del modelo de cinética de materia seca; ajustado para las masas de 400 hasta 1000 g.

Es posible ajustar el modelo de materia seca a los efectos de las masas utilizadas, por lo que se toma el valor de K_0 . En la Figura 3.40 y es ajustado a un modelo de masas, según se muestran los valores en el Cuadro 3.25.

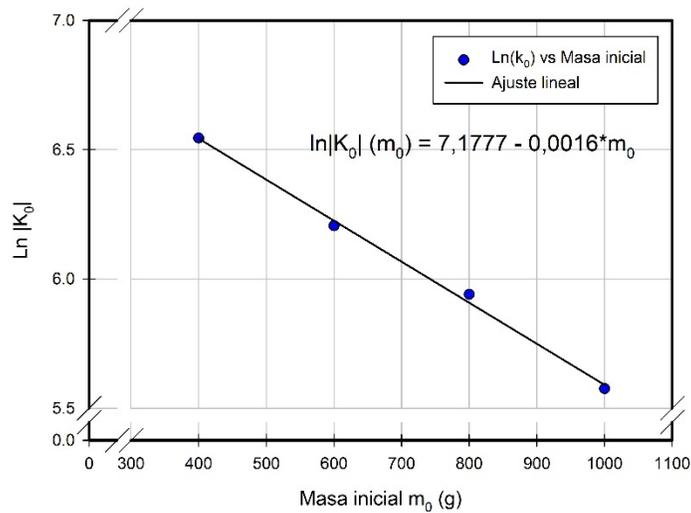


Figura 3.40. Ajuste del valor pre exponencial de la ecuación de materia seca por masa inicial.

Tal como se muestra en la Figura 3.40, se ajustó un modelo lineal para el logaritmo natural de K_0 como función de la masa, obtuvo un coeficiente de relación (r^2) de 99,67%, la desviación estándar del modelo (SE) fue 0,03% y para los parámetros del modelo y_0 y a el *valor-p* fue menor a 0,0016.

Al despejar de la ecuación de ajuste se obtiene la ecuación (69).

$$K_0 = e^{(7,1777-0,0016 \cdot m_0)} \quad (69)$$

El modelo final de materia seca como función de la masa inicial y el tiempo.

$$\left(1 - \frac{MS}{MS_0}\right) \cdot 100\% = e^{\left[e^{(7,1777-0,0016 \cdot m_0)} \cdot e^{\left(\frac{-36.793,3}{8,3145 \cdot T_a}\right) \cdot (t-t_0)}\right]} \quad (70)$$

3.4.10 Humedad final

En la Figura 3.41, se muestran los efectos principales de los factores temperatura, masa y grado de tueste sobre la cantidad de agua contenida en los granos de café tostado, la presencia de dicha humedad sucede a razón del agua contenida al inicio y el agua generada por las reacciones químicas de la torrefacción (Illy & Viani, 2005).

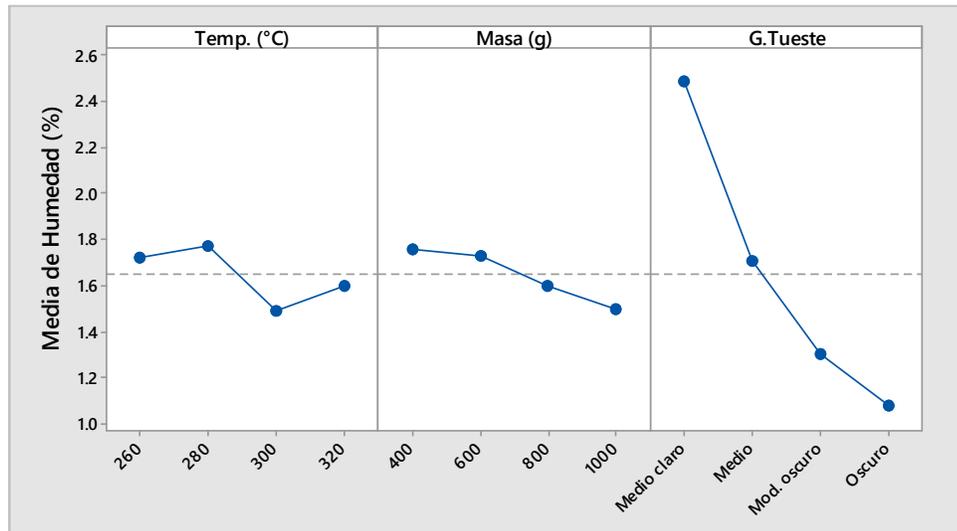


Figura 3.41. Análisis de la media de humedad de los granos de café tostado.

Del análisis estadístico se concluye que los incrementos en los niveles de los factores de temperatura, masa y grado de tueste, generan diferencias significativas sobre los valores de humedad final, lo anterior para un estadístico de la prueba de $p < 0,0001$, y una confianza de 95%.

Los incrementos en los niveles de temperatura muestran una relación aleatoria sobre la humedad final del café tostado, los valores de humedad final se pueden agrupar en las temperaturas de 260 y 280 °C, como efectos estadísticamente similares ($p > 0,05$), para los que se encuentran los valores mayores de humedad final; mientras que las temperaturas de 300 y 320 °C, sí presentan significancia en la prueba ($p < 0,05$) y agrupan los valores menores de humedad final. No es posible determinar el efecto de los incrementos de temperatura de calentamiento sobre los valores de humedad final del café tostado.

Los incrementos en los niveles de masa, disminuyen la humedad final del café tostado en -0,1 %. Las masas de 400 y 600 g no muestran un efecto significativo sobre los valores finales de humedad ($p > 0,05$), mientras que las masas 800 y 1000 g, sí muestran un efecto significativo. El efecto de la masa sobre la humedad final de los granos de café

tostado no se considera con magnitud para diferenciar tratamientos a nivel práctico o industrial, dado el rango en el que se ubican los valores de humedad final del café tostado.

Los incrementos en los niveles de grado de tueste (+grado tueste), disminuyen significativamente la humedad final del café tostado. El efecto de dichos incrementos es mayor al causado por los factores temperatura y masa. Los valores máximos de humedad se asocian al grado de tueste medio claro y los valores mínimos al grado de tueste oscuro.

En el Cuadro 3.26, se muestran las medias del contenido de humedad final, asociadas a los valores medios ajustados de tiempo y temperatura final de los granos al finalizar el tueste. Al incrementarse el tiempo de estadía de los granos en el tostador disminuye el contenido de humedad final y con ello se incrementa la temperatura final de los granos.

Cuadro 3.23. Humedad final promedio del café por grado de tueste ($n=48$).

Grado de tueste	Tiempo t (min)	Humedad final (base húmeda) CHf (%)	Temperatura de granos T _g (°C)
Medio Claro	8,16 ± 2,46	2,49 ± 0,28 ^A	238,40 ± 12,42
Medio	9,07 ± 2,59	1,71 ± 0,25 ^B	237,56 ± 12,83
Mod. Oscuro	9,94 ± 2,82	1,31 ± 0,19 ^C	239,99 ± 13,59
Oscuro	10,80 ± 3,19	1,08 ± 0,25 ^D	241,82 ± 14,36

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Figura 3.44, se muestran los efectos de las interacciones de los diferentes factores. Es apreciable que existe una interacción de los factores Masa y Temperatura sobre los valores de humedad final, sin embargo, su interacción no genera diferencias considerables en los valores de humedad final. No existe interacción entre la masa y

temperatura con el grado de tueste que determine diferencias considerables en la humedad final.

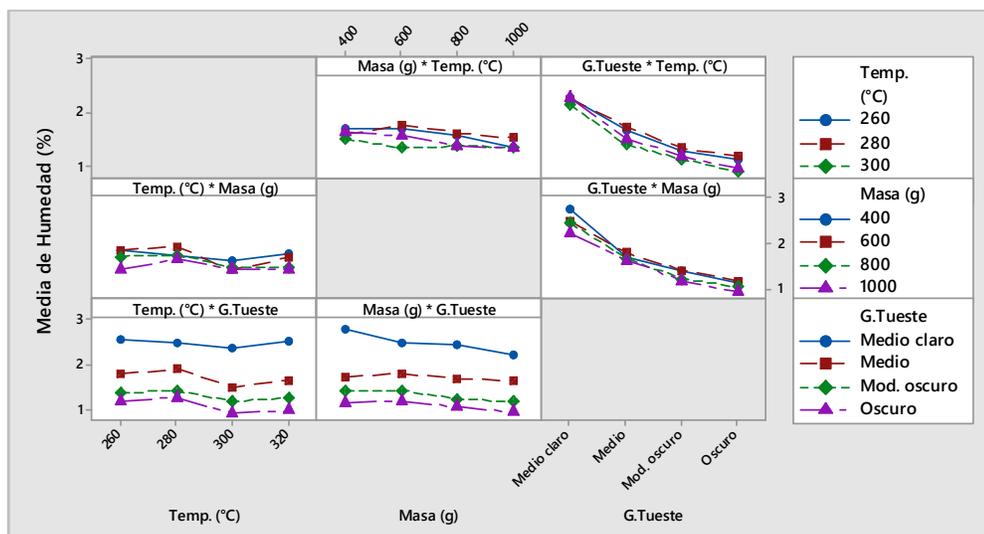


Figura 3.42. Efectos de la interacción de los factores sobre la humedad final del café tostado.

El valor mínimo de humedad final del café tostado se presentó para la temperatura de 300 °C, masa de 800 g y grado de tueste oscuro ($CH_f = 0,79\%$), el valor máximo se obtuvo para la temperatura de 260 °C, masa de 400 g y grado de tueste medio claro ($CH_f = 2,85\%$). Los tiempos de permanencia dentro del tostador fueron 11,91 y 5,52 min, respectivamente.

La difusión es un mecanismo lento y requiere tiempo para desplazar la humedad del interior hacia el exterior. Entre más tiempo dure el proceso mayor cantidad de agua puede eliminarse; pero si es muy rápido no habrá tiempo para su transporte.

Resultados similares fueron obtenidos por Vargas (2011), Mendes (2012) e Illy & Viani (1995), en los cuales el porcentaje de humedad al final de los granos de café tostados se encuentra cercano al 1%, por lo que para efectos de la investigación el tono obtenido para medio claro, triplica dichos valores citados por los autores.

CONCLUSIONES

El estudio del comportamiento térmico del tostador convencional permitió conocer tanto las condiciones de temperatura máxima de operación como el tiempo requerido.

La variación de la temperatura del tostador por el efecto de colocar una masa controlada en el interior, se ajustó adecuadamente a un modelo matemático exponencial – lineal, el cual permitió asociar la temperatura del aire en el interior de la cámara de torrefacción a la temperatura del grano.

La masa colocada en el interior del tostador afectó significativamente la rapidez de calentamiento de los granos, esta rapidez se compone de dos etapas separadas por un punto de inflexión, la primera etapa es caracterizada por un calentamiento brusco y la segunda etapa por calentamiento a razón constante.

El calentamiento de los granos fue representado por la ecuación del modelo físico de secado adaptado satisfactoriamente al tostado. También se desarrolló un nuevo modelo matemático que ajustó adecuadamente la temperatura de los granos durante su torrefacción e incluyó satisfactoriamente el efecto de la masa inicial.

El incremento de temperatura de calentamiento y cantidad de masa demostró un efecto lineal sobre el tiempo de tostado del café, cuando se obtuvo diferentes grados de tueste. El tiempo de tueste obtenido se encuentran dentro del rango recomendado en las normas internacionales, lo que garantiza la calidad de la bebida del café procesado.

El efecto de la cantidad de masa en las propiedades físicas del café durante la torrefacción permitió establecer las cinéticas relacionadas a la pérdida de la masa total, la expansión aparente, la disminución de la densidad aparente y la transformación de la materia seca.

RECOMENDACIONES

Evaluar el efecto combinado de la cantidad de masa inicial y la temperatura del tostador, variando la entrada de gas al quemador del tostador.

Determinar el efecto del contenido de humedad inicial del café crudo sobre las variables respuesta al realizar el proceso de torrefacción y principalmente sobre el tiempo de proceso.

Las cinéticas de las propiedades físicas del café y la rapidez del proceso de la torrefacción deben asociarse a las características sensoriales y exigencias de los mercados consumidores, con el fin de orientar siempre por la vía de la calidad el proceso.

REFERENCIAS

- Abarca et al. (2016). Efecto de la masa sobre el tiempo de tostado en café. *XII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola* (págs. 557-562). Bogotá, Colombia: ISBN 978-958-57102-6-9.
- Alfaro, V. (2015). *Efectos de la altitud sobre las características físicas y organolépticas del café de la Zona de los Santos (Tesis de Licenciatura)*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Bendig. (15 de noviembre de 2016). *Torrefacción-Tostadores*. Obtenido de Bendig Maquinaria S.A.: www.bendig.co.cr
- Bottazzi et al. (2012). A numerical approach for the analysis of the coffee roasting process. *Journal of Food Engineering* 112, 243-252.
- Bustos, J. D. (2015). *Modelagem das propriedades físicas e da transferencia de calor e massa dos grãos de café durante a torrefação (Tese de Doutorado)*. Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Viçosa.
- Clarke, R. J., & Macrae, R. (1987). *Coffee, Volumen 2, Technology*. Crown House, Linton Road, Barking, Essex IG11 8JU, England: ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS LTD.
- Clarke, R. J., & Vitzthum, O. G. (2001). *Coffee. Recent developments*. Osney Mead, Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Fabbri et al, A. (2011). Numerical Modeling of Heat and Mass Transfer during Coffee Roasting Process. *Journal of Food Engineering* 105, 264–269.
- Hernández et al, J. A. (2007). Analysis of the heat and mass transfer during coffee batch roasting. *Journal of Food Engineering* 78, 1141–1148.

- ICAFE. (Enero de 2016). *Nuestro Café*. Obtenido de Instituto del Café de Costa Rica:
<http://www.icafe.go.cr>
- ICO. (Enero de 2015). *About Coffee*. Obtenido de International Coffee Organization:
<http://www.ico.org>
- Illy, A., & Viani, R. (1995). *Espresso Coffee: The Chemistry of Quality*. London:
Academic Press.
- Illy, A., & Viani, R. (2005). *Espresso Coffee: The Science of quality*. San Diego,
California, USA: Elsevier Academic Press.
- INTECO. (2011). *INTE ISO 6673:2011. Café verde. — Determinación de la pérdida de
masa a 105°C. Segunda Edición*. Costa Rica: Secretaría: INTECO.
- Kuit et al, M. (2004). *Manual for Arabica cultivation*. Highway 9, km 19 • Cam Lo, Quang
Tri: Tan Lam Agricultural Product Joint Stock Company.
- López, K. (2014). *El mercado mundial del café tostado*. Costa Rica: PROCOMER,
Dirección de Inteligencia Comercial.
- Meira, F. (2008). *Pós-colheita do café*. Lavras, Brasil: Editora Universidade Federal de
Lavras.
- Mendes, F. (2012). *Cinética de secagem, propriedades físicas e higroscópicas dos frutos e
caracterização do processo de torrefação dos grãos de Coffea canephora (Tese de
Doutorado)*. Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Viçosa.
- MMM-Group. (12 de noviembre de 2006). *Laboratory ovens-VENTICELL*. Obtenido de
MMM-Group: www.mmm-medcenter.de
- Nagaraju et al, V. D. (1997). Studies on roasting of coffee beans in a spouted bed. *Journal
of Food Engineering* 31, 263-270.

- Pabis, S., Jayas, D., & Cenkowski, S. (1998). *Grain Drying, Theory and Practice*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Schenker, S. (2000). *Investigations on the hot air roasting of coffee beans*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology.
- Schwartzberg, H. G. (2002). Modeling Bean Heating during Batch Roasting of Coffee Beans. *In Engineering and Food for the 21st Century*, 1036.
- Vargas et al. (2016). Kinetics of mass loss of arabica coffee during roasting process. *Engenharia Agrícola. ISSN: 1809-4430 (on-line)*. V.36, n. 2, 300-308, April 2016.
- Vargas, G. A. (2011). *Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação*. Viçosa, Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Viçosa.
- Vargas, G. A. (2016). *Cinética do aquecimento, Expansão volumétrica e perda de massa em grãos de café durante a torrefação*. Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Viçosa.
- Westland, S., & Ripamonti, C. (2004). *Computational Colour Science using MATLAB*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Wintgens, J. N. (2004). *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production. A guide for growers, processors, traders, and researchers*. Federal Republic of Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

ANEXOS

