

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA MATERIA PRIMA, EL TIEMPO DE
TOSTIÓN Y EL GRADO DE MOLIENDA SOBRE EL RENDIMIENTO DEL
PROCESO DE EXTRACCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ SOLUBLE

ANGIE CATALINA CONTRERAS LÓPEZ
KATIA KARIME QUINAYÁS PUENTES

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2019

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA MATERIA PRIMA, EL TIEMPO DE
TOSTIÓN Y EL GRADO DE MOLIENDA SOBRE EL RENDIMIENTO DEL
PROCESO DE EXTRACCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ SOLUBLE.

ANGIE CATALINA CONTRERAS LÓPEZ
KATIA KARIME QUINAYÁS PUENTES

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2019

Nota de aceptación:

Ing. Javier Rey

Ing. Mario Noriega

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Postgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento.

Estos corresponden únicamente a los autores.

Doy gracias a Dios, a la vida y al universo que conspiró para que el día de hoy este aquí, tratando de unir palabras y formar frases que de alguna manera, ayuden a expresar mis sentimientos de inmensa gratitud para quienes han sido mi respaldo, mi fortaleza y compañía en este camino, mi familia, tan dispereja que cada pieza cuadra a la perfección ... Doy gracias a mi mamá Ana Rita Puentes, esa señora que ha hecho hasta lo que no está a su alcance para que sus hijos alcancen lo que anhelan, lo que tal vez ella, alguna vez anhelo pero no pudo tener; a mi hermana Viviana Andrea, con quien siempre fuimos blanco y negro, norte y sur, todo y nada, pero que a pesar de todo me ha querido y cuidado siempre, olvidándose de la hermana fastidiosa en la que a veces me convierto, a mis hermanos, Olguer y Camilo, con quienes a pesar de las diferencias, sé que siempre puedo contar... Quiero dar inmensos agradecimientos a mi pareja Javier Handres Achury, quien me ha enseñado el valor del amor construido, ese que no se tira a la basura porque sí, porque ese amor, en los tiempos de hoy vale oro, a ti y al hermoso lazo que nos une desde hace cuatro años, mi pequeñita Anna Victoria, la perfecta demostración de que cada día vale la bendita pena. No puedo dejar de agradecer a la familia Cruz Gómez, ustedes me han enseñado a entender el verdadero sentido del dicho "la Unión hace la fuerza"... Quiero agradecer además al señor Héctor Balceró, por su infinito apoyo en el desarrollo de este proyecto y por enseñarme que sólo amando lo que hacemos podemos ser mejores profesionales, también quiero agradecer a mi compañera, por haber permanecido juntas en este arduo proceso. Finalmente, no me perdonaría terminar este párrafo sin mencionar a mi ángel del cielo, mi papá Olguer Quinayás, el único regalo que pido para ese día, es que tú en la forma en que Dios te permita, estés presente cuando mencionen en la presentación de graduandos: Ingeniera Química, Katia Karime Quinayás Puentes

Katia Karime Quinayás Puentes

En primer lugar quiero darle gracias a Dios por estar presente en mi vida, por guiarme y permitirme llegar hasta este momento, a mis padres y a mi abuela por estar conmigo durante todo el proceso por enseñarme con amor, formarme con paciencia y corregirme cuando era necesario, gracias a ellos he llegado a ser quien soy, a mi hermanito por llegar a mi vida en el momento indicado, por enseñarme que para amar basta con una mirada que se exprese de manera pura y sincera, a toda mi familia y amigos por su apoyo incondicional por ser parte de este pequeño triunfo porque todo es por ellos y para ellos, todos de alguna manera aportaron un granito de arena que hizo posible que esté día llegara, quiero agradecer infinitamente a Héctor Balceró por guiarnos en este proceso por su apoyo y por enseñarnos un poquito de todo el conocimiento y amor que tiene por el café, a mi compañera por la comprensión, esfuerzo y trabajo, para finalizar quiero agradecerle a mi novio, porque ha sido un gran apoyo, por su amor, comprensión y por enseñarme que en ocasiones las cosas no son fáciles pero todo vale la pena, por ayudarme a crecer como persona y estar a mi lado. Contar con todos y cada uno de ustedes hace que todo lo que hago día a día valga la pena, los amo mucho.

Angie Catalina Contreras López

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a

A nuestros padres, por su apoyo incondicional y el esfuerzo inmenso que hacen por nosotras.

Al Ingeniero Héctor Balceró, por transmitirnos su conocimiento y amor por el café.

Al profesor Felipe Correa, por su asesoramiento en el desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	26
OBJETIVOS	28
1. GENERALIDADES	29
1.1 EL CAFÉ	29
1.2 COSECHA Y BENEFICIO DEL CAFÉ	29
1.3 PROCESAMIENTO INDUSTRIAL PARA LA OBTENCIÓN DE CAFÉ SOLUBLE	30
1.3.1 Trilla y clasificación del grano	31
1.3.1.1 La trilla	31
1.3.1.2 Separación densimétrica	33
1.3.1.3 Separación colorimétrica	35
1.3.2 La tostión	35
1.3.2.1 Secado	36
1.3.2.2 Calentamiento	36
1.3.2.3 Pirólisis	36
1.3.2.4 Enfriamiento	36
1.3.3 Curva de tostión	37
1.3.4 Molienda	38
1.3.5 Extracción	39
1.3.5.1 Humectación	39
1.3.5.2 Extracción de solubles	39
1.3.5.3 Hidrólisis	39
1.3.6 Secado	40
1.3.6.1 Secado por atomización o spray dried	40
1.3.6.2 Secado por liofilización o freeze dried	40
1.4 ANÁLISIS SENSORIAL O CATACIÓN DEL CAFÉ	41
2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	42
2.2 METODOLOGÍA	42
2.2.1 Localización	42
2.2.2 Muestreo	42
2.2.2.1 Determinación del tamaño de muestra	43
2.2.2.2 Conformación de las muestras compuestas	45
2.2.3 Caracterización de muestras compuestas de café verde	47
2.2.3.1 Densidad	47
2.2.3.2 Humedad	48
2.2.3.3 Tamaño de grano	49
2.2.3.4 Ripio	49
2.2.3.5 Materia extraña e impurezas	49
2.2.3.6 Defectos mayores	49

2.2.3.7	Color del grano	50
2.2.3.8	Prueba de taza	50
2.2.4	Análisis de resultados	51
2.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
2.3.1	Caracterización del CPS	51
2.3.2	Caracterización de muestras compuestas	53
2.3.3	Perfiles sensoriales de las muestras	57
2.3.4	Análisis cluster	58
3.	EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE TOSTIÓN Y EL GRADO DE MOLIENDA EN EL RENDIMIENTO DE EXTRACCION Y EL PERFIL SENSORIAL DEL EXTRACTO	62
3.1	DISEÑO EXPERIMENTAL	62
3.1.1	Factores tratamiento	62
3.1.1.1	Café	62
3.1.1.2	Tostión	63
3.1.1.3	Molienda	69
3.1.2	Variables respuesta	73
3.1.2.1	Rendimiento de extracción	73
3.1.2.2	Calificación sensorial	75
3.1.3	Factores perturbadores	75
3.1.3.1	Humedad del ambiente	75
3.1.4	Matriz de experimentos	76
3.2	VALIDACIÓN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RENDIMIENTO	77
3.3	EXTRACCIÓN DE CAFÉS COMERCIALES	80
3.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	80
3.4.1	Análisis estadístico	80
3.4.2	Selección de los mejores extractos	80
3.5	RESULTADOS Y DISCUSION	82
3.5.1	Análisis estadístico	82
3.5.2	Selección de los mejores tratamientos	89
3.5.3	Resultados de cafés comerciales	91
4.	ANÁLISIS DEL COSTO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS SELECCIONADOS	94
4.2	ESQUEMA DE VENTA DE CAFÉ VERDE POR “PREPARACIONES”	94
4.3	ESQUEMA DE VENTAS DE RACAFÉ POR INGREDIENTES	95
4.4	COSTOS VARIABLES ESTIMADOS DE LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ SOLUBLE	96
4.4.1	Proceso producción de café soluble	96
4.4.2	Descripción del proceso de producción de café soluble	99
4.4.3	Balance de materia del proceso	101
4.4.4	Balance de energía del proceso	103
4.4.5	Estimación de los costos variables del proceso	103

5. CONCLUSIONES	109
6. RECOMENDACIONES	110
BIBLIOGRAFÍA	112
ANEXOS	117

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Distribución de café verde en el clasificador por tamaño del proceso de Racafé	33
Tabla 2. Balance de materia de corrientes con alta y baja densidad	35
Tabla 3. Codificación de muestras y puntos de muestreo	42
Tabla 4. Tamaños de muestra compuesta calculados en la prueba piloto para cada variable en gramos	44
Tabla 5. Tamaños de muestra seleccionados para el muestreo compuesto	44
Tabla 6. Composición porcentual de cada muestra compuesta con respecto a las muestras puntuales recolectadas	46
Tabla 7. Caracterización del CPS muestreado	52
Tabla 8. Resultados de caracterización de muestras compuestas	53
Tabla 9. Resultados de la evaluación sensorial para cada muestra	57
Tabla 10. Tiempo de tostión establecido para cada nivel de tostión y para cada muestra	65
Tabla 11. Caracterización de los perfiles de tostión obtenidos para cada muestra	67
Tabla 12. Tonalidad de color obtenida para cada tostión y cada muestra	68
Tabla 13. Diámetro promedio de partícula para cada graduación	72
Tabla 14. Matriz de experimentos obtenida del diseño factorial 6*3*3	77
Tabla 15. Escala de valoración del rendimiento de extracción a partir del cálculo de percentiles	81
Tabla 16. Resultados del análisis de varianza para cada factor y sus interacciones	82
Tabla 17. Resultados de prueba comparativa Tukey para el factor café	84
Tabla 18. Resultados de prueba comparativa Tukey para el factor molienda	84
Tabla 19. Resultados de prueba comparativa Tukey para el factor tostión	84
Tabla 20. Matriz de Richman para la muestra compuesta M-13	89
Tabla 21. Resumen de los mejores tratamientos obtenidos para cada muestra compuesta	90
Tabla 22. Resultados de extracción de cafés comerciales	92
Tabla 23. Clasificación de los flujos muestreados con respecto a las especificaciones de calidad de Colcafé	96
Tabla 24. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café de M-13	102
Tabla 25. Calor estimado para cada equipo de acuerdo al balance de energía realizado para M-13	103
Tabla 26. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-13	104
Tabla 27. Resultados de extracción obtenidos mediante la ecuación 6	131
Tabla 28. Resultados de extracción obtenidos mediante procedimiento de NTC 4602-1	131
Tabla 29. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta	

M-13	133
Tabla 30. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-14/15	133
Tabla 31. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-16	134
Tabla 32. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-17	134
Tabla 33. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-18	135
Tabla 34. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-RC	135
Tabla 35. Matriz de Richman para la muestra compuesta M-14/15	136
Tabla 36. Matriz de Richman para la muestra compuesta M-16	136
Tabla 37. Matriz de Richman para la muestra compuesta M-17	136
Tabla 38. Matriz de Richman para la muestra compuesta M-18	136
Tabla 39. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café M-14/15	144
Tabla 40. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café M-16	145
Tabla 41. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café M-17	146
Tabla 42. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café M-18	147
Tabla 43. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café M-RC	148
Tabla 44. Constantes de Kick, Rittinger y Bond obtenidas para cada muestra de café tostado	152
Tabla 45. Tamaños promedio de la alimentación y la muestra molida obtenida en los ensayos de molienda	153
Tabla 46. Resultados del balance de calor realizado para la muestra M-14/15	159
Tabla 47. Resultados del balance de calor realizado para la muestra M-16	159
Tabla 48. Resultados del balance de calor realizado para la muestra M-17	159
Tabla 49. Resultados del balance de calor realizado para la muestra M-18	160
Tabla 50. Resultados del balance de calor realizado para la muestra M-RC	160
Tabla 51. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-14/15	161
Tabla 52. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-16	161
Tabla 53. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-17	161
Tabla 54. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-18	162
Tabla 55. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-RC	162

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Parámetros de calificación sensorial de las muestras	51
Cuadro 2. Clasificación granulométrica establecida en la NTC 3534	69
Cuadro 3. Condiciones de operación para la extracción	74
Cuadro 4. Pesos establecidos para cada criterio de valoración	81
Cuadro 5. Preparaciones comercializadas nacionalmente por Racafé	94
Cuadro 6. Composición de la pasilla comercializada para producción de café soluble	94
Cuadro 7. Requerimientos de los compradores mayoritarios de Racafé	95
Cuadro 8. Lista de equipos correspondientes al PFD planteado	100
Cuadro 9. Lista de corrientes correspondientes al PFD planteado	101
Cuadro 10. Precio de servicios usados para la estimación del costo de cada operación	103
Cuadro 11. Defectos asociados con materia extraña (impurezas)	118
Cuadro 12. Defectos por color en el café	119
Cuadro 13. Defectos por peso y/o tamaño en el café	120
Cuadro 14. Resultados del análisis granulométrico de la graduación A del molino	128
Cuadro 15. Resultados del análisis granulométrico de la graduación B del molino	128
Cuadro 16. Resultados del análisis granulométrico de la graduación C del molino	129
Cuadro 17. Resultados del análisis granulométrico de la graduación D del molino	129
Cuadro 18. Resultados del análisis granulométrico de la graduación E del molino	130
Cuadro 21. Resultados del análisis granulométrico de la graduación F del molino	130
Cuadro 20. Condiciones de referencia tomadas para el secador por aspersion	142
Cuadro 21. Condiciones de operación planteadas para el balance de energía del tostador	149
Cuadro 22. Valores de entalpía de las corrientes de agua y poder calorífico del gas natural usados en el balance de energía	154
Cuadro 23. Condiciones usadas para el balance de energía en el evaporador	156

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Mesas densimétricas usada en el proceso de Racafé	34
Ilustración 2. Conservación y almacenamiento de las muestras de café verde	47
Ilustración 3. Medidor de densidad	48
Ilustración 4. Medidor de humedad	48
Ilustración 5. Determinación de (a) ripio y (b) defectos y materia extraño	49
Ilustración 6. Mesa de catación preparada con las seis muestras compuestas de café tostado y molido	50
Ilustración 7. Tostador de laboratorio usado en los ensayos de tosti3n	63
Ilustración 8. (a). Molino utilizado para definir los niveles de molienda, (b) Graduaciones del molino analizadas	70
Ilustración 9. Tamices usados para el análisis granulométrico del molino	70
Ilustración 10. Equipo usado para realizar la extracci3n de café	73
Ilustración 11. Proceso de oxidaci3n observada en las muestra con tosti3n a). Clara, b). Media y c). Oscura	76
Ilustraci3n 12. Formato de cataci3n suministrado por la empresa	122

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Etapas para la selección de café	27
Figura 2. Proceso de producción de café soluble a partir del fruto de café	30
Figura 3. Diagrama de bloques del proceso de clasificación y trilla de la empresa Racafé	32
Figura 4. Comportamiento del perfil de tuestión típico usado en la industria	38
Figura 5. Flujo promedio calculado para cada muestra compuesta	52
Figura 6. Distribución del tamaño de grano de cada muestra	53
Figura 7. Resultados de densidad y humedad de cada muestra	54
Figura 8. Resultados de materia extraña e impurezas en cada muestra	55
Figura 9. Resultados de defectos mayores obtenidos	56
Figura 10. Resultados del ripio de cada muestra	56
Figura 11. Dendograma de clasificación de flujos de salida del proceso	59
Figura 12. Perfiles sensoriales de muestras agrupadas según el análisis cluster	60
Figura 13. Perfiles de las muestras más dispersos de acuerdo al análisis cluster	61
Figura 14. Curva de tuestión característica para M-13	64
Figura 15. Distribución granulométrica obtenida para cada graduación del molino	71
Figura 16. Relación entre los rendimientos obtenidos para cada método	79
Figura 17. Gráfica de efectos principales para el rendimiento	86
Figura 18. Comparación de resultados seleccionados con respecto a los valores actuales obtenidos	93
Figura 19. Diagrama de flujo del proceso industrial de producción de café soluble	98
Figura 20. Comparación del costo estimado obtenido para cada tipo de café	105
Figura 21. Contribución porcentual de cada operación al costo total del proceso	106
Figura 22. Perfil sensorial M-13	125
Figura 23. Perfil sensorial M-17	125
Figura 24. Perfil sensorial M-14/15	125
Figura 25. Perfil sensorial M-18	125
Figura 26. Perfil sensorial M-16	126
Figura 27. Perfil sensorial M-RC	126
Figura 28. Perfil de tuestión de M-14/15	127
Figura 29. Perfil de tuestión de M-16	127
Figura 30. Perfil de tuestión de M-17	127
Figura 31. Perfil de tuestión de M-18	127
Figura 32. Perfil de tuestión de M-RC	127
Figura 33. Diagrama planteado para el balance de materia en la batería de extracción	137
Figura 34. Diagrama planteado para el balance de materia el tostador	140
Figura 35. Diagrama planteado para el balance de materia en el evaporador	141

Figura 36. Diagrama planteado para el balance de materia en el secador por aspersión	143
Figura 37. Diagrama planteado para el cálculo de calor requerido en la extracción	154
Figura 38. Diagrama planteado para el cálculo de calor requerido en el evaporador	156
Figura 39. Diagrama planteado para el cálculo de calor requerido en la operación de secado	157

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Ecuación para la determinación del tamaño de muestra	43
Ecuación 2. Ponderación del flujo medido en la recolección de muestras puntuales	45
Ecuación 3. Cálculo de la cantidad de muestra puntual que se debe tomar para la conformación de la muestra compuesta	45
Ecuación 4. Ecuación del modelo matemático de Gauss	72
Ecuación 5. Ecuación para el cálculo del tamaño promedio de partícula	72
Ecuación 6. Ecuación para el cálculo de rendimiento de extracción a partir de %STD	75
Ecuación 7. Ecuación para la estimación del porcentaje de sólidos solubles	78
Ecuación 8. Ecuación para la estimación del rendimiento de extracción a partir de secado	78
Ecuación 9. Ecuación del modelo para la estimación del rendimiento de extracción en función del tratamiento aplicado	88
Ecuación 10. Uso de la ecuación del modelo para estimar el rendimiento de extracción	88
Ecuación 11. Distancia euclídea	123
Ecuación 12. Ecuación del diámetro aritmético	151
Ecuación 13. Ecuación del diámetro geométrico	151
Ecuación 14. Ecuación del modelo de Rittinger	152
Ecuación 15. Ecuación del modelo de Kick	152
Ecuación 16. Ecuación del modelo de Bond	152

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Material extraño e impurezas en el café	118
ANEXO B. Defecto por color y tamaño que se presentan en el café	119
ANEXO C. Formato de catación	122
ANEXO D. Análisis cluster	123
ANEXO E. Perfiles sensoriales de las muestras compuestas	125
ANEXO F. Perfiles de tuestión	127
ANEXO G. Resultados de análisis granulométrico del molino	128
ANEXO H. Validación de la ecuación para el cálculo del rendimiento	131
ANEXO I. Resultados de rendimiento y calificación sensorial	133
ANEXO J. Selección multicriterio de los mejores tratamientos	136
ANEXO K. Cálculos de balance de materia del proceso de producción de café soluble	137
ANEXO L. Cálculos del balance de energía del proceso de producción de café soluble	149
ANEXO M. Estimación de costos variables del procesamiento industrial de cada muestra	161

GLOSARIO

ACIDEZ: sensación originada por las sustancias ácidas del café que pasan a la bebida y son detectados en la cavidad bucal. Depende de la variedad, sistema de beneficio, región de cultivo, grado de tueste y materia prima. Entre mayor sea el grado de tueste la acidez disminuye.

AMARGO: sensación producida por sustancias amargas propias del café, que al ser extraídas con el agua caliente pasan a la bebida. Se percibe sobre todo en la parte de atrás de la lengua. Un amargo desagradable puede ser causado por la sobre-extracción del café. A mayor grado de tueste se siente mayor el sabor amargo

AROMA DE LA BEBIDA: definición idéntica a la anterior que se percibe en la infusión a una temperatura mayor a 55°C

ASTRINGENTE: sensación táctil no deseable en café suave, producida por sustancias polifenólicas como taninos; se pueden presentar en café por la presencia de granos inmaduros y/o por condiciones en la pre y pos-cosecha.

BENEFICIO DEL CAFÉ: técnicamente consiste en la serie de pasos o etapas de procesamiento a las que se somete el fruto del café para quitar o eliminar todas sus capas o cubiertas de la forma más eficiente sin afectar su calidad y su rendimiento. Conjunto de operaciones realizadas para transformar el café cereza en pergamino seco.

CAFÉ: término genérico para las frutas y granos de las plantas del género *Coffea* generalmente de especies cultivadas, también como de productos obtenidos a partir de estos frutos y granos en diferentes estados de transformación y empleo, destinados para el consumo.

CAFÉ ARÁBIGO: la especie de café arábigo se considera por producir la más alta calidad de la bebida muy bajas densidades de siembra (961-1.600 cafetos/ha), altas densidades de tallos de café, altas densidades del sombrero, a libre crecimiento o con descope, sin fertilización y muy baja productividad (300 a 500 kg.ha⁻¹).

CAFÉ EXCELSO: es una calidad del café almendra / Es aquella almendra producto de un esmerado esfuerzo de selección (muy bien clasificada) en todos sus atributos físicos y sensoriales. Esta selección se realiza en las trilladoras de café.

CAFEÍNA: la cafeína (1, 3, 7-trimetilxantina) es una de las tres metilxantinas presentes en el café junto con la teofilina y la teobromina.

CAFÉ PASILLA: las pasillas son los granos de café que presentan defectos, como brocados, vinagres, negros, partidos, astillados. Los cuales son granos de café resultantes del proceso de pasar de café verde a café excelso.

CAFÉ PERGAMINO: es una forma de presentación del café, que se obtiene después de la etapa de secado en el proceso de beneficio húmedo, en la cual el grano aparece recubierto por el endocarpio o pergamino.

CAFÉ ROBUSTA: la especie de café robusta es considerada una planta nativa de los bosques ecuatoriales de África occidental, desde la costa Oeste en Uganda y la parte Sur del Sudán, en alturas que van desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 1,000 metros.

CAFÉ SOLUBLE: el café soluble o instantáneo es el polvo o granulado que queda luego de que al extracto de café se le ha retirado el agua, es estable y puede mantener su calidad durante muchos meses e incluso años pues es menos vulnerable a procesos de oxidación.

CAFÉ TOSTADO: café obtenido por torrefacción del café verde en almendra, mediante tratamientos térmicos que producen cambios físicos y químicos fundamentales en la estructura y composición de la materia prima, brindándole oscurecimiento en su color y desarrollando las características de sabor de un café tostado.

CAFÉ VERDE: es el resultado de someter el café pergamino al proceso de trilla donde se retira el endocarpio (pergamino), quedando únicamente la almendra de café.

CALIDAD DEL GRANO: considera características del café como densidad, tamaño del grano, color imperfecciones de la calidad de taza del grano por la presencia de materia extraña.

CATACIÓN DE CAFÉ: es el método usado para evaluar la calidad de la bebida (forma de consumo del 99.99% del café que se produce en el mundo) para medir el aroma, el sabor y la sanidad del café. Mediante las evaluaciones sensoriales se pueden identificar los defectos presentes en la bebida de café, conocer la intensidad de una característica sensorial como la acidez y el dulzor, reconocer y calificar el sabor y el aroma, y de igual forma, medir la calidad global del producto.

CUERPO: fuerza, carácter, pesadez de la bebida asociada a las características de la materia prima y a la relación agua-café empleada en la preparación de la bebida.

DEFECTOS MAYORES: granos: cardenillo, vinagre parcial o total y negro parcial o total.

DENSIDAD A GRANEL: se define como la proporción entre la masa y el volumen ocupado. La medición de la masa ocupa un volumen conocido, fijo, bajo, condiciones precisas de llenado. Las condiciones de caída libre establecidas en el método influyen en el llenado del contenedor de volumen conocido condiciones de caída libre.

EXTRACCIÓN: es la operación clave en la manufactura a gran escala del café instantáneo, ésta se puede definir como la operación donde se usa agua líquida a elevadas temperaturas como solvente para mojar el café tostado y molido.

FENOL: aroma y principalmente sabor indeseable en el café, asociado a compuestos halogenados (con cloro, yodo). Se puede generar durante el beneficio por lavado con aguas cloradas o con residuos de desinfectantes, o por re humedecimiento del café durante el secado.

FERMENTO: sensación olfativa y gustativa a materia orgánica descompuesta indeseable en el café. Producido en la sobre-fermentación enzimática de compuestos orgánicos durante el beneficio.

FRAGANCIA: intensidad que producen los compuestos volátiles del café, cuando son percibidos por el sentido del olfato sin la adición de agua, se pueden detectar algunos defectos o notas particulares. No se valora en extractos de café.

GRANO APROVECHABLE: todo grano bueno incluyendo los granos con los siguientes defectos: cristalizado, decolorado veteado, decolorado reposado, decolorado ámbar, decolorado sobre secado, grano flojo y picado por insectos no deteriorado.

GRANULOMETRÍA: análisis que se realiza mediante una operación de zarandeo mecánico o manual para evaluar y clasificar el café según su tamaño.

IMPRESIÓN GLOBAL: nota que emite el juez al calificar la bebida de forma integral. Resume el juicio del catador con relación a la calidad de la muestra de café analizada. Para esta nota se tienen en cuenta que las observaciones se describen la muestra y complementan el análisis.

IMPUREZA: considerando impureza todo material diferente a los granos de café verde pero que son propios del procesamiento del café.

MATERIA EXTRAÑA: todo material mineral, animal o vegetal que no es propio del fruto o cereza del café.

MERMA: denominación que se la da a la pérdida del peso del grano de café verde durante el proceso de tostión.

POLIFENOLES EN EL CAFÉ: el café es una fuente considerable de polifenoles y compuestos fenólicos, que puede aportar antioxidantes el café; es la fuente diaria principal de antioxidantes, más que el vino y los vegetales y esto se debe a que a pesar de que existen alimentos con una mayor cantidad de antioxidantes que el café, éste se consume con más frecuencia y mayor volumen.

QUENCHING (APAGADO): proceso de enfriamiento sobre los granos del café por aspersión de agua.

REPOSO: sabor y aroma característico de café verde que debido al tiempo y/o condiciones de almacenamiento han hecho que las características de aroma y sabor, especialmente la acidez, hayan disminuido. En el caso de café fresco esta característica se considera un defecto. Cuando aparecen leves notas de reposo en un café la sensación es denominada como Ligerio Reposo.

RIPIO: café verde que pasa a través de una malla de 4,76mm (12/64 de pulgada) de hueco redondo.

SABOR RESIDUAL: sabores pos gustativos que permanecen en la boca después de degustar la bebida, pueden ser agradables o desagradables dependiendo de las características iniciales de la materia prima, condiciones de proceso y almacenamiento del producto.

SOLIDOS SOLUBLES: son los que contribuyen en forma determinante al sabor y carácter de la taza. Se obtienen por medio del proceso de extracción.

TRILLA: proceso mecánico que mediante fricción permite remover el endocarpio y posteriormente se lleva a cabo una clasificación por tamaño, densidad y color del café pergamino para producir café verde.

TORREFACCIÓN (TOSTIÓN): proceso en el que se somete cierta cantidad de café verde a condiciones de temperatura y tiempo para producir cambios en la estructura y composición del grano desarrollando el sabor y aroma característicos de tostado.

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

NTC	norma técnica colombiana
CPS	café pergamino seco
BH	base húmeda
%STD	porcentaje de solidos totales disueltos
CO₂	dióxido de carbono
CII	calle
ton	toneladas
<i>n_c</i>	nivel de confianza
<i>n_h</i>	tamaño de muestra
$Z_{\alpha/2}^2$	valor del cuantil de la normal
σ^2	varianza
e	error del experimento
f'_{ih}	flujo ponderado para la muestra puntual i
f_{ih}	flujo puntual i de la muestra h
m_{ih}	masa a tomar de la muestra puntual i
\bar{X}	tamaño promedio de partícula
<i>Tm</i>	porcentaje acumulado
%SS	solidos solubles
m_1	masa de la muestra de café tostado y molido
m_2	masa de la bebida total
m_3	masa de la alícuota de la bebida usada
m_4	masa de la cápsula metálica
%RE	porcentaje de rendimiento
\bar{R}	rendimiento promedio
RP	muestra de café verde proveniente de Pereira
RS	muestra de café verde proveniente de Santander
RH	muestra de café verde proveniente de Huila
RA	muestra de café verde proveniente de Armenia
p	valor del estadístico de probabilidad
M-13	muestra de colas de la malla número 13
M-14/15	muestra de colas de la malla número 14/15
M-16	muestra de colas de la malla número 16
M-17	muestra de colas de la malla número 17
M-18	muestra de colas de la malla número 18
M-RC	muestra de rechazos colorimétricos
Con. Fresco	consumo fresco
ch. pergamino	chorreado de pergamino
pas. Máquinas	pasilla de máquinas
pas. Catadora	pasilla catadora
SRT	sello rojo tradicional
SRV	sello rojo vive

RESUMEN

El café soluble es un producto que ha alcanzado gran aceptación en los consumidores del café colombiano, su proceso de producción industrial incluye operaciones como la tostión, molienda y extracción del café. Actualmente, empresas cafeteras nacionales como Racafé y Colcafé buscan alternativas orientadas al mejoramiento de la eficiencia en el procesamiento de café tipo pasilla para la producción de café soluble, bajo este contexto se planteó el presente proyecto, con el objetivo de evaluar la influencia de las características del café y de las operaciones tostión y molienda sobre el rendimiento de la extracción.

Se ejecutó un diseño de experimentos de tres factores, los cuales se denominaron “café”, “tostión” y “molienda” con seis niveles del primero, que corresponden a seis muestras de café verde con tamaños de granos diferentes obtenidas de la planta trilladora de Racafé en Bogotá, las muestras se tostaron en tres niveles (clara, media, oscura) y se molieron en tres niveles diferentes (fina, media, gruesa) de acuerdo a los lineamientos de la NTC 2441, con lo que se obtuvo un total de 54 tratamientos. La variable respuesta fue el rendimiento de extracción obtenido con cinco repeticiones y calculado de acuerdo a referencias bibliográficas previamente validadas con la metodología establecida en la NTC 4602-1, también se determinó para cada tratamiento la variable “impresión global”, correspondiente a la calidad sensorial de la muestra, obtenida mediante evaluación en panel de catación de Racafé. Los datos se analizaron mediante el análisis de varianza ANOVA y el método de comparaciones de medias de Tukey, utilizando el software de estadística Minitab 18. Se seleccionaron los mejores tratamientos mediante evaluación multicriterio y estos se compararon con el rendimiento actual de cafés comerciales. Por último, se analizó la variación en los costos operativos del proceso industrial de producción de café soluble para los tratamientos seleccionados.

Los perfiles sensoriales arrojaron una relación directa con las características del café verde como la densidad, tamaño de grano, humedad, y el contenido de ripio, defectos y materia extraña. El análisis estadístico mostró que existe influencia estadísticamente significativa de los tres factores sobre el rendimiento de la extracción bajo un nivel de confianza del 95% y en su orden de influencia está primero la molienda, seguido de la tostión y por último las características del café. Se obtuvo diferencia significativa entre los tres niveles de tostión y molienda tratados, mientras para el factor café la diferencia solo fue significativa para dos niveles trabajados. El rendimiento promedio de los tratamientos seleccionados fue de 22,4% el cual fue superior al de los cafés comerciales en aproximadamente 6%. El costo del proceso de producción presenta ahorros relacionados con menores tiempos de tostión y mayores rendimientos de extracción.

Palabras clave: Café verde, pasilla, tostión, molienda, extracción, diseño de experimentos, factor, nivel, tratamiento, impresión global, análisis cluster.

ABSTRACT

Soluble coffee is a product that has reached great acceptance in Colombian coffee consumers, its industrial production process includes operations such as roasting, grinding and coffee extraction. Currently, national coffee companies such as Racafé and Colcafé are looking for alternatives aimed at improving efficiency in the processing of pasilla coffee for the production of soluble coffee, under this context the present project was proposed, with the aim of assessing the influence of the characteristics of coffee and roasting and grinding operations on the extraction performance.

A three-factor experiment design was executed, which were called “coffee”, “roasting” and “grinding” with six levels of the first, corresponding to six green coffee samples with different grain sizes obtained from the threshing plant Racafé in Bogotá, the samples were roasted on three levels (light, medium, dark) and ground on three different levels (fine, medium, thick) according to the guidelines of NTC 2441, which resulted in a total of 54 treatments. The response variable was the extraction performance obtained with five repetitions and calculated according to bibliographic references previously validated with the methodology established in NTC 4602-1, the variable “global impression”, corresponding to the sensory quality, was also determined for each treatment of the sample, obtained by evaluation in Racafé cupping panel. The data were analyzed using the ANOVA variance analysis and the Tukey means comparisons method, using the Minitab 18 statistical software. The best treatments were selected by multicriteria evaluation and these were compared with the current yield of commercial coffees. Finally, the variation in the operating costs of the industrial process for the production of soluble coffee for the selected treatments was analyzed.

The sensory profiles showed a direct relationship with the characteristics of green coffee such as density, grain size, humidity, and gravel content, defects and foreign matter. The statistical analysis showed that there is a statistically significant influence of the three factors on the yield of the extraction under a 95% confidence level and in its order of influence the grinding is first, followed by the roasting and finally the coffee characteristics. Significant difference was obtained between the three levels of roasting and grinding treated, while for the coffee factor the difference was only significant for two worked levels. The average yield of the selected treatments was 22.4%, which was higher than that of commercial coffees by approximately 6%. The cost of the production process presents savings related to shorter roasting times and higher extraction yields.

Keywords: Green coffee, pasilla, roasting, grinding, extraction, experiment design, factor, level, treatment, performance, sensory evaluation, cluster analysis.

INTRODUCCIÓN

Colombia ha sido reconocido como el tercer mayor exportador de café en el mundo¹, antecedido por Brasil, que a lo largo de los años se ha destacado como el mayor productor y exportador de café, y Vietnam, país que, solo hasta finales de la década de los 80 logró la expansión acelerada de plantaciones de café, desplazando a nuestro país hacia el tercer lugar en producción y exportación.

La producción nacional de café soluble en el año 2013 fue de 745.000 toneladas de las cuales el 70% corresponde a café atomizado, 26% a café liofilizado y 4% a extractos de café², este nivel de producción de café soluble, se considera bajo, con respecto a la producción nacional de café, sin embargo, últimamente, el café soluble ha incrementado su aceptación en los consumidores, respondiendo acertadamente a la tendencia de “premiumización” del mercado, dicha tendencia expresa la creciente demanda de productos de la más alta calidad que ofrezca a los consumidores experiencias únicas y diferenciadas.

Racafé & Cia, es una empresa colombiana dedicada a la comercialización y trilla de café a nivel nacional e internacional, actualmente opera con siete plantas trilladoras ubicadas en departamentos como Huila, Antioquia y Santander, en los cuales realiza el proceso de trilla y clasificación de café verde. El objetivo general de este proceso es obtener café verde que cumpla con los requerimientos establecidos en la normatividad colombiana y/o especificación del cliente a partir de café pergamino seco (CPS). Este proceso comprende cuatro etapas básicas que son: la trilla, clasificación por tamaño del grano, clasificación por densidad y la clasificación por colorimetría, (ver figura 1) proceso del cual se obtienen, a grandes rasgos, café excelso o de alta calidad y café de menor valor comercial o “pasillas”, éste último se comercializa mayoritariamente en el país en forma de “preparaciones” las cuales se diferencian entre sí, en la proporción de granos defectuosos que contengan.

El mayor demandante (para Racafé) de preparaciones, es Colcafé, empresa que produce el 51.3% del café tostado y molido y el 40.1% del café soluble que se comercializa en el país³; y que últimamente ha expresado a sus aliados comerciales, su interés por la búsqueda de alternativas que ayuden a aumentar el rendimiento en la operación de extracción para la producción de café soluble,

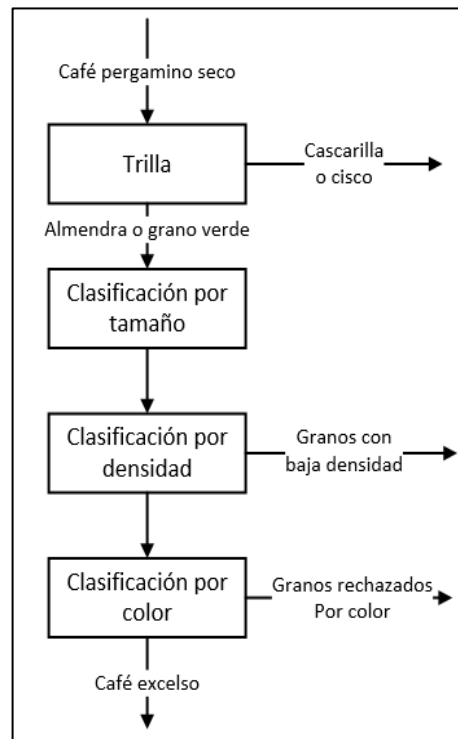
¹ REVISTA DINERO. ¿Colombia exporta café a los mayores consumidores del mundo? [Sitio WEB]. Bogotá D.C: Publicaciones semana S.A. [15, abril, 2019]. Disponible en: <http://www.dinero.com/economia/articulo/colombia-exporta-cafe-mayores-consumidores-del-mundo/210780>

² FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Cafés Solubles Evolucionan Hacia Segmento Premium. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: La entidad. [5, abril, 2019]. Disponible en: https://www.federaciondecafeteros.org/clientes/es/quienes_somos/119_estadisticas_historicas/

³ GRUPO NUTRESA. [sitio web]. Bogotá D.C.: Informe integrado 2017 [2-03-2019]. Disponible en: informe2017.gruponutresa.com/pdf/Informe_COMPLETO.pdf

situación sobre la cual radica el planteamiento del presente proyecto, que pretende evaluar la influencia de las características del café verde como materia prima y de las operaciones tostión y molienda sobre el rendimiento de extracción obtenido.

Figura 1. Etapas para la selección de café excelso para exportación.



Fuente: elaboración propia.

Varios autores han analizado la influencia del tipo de café, el grado de tostión y de molienda en el rendimiento de extracción y las propiedades del extracto obtenido, sin embargo, poco se ha trabajado con café de menor valor comercial, que es la materia prima, que por lo menos en Colombia, se usa mayoritariamente en la producción de café soluble. El presente trabajo parte de éste tipo de materia prima, y por medio de un diseño de experimentos por bloques completamente aleatorizados analiza la influencia del tipo de café, el tiempo de tostión y el grado de molienda sobre el rendimiento de extracción generado, además determina el costo del proceso a partir de los mejores resultados seleccionados mediante la evaluación conjunta de los resultados en rendimiento y calidad del extracto, establecida mediante evaluación sensorial en panel de catación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia de la materia prima, el tiempo de tuestión y el grado de molienda sobre el rendimiento del proceso de extracción para la producción de café soluble.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Definir los parámetros de densidad, tamaño y color del grano de café verde adecuados, de acuerdo al perfil sensorial, partiendo de los flujos de salida de café verde del proceso de trilla de la empresa Racafé.
2. Evaluar los tiempos de tuestión y los grados de molienda para la determinación del perfil sensorial de las muestras seleccionadas previamente.
3. Determinar el rendimiento y los costos del proceso de extracción de las muestras seleccionadas organolépticamente.

1. GENERALIDADES

El primer capítulo describe las etapas de transformación del fruto de café en café soluble, dentro del cual se explica el proceso de clasificación y trilla que se realiza en la planta trilladora de Racafé en Bogotá, también se exponen de forma breve algunas particularidades del análisis sensorial o “catación” como método de análisis de calidad en la industria del café.

1.1 EL CAFÉ

El árbol de café pertenece a la familia *Rubiaceae*, actualmente se reconocen alrededor de cincuenta especies diferentes, aunque sólo dos de ellas tienen importancia comercial, que son las especies *Coffea Arábica* y *Coffea Canephora*, las cuales se denominan comúnmente como ‘arábica’ y ‘robusta’. La planta se desarrolla entre los 1.200 y 1.800 metros de altura sobre el nivel del mar, con temperaturas templadas que oscilan entre los 17 y los 23°C y con precipitaciones cercanas a los 2.000 milímetros anuales, distribuidas a lo largo del año. Si bien estas condiciones son las más comunes, también es posible producir un café sobresaliente a alturas marginalmente superiores o con niveles o frecuencia de precipitación diferentes.⁴

El proceso de transformación del fruto de café en un producto industrializado como es el café soluble, requiere de varias etapas que se relacionan en la figura 2, el cual inicia con la cosecha y el beneficio del café, que son procesos puramente artesanales hasta la actualidad, por lo que se considera que el procesamiento industrial del café, inicia en la trilla y clasificación del grano.

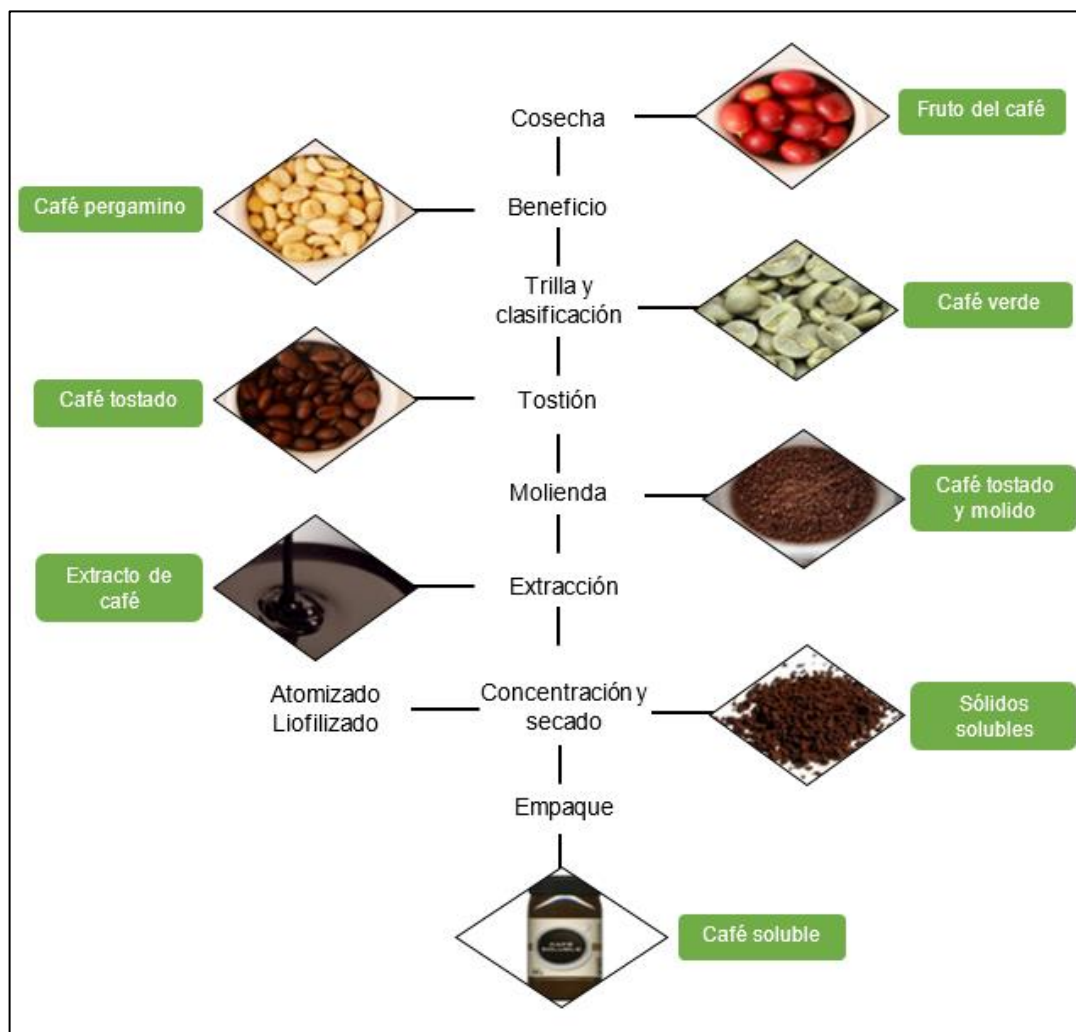
1.2 COSECHA Y BENEFICIO DEL CAFÉ

Los tiempos de cosecha están limitados principalmente por la ubicación geográfica específica de cada región cafetera colombiana, que determina entonces unas condiciones climáticas y fisiológicas particulares, por ejemplo, las zonas cafeteras centrales del país presentan periodos secos y lluviosos intercalados a lo largo de diferentes meses, lo que permite cosechar café fresco regularmente durante todo el año. En la mayoría de las regiones cafeteras del país existe un período de floración que va de enero a marzo, y otro que va de julio a septiembre. La cosecha principal en estas zonas se realiza entre septiembre y diciembre, y hay una cosecha secundaria entre abril y junio que se denomina “de mitaca”.⁵

⁴ FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. [Sitio web]. Bogotá D.C.: Café de Colombia, Nuestras regiones cafeteras. [20-07-2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la_tierra_del_cafe/regiones_cafeteras/

⁵ Ibid., p.1.

Figura 2. Proceso de producción de café soluble a partir del fruto de café.



Fuente: elaboración propia.

La segunda etapa consiste en el beneficio del café, donde el fruto de la planta del café es sometido a un proceso donde se retiran sus envolturas, se lava y se seca, obteniéndose como producto final el café comercial, también conocido como café pergamino.⁶ Actualmente este proceso se lleva a cabo *in situ* la finca de producción.

1.3 PROCESAMIENTO INDUSTRIAL PARA LA OBTENCIÓN DE CAFÉ SOLUBLE

⁶ CLARKE, R. J., MACRAE, R. Coffee chemistry. 2 Ed. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1985. 306 P. ISBN 139789401086936.

Para la obtención de café soluble, el grano de café verde se somete a un procesamiento físico, que incluye la trilla y clasificación y un proceso de transformación físico-química compuesto por operaciones de torrefacción o tostión, molienda, extracción, concentración y secado.

1.3.1 Trilla y clasificación del grano. La trilla busca separar la almendra de la cascarilla que la envuelve, esto se realiza en sistemas mecánicos, donde la acción combinada de presión y fricción rompe y fragmenta las envolturas de los granos, las cuales son evacuadas mediante el uso de corrientes de gases.⁷ Esta etapa también incluye la limpieza y clasificación, mediante la cual se separan los granos defectuosos lo que sirve para generar tuestes más homogéneos.⁸

Este proceso se lleva a cabo en las plantas trilladoras de Racafé, y el diagrama de bloques de dicho proceso se presenta en la figura 3 y se describe a continuación.

1.3.1.1 La trilla. Una vez el café pergamino seco (CPS) ingresa a la planta, se lleva a cabo un muestreo que consiste en chuzar aleatoriamente un porcentaje de aproximadamente el 10% de la carga, con esto, la muestra se lleva al laboratorio y se realiza un proceso de caracterización, mediante la percepción de sus propiedades organolépticas, así como la medición de humedad y el porcentaje de merma, con esto se define la aceptación o rechazo del lote de CPS y además los criterios para establecer un precio de compra. El café que se acepta, posteriormente es descargado y depositado en las bodegas; la trilladora de Racafé en Bogotá, sobre la cual se realizó el presente estudio, posee dos bodegas con capacidad de almacenamiento para 3000-4000 toneladas de CPS.

La cantidad de CPS que se alimentó a la trilladora durante el tiempo de muestreo fue de 107250 kg, el equipo trillador posee un rotor con una potencia de 80 hp, en esta operación el café pergamino es descascarado mediante fricción, produciéndose principalmente dos flujos salientes, la corriente 3 (86337 kg) que corresponde a café verde y que se alimenta al separador por tamaño, y la corriente 2 (20913 kg) que es un flujo de subproductos correspondientes a la cascarilla o también conocida como “cisco”, este se acumula y se almacena, para posteriormente ser vendido como fuente energética debido a su alta capacidad de combustión, que se estima en 4500 cal/°C g⁹. En esta operación también se retira

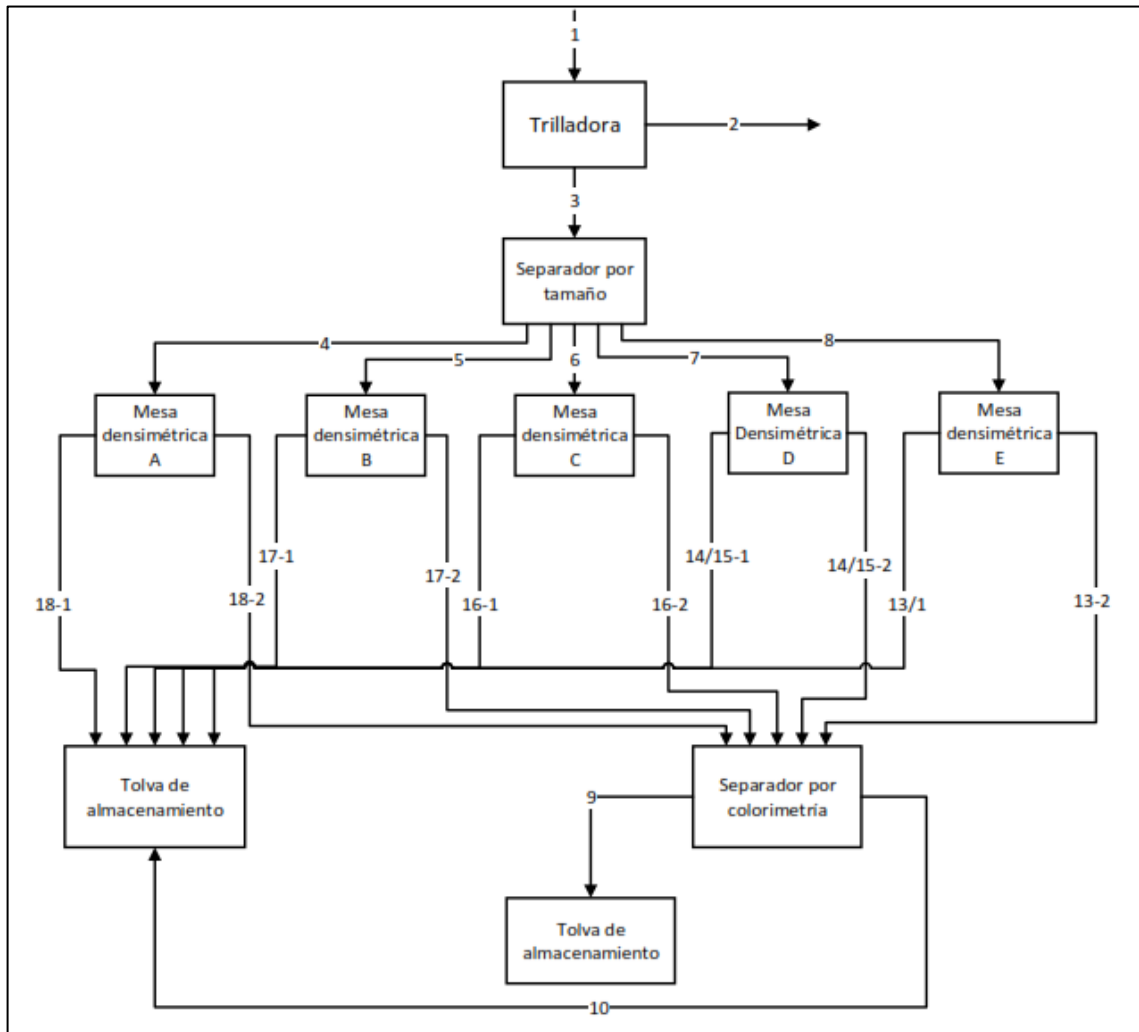
⁷ SWISSCONTACT. [sitio web]. Ecuador: Countries, Manual básico de buenas prácticas para el tostado del café. [15-07-2019]. Disponible en: https://www.swisscontact.org/fileadmin/user_upload/COUNTRIES/Ecuador/Documents/Content/ManualTuesteCafe.pdf

⁸ Ibid., p.13.

⁹ BARON PACHECO, Laura Johana. Evaluación de la cascarilla de café como materia adsorbente para la remoción de iones plomo Pb²⁺ presente en soluciones acuosas. [en línea]. Trabajo de grado. Universidad Libre, Bogotá D.C. 2014 [Consultado 2, marzo, 2019]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11234>

el material extraño que pueda venir con el café, tales como piedras, hojas, terrones, entre otros.

Figura 3. Diagrama de bloques del proceso de clasificación y trilla de la empresa Racafé.



Fuente: elaboración propia.

1.3.1.2 Clasificación por tamaño*. El café verde o descascarado, es transportado por medio de ductos aspiradores de forma continua a un separador de tamaño de dimensiones 2x4 m, que consiste en un sistema de tamices de placa perforada con orificios redondos, los platos usados por Racafé que se disponen en forma descendente son el número 18, 17, 16, 15, 14 y 13 cuyos

* La clasificación por tamaño se realiza de acuerdo al diámetro que comúnmente se conoce como "cintura" del grano, es decir el diámetro del agujero circular más pequeño, a través del cual puede pasar el grano de café.

diámetros de orificio corresponden a $\frac{18}{64}, \frac{17}{64}, \frac{16}{64}, \frac{15}{64}, \frac{14}{64}$ y $\frac{13}{64}$ de pulgada respectivamente. También se opera con una superficie de fondo, en donde se obtienen los granos con tamaño menor al de la malla 13, así como material relacionado con el cultivo del café como piedras, partículas de arena, etc. De acuerdo a los promedios estadísticos suministrados por la empresa, en esta operación se obtiene la distribución de granos que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Distribución de café verde en el clasificador por tamaño del proceso de Racafé.

# de malla	% retenido
18	33
17	27
16	20
15	11
14	4
13	1
Fondos	4

Fuente: elaboración propia, con base en: RACAFÉ & CIA.

Sin embargo, esta distribución puede variar de acuerdo con la calidad del café procesado, y de esta forma los flujos de salida de esta operación pueden mezclarse para trabajarse conjuntamente en las mesas densimétricas que son la etapa posterior. Para el diagrama presentado en la figura 4, se obtienen cinco corrientes de salida, la corriente 7 (12868 kg), donde se unieron los flujos retenidos en las mallas 14/15 debido a que de ésta manera operó la planta durante el tiempo de muestreo; las corrientes 4 (28525 kg), 5 (23476 kg) y 6 (17561 kg) corresponden al café retenido en el tamiz 18, 17, 16, y por último la corriente 8 (3904 kg) que corresponde al café retenido en la malla 13 y en el fondo.

La finalidad de la clasificación por tamaño reside en asegurar una correcta operación de la etapa posterior, ya que dos esferas con diámetros diferentes pueden, de hecho, tener la misma velocidad de sedimentación cuando su densidad es diferente, lo que no permitiría ninguna separación en las mesas densimétricas.¹⁰

1.3.1.3 Separación densimétrica. Las corrientes que salen del separador por tamaño, se transportan a través de ductos y se alimentan a mesas densimétricas de forma separada (ver ilustración 1), la operación de cada mesa densimétrica, se basa en un principio de separación neumática, que, mediante el uso de una

¹⁰ CLARKE, R. J., MACRAE, R. Coffee chemistry. 2 Ed. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1985. 306 P. ISBN 139789401086936.

corriente de aire ascendente creada por un ventilador dentro de una cámara horizontal con un ángulo de inclinación ajustable, que genera además vibraciones y movimientos horizontales, permite separar los granos de café en dos corrientes, café de alta densidad o “cabezas” y café de baja densidad o “colas” que se distribuye para cada mesa densimétrica de acuerdo al balance de materia presentado en la tabla 2. Después de esta separación, todas las cabezas se alimentan a la siguiente etapa, aunque de acuerdo al plan de producción de la empresa, se pueden mezclar algunas de estas corrientes; mientras que las colas no se llevan a la siguiente etapa, debido a que ya no se consideran aptas para exportación como café excelso, entonces se transportan mediante ductos a las tolvas de almacenamiento. Actualmente la empresa no cuenta con un sistema de almacenamiento de estas corrientes, sino que estos se van depositando en las tolvas, a medida que éstas se van llenando.

Ilustración 1. Mesas densimétricas usada en el proceso de Racafé.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Balance de materia de corrientes con alta y baja densidad.

Corriente	Masa (kg)
18-1	2 993
18-2	25 528
17-1	1 422
17-2	22 052
16-1	1 040
16-2	16 520
14/15-1	981
14/15-2	11 887
13-1	551
13-2	3 353

Fuente: elaboración propia, con base en: RACAFÉ & CIA.

1.3.1.4 Separación colorimétrica. A esta etapa se alimentan las cabezas de las mesas densimétricas como se mencionó anteriormente. Actualmente la empresa cuenta con dos tipos de tecnologías, que se diferencian básicamente en su capacidad; sin embargo, en ambas los granos alimentados se distribuyen por medio de una cinta y pasan uno a uno por los “ojos electrónicos” del separador, el cual controla un eyector mecánico para la separación de los granos según sea necesario, estos clasificadores utilizan luz bicromática y son ajustados para separar los granos “negros”, “rojos” y “amarillos”, los cuales se consideran defectuosos. Este ajuste depende de la cantidad y la importancia de los defectos en el café, pero también de la rentabilidad de la operación, debido a que, claramente, las pérdidas por remoción deben ser compensadas por el valor incremental del producto clasificado.¹¹

Los granos rechazados por su color, se denominan “rechazos colorimétricos” (corriente 10) y son transportados y almacenados al igual que las colas de la etapa previa; mientras el café aceptado corresponde a café excelso (corriente 9), listo para ser empacado en sacos rotulados y comercializado, del cual alrededor del 90% se comercializa en el exterior.

1.3.2 La tostión. La tostión es un proceso de transferencia de calor dependiente del tiempo y la temperatura, mediante el cual se inducen cambios químicos en el grano de café, aunque se evidencian también cambios físicos en la estructura del grano. Este proceso, normalmente se lleva a cabo en condiciones atmosféricas con gases de combustión y aire caliente en exceso como agente de calentamiento primario, aunque el calor también puede proporcionarse por contacto con superficies metálicas calientes, principalmente se hace como un suplemento a la

¹¹ Ibid., p. 31.

convección de los gases.¹² Este proceso se desarrolla en cuatro etapas: secado, calentamiento, pirólisis y enfriamiento.

1.3.2.1 Secado. El proceso se inicia con el secado del grano, por lo tanto, esta etapa es función de la humedad inicial del grano verde,¹³ la cual se busca eliminar mediante la evaporación del agua libre presente en el café, la que, debido a su gran actividad química, puede interferir en las reacciones que se desarrollan en el grano. Con el fin de que efectivamente se evapore el agua libre y no otros compuestos presentes en el grano, es importante que esta etapa del proceso se lleve hasta temperaturas entre 110-120°C. El indicativo del avance de esta parte del proceso, es la salida de gases azulosos (vapor de agua) y que el grano se va tornando a tonos blanqueados.

1.3.2.2 Calentamiento. En esta etapa, básicamente se busca aumentar rápidamente la temperatura del proceso, es decir, aumentar aceleradamente la transferencia de calor hacia el grano de café, lo cual, en tostadores de tambor giratorio de laboratorio, se realiza mediante el aumento de la llama, que corresponde a la principal fuente de calor en estos equipos. El objetivo de esta fase, consiste en incrementar la energía interna del grano con el fin de que este alcance la temperatura adecuada para el desarrollo de las reacciones químicas responsables del sabor y aroma de café tostado. En esta fase, las características del grano que se consideran claves son la densidad y el tamaño del grano.

1.3.2.3 Pirólisis. Esta etapa, inicia a temperaturas superiores a los 160°C de acuerdo a Illy & Viani (1995), sin embargo, otros autores afirman que se lleva a cabo a temperaturas alrededor de los 200°C.¹⁴ En esta fase, se presentan las reacciones químicas mediante las cuales se desarrollan los compuestos responsables del sabor y aroma del café tostado. De forma general, dichas reacciones afectan significativamente el contenido de glucosa, ácidos clorogénicos y proteína del grano.¹⁵ Se presentan principalmente dos indicativos de su desarrollo, entre los cuales están la expansión de la estructura física del grano debido a la creación de tensiones mecánicas y térmicas que se desplazan hacia el centro del grano, la cual genera sonidos de craqueado,¹⁶ similares al de una crispeta, además del cambio de coloración del grano que se hace evidente.

1.3.2.4 Enfriamiento. En esta etapa del proceso se busca suspender rápidamente las reacciones exotérmicas reduciendo la temperatura del café por

¹² Ibid., p. 74.

¹³ CLARKE, R. J., MACRAE, R. Coffee chemistry. 2 Ed. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1985. 306 P. ISBN 139789401086936.

¹⁴ CLARKE, R. & MACRAE, R. Coffee Technology. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1989. 321 p. ISBN 139789401080286

¹⁵ Ibid., p. 179.

¹⁶ ILLY, Andrea & VIANI, Rinantonio. Espresso Coffee. The science of quality. Reino unido: Elseviers Academic Press, 2005. 398 p. ISBN 0123703719

debajo de 150°C, debido a la naturaleza exotérmica de éstas.¹⁷ Para realizarlo, actualmente se utilizan dos técnicas, mediante el uso de corrientes de aire, la cual presenta desventajas como la emisión de gases contaminantes y el riesgo de posibles defectos en el empaque, debido a que el dióxido de carbono liberado en las reacciones químicas, es atrapado dentro de los granos y posteriormente se libera lentamente en el empaque causando daños en estos. A causa de esto, el enfriamiento con agua o “Quenching” es la técnica más ampliamente difundida actualmente en las industrias, esta se realiza mediante una fina aspersión de agua fría y pura sobre los granos o sobre la superficie del equipo tostador.¹⁸

Es importante aclarar, que los cambios físicos que se dan en el grano son consecuencia de las interacciones químicas desarrolladas internamente en este, mas no son la razón de ser del proceso de tuestión.

Industrialmente, después del enfriamiento se hace necesario dar al café un tiempo de reposo para continuar con la operación de extracción, debido a que en las reacciones de pirólisis se produce CO₂, que es atrapado dentro de los granos después del quenching, y por lo tanto, debe ser liberado para que no interfiera en el proceso de extracción.¹⁹

1.3.3 Curva de tuestión. Durante el proceso de tueste a nivel industrial se busca la manera de controlar principalmente dos variables: la temperatura y el tiempo. De acuerdo a estas dos variables se pueden obtener varios tipos de tueste con el mismo café, además de graficar las curvas de tueste que nos pueden predecir las cualidades de un café en la taza.²⁰

La figura 4 presenta el perfil de tuestión típico utilizado en la industria donde se muestran las cuatro etapas de desarrollo del grano de café tostado que se mencionaron. Es importante aclarar, que la temperatura graficada corresponde a la temperatura del aire caliente dentro del tostador, la cual es medida mediante el uso de termocuplas integradas en el tambor tostador usado en este trabajo.

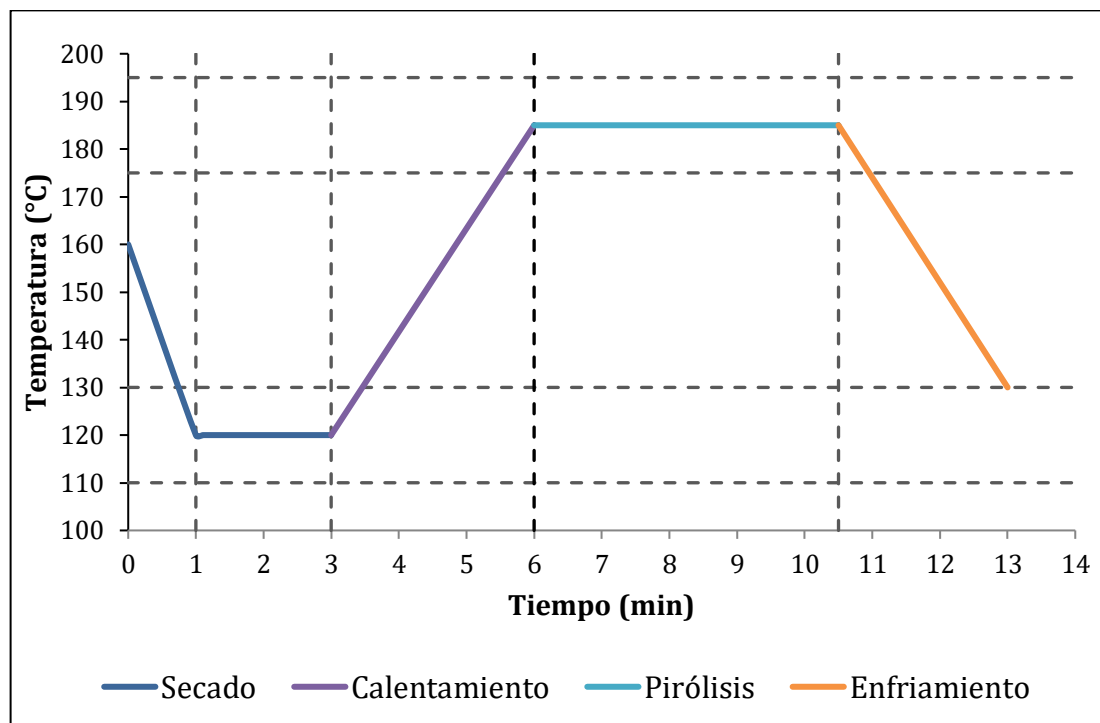
¹⁷ Ibid., p.183.

¹⁸ CLARKE, R. & MACRAE, R. Coffee Technology. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1989. Citado por LÓPEZ CARMONA, Paula Andrea. Mejoramiento del rendimiento en el proceso de extracción de café de la empresa Decafé S.A. [en línea]. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Manizales: 2003. [7-04-2019]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1153/1/paulaandrealopezcarmona.2003.pdf>. p. 13.

¹⁹ Ibid., p. 13.

²⁰ SWISSCONTACT. [sitio web]. Ecuador: Countries, Manual básico de buenas prácticas para el tostado del café. [15-07-2019]. Disponible en: https://www.swisscontact.org/fileadmin/user_upload/COUNTRIES/Ecuador/Documents/Content/ManualTuesteCafe.pdf

Figura 4. Comportamiento del perfil de tuestión típico usado en la industria.



Fuente: elaboración propia, con base en: RACAFÉ & CIA.

1.3.4 Molienda²¹. Después de la tuestión, los granos completos requieren una reducción de tamaño, mediante una acción de compresión o fricción, para proveer al café molido con partículas de un tamaño y forma adecuados, para el subsiguiente proceso de obtención del extracto.

El principal objetivo de la molienda en el café, es incrementar la superficie específica de extracción, o más bien, aumentar el tamaño de la interfase entre el agua y el sólido, así como facilitar la transferencia de sustancias solubles dentro de la bebida; el grado de molienda es una variable fundamental para el proceso posterior de extracción de sólidos solubles del grano, éste puede definirse en términos de molienda fina, media y gruesa.

En la molienda fina, las partículas de café tienen una estructura débil y poco resistente a la compresión, bajo las condiciones de flujo de la lixiviación; son menos elásticas y por ende se compactan fácilmente; causan presiones diferenciales progresivamente mayores dificultando el flujo para propósitos

²¹ CLARKE, R. & MACRAE, R. Coffee Technology. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1989. Citado por LÓPEZ CARMONA, Paula Andrea. Mejoramiento del rendimiento en el proceso de extracción de café de la empresa Decafé S.A. [en línea]. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Manizales: 2003. [7-04-2019]. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1153/1/paulaandrealopezcarmona.2003.pdf>. p. 13. p. 16.

prácticos. Por esto, una molienda fina en un lecho comprimido puede causar “acalanamiento”, lo que disminuye el rendimiento del proceso y por ende reduce la concentración de sólidos solubles en el lixiviado.

En el molido grueso, los granos de café pueden ser lixiviados pero el sabor de la bebida no es agradable, la extracción no presenta problemas de caída de presión, pues ofrece menos resistencia al flujo y menor rendimiento.

1.3.5 Extracción²². Después de la tostión y la molienda, la extracción es la operación clave en la manufactura a gran escala del café instantáneo, ésta se puede definir como la operación donde se usa agua líquida a elevadas temperaturas como solvente para mojar el café tostado y molido, con el fin de disolver los compuestos químicos responsables del aroma y el sabor, bajo esta definición se puede decir que el proceso de extracción de café corresponde a una lixiviación donde el solvente es agua líquida; el proceso se lleva a cabo en tres fases, que son:

1.3.5.1 Humectación. El gas que se ha liberado durante la tostión, vuelve el grano poroso, tal que inicialmente las partículas se saturan en sus intersticios con el agua caliente. Las partículas absorben agua en una cantidad igual al doble de su peso. La estructura fibrosa del grano lo convierte en un secante que absorbe el agua y ayuda a la posterior extracción de los compuestos solubles.

1.3.5.2 Extracción de solubles. Los solubles en el café se disuelven en el agua absorbida, provocando un aumento rápido de la concentración, creando un gradiente de transferencia de masa; a medida que este gradiente es más grande, mayor será el rendimiento en la extracción.

1.3.5.3 Hidrólisis. El café torrefactado contiene sólo del 20 al 30% de sólidos solubles extraíbles a temperatura normal de ebullición. Si se aplican condiciones de alta presión y temperatura, dependiendo del tipo de café y del grado de tostación se puede obtener un mayor contenido de sólidos solubles, debido al rompimiento (hidrólisis) y solubilización de las grandes moléculas de carbohidratos insolubles, que dan moléculas más pequeñas solubles en agua.

El sistema de extracción más comúnmente utilizado es la percolación por baterías, el café tostado y molido es mantenido en un lecho estático en una columna vertical con separación interna de líquido de una columna a la próxima. El flujo de agua al café tostado es en contracorriente; la alimentación es continua a la columna más agotada de café, aunque en la columna fresca es intermitente.

El número de columnas de una batería está entre 5 y 8. A nivel industrial, son usadas altas alimentaciones de agua a temperaturas por encima de 180°C

²² Ibid., p. 17-18.

cuando, por pérdidas naturales de calor en la columna, la temperatura del líquido y del molido en cada columna caerá progresivamente hasta que el líquido en contacto con el café fresco, esté alrededor de los 100°C.

El proceso de extracción involucra varios parámetros fundamentales como son: la calidad del café verde, el equipo y grado de tostación, el enfriamiento, la molienda, la carga, el tiempo de inundación, la calidad del agua de extracción, el perfil de temperatura, la caída de presión, el tiempo de ciclo y la cantidad de extracto retirado por ciclo.

1.3.6 Secado.²³ Otra operación necesaria en la producción de café soluble luego de obtener el extracto de café es el secado. La forma como se seca el extracto para obtener finalmente el café soluble es crucial para evitar la pérdida de los aromas altamente volátiles. En la actualidad, existen dos formas para eliminar el agua remanente en los extractos: el secado por atomización, también conocido como procesos "spray dried" y el secado por liofilización o también llamado freeze dried. Aunque los dos procesos son naturales, es decir se realizan sin ningún tipo de aditivos o material diferente al extracto, su impacto en la calidad de la bebida es muy diferente, en la medida en que el liofilizado produce una calidad superior, aunque generalmente a un costo mayor.

1.3.6.1 Secado por atomización o spry dried. Para retirar el agua del extracto, en este proceso se genera la formación de una nube de gotas muy pequeñas, con una alta superficie de transferencia de calor, que permite evaporar el agua mediante aplicación de aire caliente. Esta labor se realiza a temperaturas entre 40°C y 50°C, y a presiones menores que la atmosférica. El extracto entonces es atomizado en una torre alta, y para el momento en que llega al fondo de la misma se ha evaporado casi toda el agua y sólo queda el polvo de café soluble.

1.3.6.2 Secado por liofilización o freeze dried. Esta consiste en congelar el extracto de café a temperaturas muy frías del orden de -50°C, evitando así la pérdida de aromas y de atributos de la bebida que son muy valorados. Al ser sometido a un vacío profundo, de menos de una milésima de la presión atmosférica, se posibilita con una adición marginal de calor que el agua remanente en el extracto congelado pase directamente del estado sólido (hielo) al gaseoso (vapor), proceso conocido como sublimación. El hecho de que el producto permanezca a temperaturas muy bajas y sin contacto con aire caliente (está al vacío) permite que los delicados aromas permanezcan en los granos de café liofilizado, generando así una bebida de excelentes características.

²³ FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Cafés de Colombia. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: La entidad. [20, abril, 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/industrializacion/produccion_de_cafe_soluble//

1.4 ANÁLISIS SENSORIAL O CATACIÓN DEL CAFÉ

El análisis sensorial juega un papel importante sobre todo en la industria alimenticia, ya que este se realiza de forma constante como análisis de calidad completamente válido para todo tipo de alimentos, este se realiza convencionalmente mediante la capacitación de paneles sensoriales que convierten al catador en instrumentos analíticos, para evaluar y analizar la calidad del producto, obteniéndose conceptos de aprobación o rechazo, o la definición del producto en términos de los atributos que éste reconoce a partir de su experiencia sensorial. Además de esto, el análisis sensorial también es usado en la industria alimenticia con el objetivo de establecer escalas numéricas que aumenten la facilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos por el panel de catación; Es de vital importancia que el análisis sensorial sea fiable, estable y aplicado con responsabilidad ya que este proceso incide directamente en la reacción de compra y demanda del consumidor.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

El segundo capítulo corresponde al procedimiento que permite lograr el cumplimiento del primer objetivo del trabajo que corresponde a definir los parámetros de densidad, tamaño y color del grano de café verde adecuados, de acuerdo al perfil sensorial, partiendo de los flujos de salida de café verde del proceso de trilla de la empresa Racafé. Para lo cual se realizó la medición de las variables críticas de café verde (densidad, tamaño de grano, color, humedad y calificación sensorial) que presentan actualmente dichos flujos, a partir de estos resultados, se propone una agrupación de flujos que presentan resultados estadísticamente similares mediante la aplicación de un análisis cluster usada con un objetivo similar por Angeloni et. al.

2.2 METODOLOGÍA

2.2.1 Localización. La trilladora objeto del presente trabajo, correspondió a la trilladora de Racafé en Bogotá, ubicada en la cll 20 #68c -16. La cual tiene una producción mensual estimada de 15000 sacos de café verde, cada uno de 70 kg, para lo cual se requieren aproximadamente 1500 ton de café pergamino seco al mes.

2.2.2 Muestreo. Inicialmente se establecieron las corrientes de interés en el estudio, estos corresponden a las colas salientes de las mesas densimétricas y a los rechazos colorimétricos. La tabla 3 muestra la codificación que se usó en el trabajo para designar cada una de las muestras y el punto donde se realizó la toma de la muestra, esta descripción corresponde la denominación de corrientes usada en la figura 3, la cual se presentó en el numeral 1.3.1. Es importante, mencionar que el muestreo se realizó sobre la línea de producción, mas no en el almacenamiento posterior al procesamiento, debido a que la empresa actualmente no cuenta con un sistema de almacenamiento organizado.

Tabla 3. Codificación de muestras y puntos de muestreo.

Denominación de la muestra compuesta	Corriente muestreada
M-13	Corriente 13-1 (Colas de la malla 13 y los fondos)
M-14/15	Corriente 14/15-1 (Colas de las mallas 14 y 15)
M-16	Corriente 16-1 (Colas de la malla 16)
M-17	Corriente 17-1 (Colas de la malla 17)
M-18	Corriente 18-1 (Colas de la malla 18)
M-RC	Rechazos colorimétricos, corriente 11.

Fuente: elaboración propia.

Se realizó un plan de muestreo compuesto, el cual se describe a continuación, éste se realizó con el objetivo de obtener muestras representativas del proceso de Racafé, esto debido a que al ser el café un producto natural, presenta una gran variabilidad en sus características debido a varios efectos que incluyen principalmente factores climáticos y de técnicas de tratamiento pos-cosecha en las propias fincas de producción.

2.2.2.1 Determinación del tamaño de muestra. Para cada una de las muestras planteadas en la tabla 3, se determinó el tamaño de muestra mediante el desarrollo de una prueba piloto, ésta consistió en la toma de muestras de cada uno de los flujos de interés durante un día de producción de la planta trilladora Bachué. Este procedimiento se planteó con la intención de analizar los alcances y las dificultades que se pudieran presentar en el desarrollo del muestreo compuesto, sin embargo, el mayor objetivo de esta prueba piloto fue analizar la variabilidad que presentan los flujos de interés del proceso, con el fin de determinar un tamaño de muestra representativo estadísticamente.

Se determinaron los valores humedad y densidad de las muestras tomadas, debido a que estas variables se definieron como variables críticas del proceso, de acuerdo a indicaciones previas del asesor del proyecto en Racafé. Con la varianza obtenida para dichas variables, se calculó el tamaño de muestra compuesta por cada corriente de interés de acuerdo a la ecuación 1, variando el nivel de confianza (n_c) en tres valores 90%, 95% y 99%. Para estos cálculos, se asumió normalidad en los datos y un error de muestreo igual al 10 %, debido a que este valor se usa ampliamente en la bibliografía como el error admisible en la determinación del tamaño de muestra. Los tamaños de muestra calculados se presentan en la tabla 4.

Ecuación 1. Ecuación para la determinación del tamaño de muestra.

$$n_h = \frac{Z_{\alpha/2}^2 * \sigma^2}{e^2}$$

Fuente: SÄRNDAL, C. E. et. Al. Model assisted survey sampling. Nueva York: Springer Science & Business Media, 1992. 696 p. ISBN 9780378406206

Donde, n_h corresponde al tamaño de muestra calculado para la muestra compuesta h (g), $Z_{\alpha/2}$ es el valor del cuantil de la normal, σ^2 es la varianza obtenida para cada variable crítica y e corresponde al error establecido en su valor decimal. Para la determinación del tamaño de muestra en gramos, el valor obtenido mediante la ecuación 1, se relacionó con la mínima cantidad de muestra compuesta requerida para los análisis del presente trabajo, la cual se estimó

previamente en 2000 gramos con base en la determinación de los análisis destructivos y no destructivos que se requieren.

Tabla 4. Tamaños de muestra compuesta calculados en la prueba piloto para cada variable en gramos.

Densidad							
E	n _C	n ₁₃	n _{14/15}	n ₁₆	n ₁₇	n ₁₈	n _{RC}
10%	99%	206,0	616,5	416,0	6 618,0	694,0	600,0
10%	95%	120,0	356,7	242,0	3 832,0	402,0	340,0
10%	90%	84,0	252,1	170,0	2 698,0	282,0	240,0
Humedad							
E	n _C	n ₁₃	n _{14/15}	n ₁₆	n ₁₇	n ₁₈	n _{RC}
10%	99%	4 424,0	26 244,1	17 694,0	4 424,0	30 962,0	13 260,0
10%	95%	2 560,0	15 194,3	10 244,0	2 560,0	17 926,0	7 680,0
10%	90%	1 804,0	10 702,3	7 214,0	1 804,0	12 626,0	5 420,0

Fuente: elaboración propia.

A partir de los valores calculados, se seleccionó el tamaño de muestra óptimo para cada corriente, con base en dos criterios de selección, el primero de estos fue la variabilidad obtenida para cada variable, calculada como la varianza, a un nivel de confianza y error determinados, a partir de este primer criterio, se encontró que la mayor variabilidad se obtuvo para la humedad, hecho que se traduce en tamaños de muestra más grandes. Una vez establecido esto, se usó un segundo criterio que se basó en la facilidad de transporte y manejo de las cantidades para la realización de los experimentos, con la aplicación del segundo criterio, se decidió trabajar con un n_C de 95% ya que las cantidades de muestra para cada corriente no son exageradas y permiten lograr un grado de certeza aceptable en el muestreo y desarrollo del trabajo, con lo cual se seleccionaron finalmente, los tamaños de muestra que se presentan en la tabla 5, cabe aclarar que estos tamaños corresponden a la cantidad de muestra COMPUESTA que se debe recolectar para cada corriente de interés planteada en la tabla 3.

Tabla 5. Tamaños de muestra seleccionados para el muestreo compuesto.

Muestra	Tamaño de muestra (kg)
M-13	2,560
M-14/15	15,194
M-16	10,244
M-17	2,560
M-18	17,926
M-RC	7,680

Fuente: elaboración propia.

2.2.2.2 Conformación de las muestras compuestas. Una vez establecido el tamaño de muestra representativo para cada muestra compuesta, se llevó a cabo la recolección de muestras puntuales* durante una semana de producción de la planta trilladora de Racafé en Bogotá, tiempo en el cual se obtuvo un total de 9 muestras puntuales por cada corriente muestreada. Es importante mencionar que en el momento de recolectar la muestra puntual se registró el tiempo de la recolección, esto con el objetivo de calcular el flujo, como la relación masa/tiempo que presentaba la corriente muestreada en ese momento preciso. El flujo medido se ponderó de acuerdo a la ecuación 2, con el fin de incluir en el muestreo la variación en la distribución del café en cada una de las mallas con respecto al tiempo.

Ecuación 2. Ponderación del flujo medido en la recolección de muestras puntuales.

$$f'_{ih} = \frac{f_{ih}}{\sum f_h}$$

Fuente: AGUAMARKET. Muestra compuesta. [Sitio WEB]. Santiago de Chile: La entidad. [12 abril, 2019]. Disponible en: <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=2389&termino=muestra+compuesta.%20Updated>

Donde, f'_{ih} es el flujo ponderado para la muestra puntual i tomada de la corriente h , y f_{ih} corresponde al flujo puntual de la muestra i tomada de la corriente h (kg/min). El flujo ponderado se aplicó al tamaño de muestra establecido en la tabla 5, de acuerdo a la ecuación 3, con el fin de determinar la cantidad que se debía tomar de cada muestra puntual para obtener dicho tamaño de muestra compuesta.

Ecuación 3. Cálculo de la cantidad de muestra puntual que se debe tomar para la conformación de la muestra compuesta.

$$m_{ih} = f'_{ih} n_h$$

Fuente: AGUAMARKET. Muestra compuesta. [Sitio WEB]. Santiago de Chile: La entidad. [12 abril, 2019]. Disponible en: <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=2389&termino=muestra+compuesta.%20Updated>

* Muestra tomada en una hora y flujo de interés específico, de acuerdo al cronograma de recolección de toma de muestras establecido.

Donde, m_{ih} corresponde a la masa a tomar de la muestra puntual i para formar la muestra compuesta de la corriente h (kg) y n_h al tamaño de muestra establecido en la tabla 5 (kg).

A partir del procedimiento descrito se conformaron las muestras compuestas, con las cuales se desarrollará la fase experimental del trabajo, la tabla 6 presenta la composición de cada muestra compuesta con respecto a las muestras puntuales recolectadas.

Tabla 6. Composición porcentual de cada muestra compuesta con respecto a las muestras puntuales recolectadas.

Muestra puntual (i)	Composición de cada muestra compuesta (%)					
	M-13	M-14/15	M-16	M-17	M-18	M-RC
1	11,9	13,0	13,0	11,4	11,0	6,6
2	3,5	8,6	16,7	9,7	11,6	6,8
3	11,5	7,1	13,7	9,8	16,8	4,6
4	10,3	14,6	13,1	9,3	15,5	7,1
5	10,1	9,3	12,8	12,9	8,0	12,5
6	10,2	9,2	10,1	13,7	4,9	9,3
7	11,3	8,9	10,9	13,5	5,1	0,0
8	15,8	15,7	4,9	8,7	16,4	0,0
9	15,4	13,6	4,9	10,9	10,6	53,2

Fuente: elaboración propia.

El procedimiento de conformación incluyó una etapa de homogenización, que se realizó con el uso de un homogenizador de café de división cónica descrito en la NTC 2323 (Café pergamino, verde y semitostado en sacos. Muestreo), una vez conformadas las muestras compuestas, éstas se empacaron para su conservación en bolsas de barrera con sello hermético y válvula de desgasificación, como se muestra en la ilustración 2.

Ilustración 2. Conservación y almacenamiento de las muestras de café verde.



Fuente: elaboración propia.

2.2.3 Caracterización de muestras compuestas de café verde. Este procedimiento se realizó de acuerdo a lo establecido por la NTC 5938 (Café verde para uso industrial. Parte 1. Café arábica), para lo cual se midieron los valores de densidad, tamaño de grano, humedad, % de ripio, % de materia extraña e impurezas y % de defectos mayores de las muestras compuestas, se realizaron 10 réplicas, para la determinación de cada una de las propiedades mencionadas.

2.2.3.1 Densidad. La densidad de cada una de las muestras de café verde, corresponde a la densidad a granel, esto debido a que en el proceso de la empresa no se lleva a cabo ningún proceso de compactación, sino que por el contrario todos los flujos se llevan a cabo por gravedad. Ésta se midió como se establece en la NTC 4607(Café verde y tostado. Determinación de la densidad a granel por caída libre de los granos enteros (método de rutina)). La ilustración 3 muestra el equipo usado para esta medición.

Ilustración 3. Medidor de densidad de café a granel.



Fuente: elaboración propia.

2.2.3.2 Humedad. La determinación de la humedad se realizó mediante el uso del medidor de humedad para granos y semillas marca Kett PM450 proporcionado por la empresa (ver ilustración 4), como % en base húmeda (BH), y basado en el principio de la constante dieléctrica, con calibración de fábrica para café verde.

Ilustración 4. Medidor de humedad para granos.



Fuente: elaboración propia.

2.2.3.3 Tamaño de grano. Debido a que la clasificación por tamaño es realizada durante el proceso industrial de clasificación de la empresa, en base a la preparación con la que se debe cumplir de acuerdo al plan de producción de la empresa y de la caracterización del CPS que se procesa, comúnmente se mezclan algunos flujos retenidos en mallas diferentes antes de alimentarse a las mesas densimétricas, como la malla 14 y 15 o la malla 14 y 13, lo que produce que en las muestras tomadas no haya un tamaño de grano homogéneo. Por lo tanto, se realizó determinó la distribución de tamaño de las muestras tomadas, mediante tamizado de cada muestra compuesta como lo describe la NTC 5248 (Café verde. Análisis del tamaño. Tamizado manual y mecánico).

2.2.3.4 Ripio. La determinación del contenido de ripio se realizó mediante el tamizado de la muestra en el tamiz 12 durante 2 minutos; se finalizó tomando la fracción de muestra recolectada en el fondo, se pesó y se reportó como porcentaje respecto a la cantidad de muestra tamizada. Ésta se midió como se establece en la NTC 5938 (ver ilustración 5a).

2.2.3.5 Materia extraña e impurezas. La determinación de la cantidad de materia extraña e impurezas se realizó considerando impureza todo material diferente a los granos de café verde pero que son propios del procesamiento del café, y la materia extraña todo material mineral, animal o vegetal que no es propio del fruto o cereza del café (ver anexo A). El proceso se realizó de acuerdo a la norma mencionada, con una modificación en la presentación de los datos ya que los dos porcentajes se reportaron en uno solo debido a que este no era representativo por separado (ver ilustración 5b).

2.2.3.6 Defectos mayores. La determinación de porcentaje de defectos mayores se realizó con un experto en análisis de calidad de café de la empresa Racafé donde se tuvo en cuenta la carta de defectos de la Federación Nacional de Cafeteros (ver anexo B) en el cual se incluyen como defectos mayores, los granos negros, granos vinagres y granos cardenillos y se reportó como porcentaje de la muestra analizada según lo indica la NTC 5938 (ver ilustración 5b).

Ilustración 5. Determinación de (a) ripio y (b) defectos y materia extraña.



Fuente: elaboración propia.

2.2.3.7 Color del grano. Esta clasificación está implícita en el proceso de Racafé, como se describió en el numeral 1.3.1.3, donde se obtiene el café sano (excelso) y los rechazos colorimétricos, estos últimos se muestrearon individualmente en la corriente 9, con el fin de incluir el parámetro de colorimetría de los granos en el análisis.

2.2.3.8 Prueba de taza. La evaluación sensorial se realizó de acuerdo al procedimiento establecido por la empresa Racafé y sujeto a la NTC 3566 (Café verde. Preparación de muestras para uso en análisis sensorial). De acuerdo al cual, cada muestra se tostó y se molió hasta un grado estándar (medio), posteriormente, se prepararon 5 tazas con 10 g de la muestra tostada y molida, y se disolvieron en 200 ml de agua a 92°C. Las bebidas de café se dejaron en reposo durante 5 minutos para permitir que se extrajera la bebida, en la ilustración 6 se muestra una mesa de catación preparada.

Ilustración 6. Mesa de catación preparada con las seis muestras compuestas de café tostado y molido.



Fuente: elaboración propia.

El panel de catación estuvo conformado por tres catadores expertos del área de calidad de la empresa Racafé, donde cada uno diligenció el formato de catación estipulado por la empresa y el cual se presenta en el anexo C. Dicho formato, considera para cada muestra los parámetros que se establecen en el cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros de calificación sensorial de las muestras.

Atributo	Calificación					
	5	4	3	2	1	0
<i>Aroma</i>	Sobresaliente	Superior	Estándar	Aceptable	Inferior	Defectuoso
<i>Sabor</i>	Sobresaliente	Superior	Estándar	Aceptable	Inferior	Defectuoso
<i>Acidez</i>	Brillante	Jugosa	Media	Astringente	Seca	Baja
<i>Cuerpo</i>	Estructurado	Balanceado	Medio	Débil	Turbio	Plano
<i>Residual</i>	Sobresaliente	Superior	Estándar	Aceptable	Inferior	Defectuoso
<i>Impresión global</i>	Sobresaliente	Superior	Estándar	Aceptable	Inferior	Defectuoso

Fuente: elaboración propia, con base en: RACAFÉ & CIA.

Del procedimiento de catación, se analizaron dos resultados principales, el valor de la impresión global, esto se concertó previamente con el panel de catación, debido a que esta variable contiene de forma intrínseca el balance de la valoración en atributos que el catador asigna a cada muestra; se consideró la moda como medida de tendencia central, por lo tanto, el resultado de la impresión global reportado para cada muestra corresponde a la moda de las tres valoraciones, asignada cada una por un catador en un rango de 0 a 5 como se define en el cuadro 1; en los casos en los que, los tres valores difirieron, se tomó la calificación asignada por el catador líder.

Por otro lado, se obtuvo el perfil sensorial de cada muestra de acuerdo a la valoración de cada atributo, a partir de la cual se analizaron las variaciones en el perfil de las muestras con respecto a las características del café verde medidas.

2.2.4 Análisis de resultados. Se realizó un análisis cluster (ver anexo D), que consiste en una técnica estadística multivariada, cuyo objetivo es identificar grupos de objetos semejantes entre sí, de tal forma que el grupo esté cohesionado internamente, mientras los grupos formados tengan un comportamiento diferente entre sí, con respecto a las variables analizadas, es decir que cada grupo esté aislado externamente de los demás grupos, esto con el fin de agrupar los flujos estudiados para establecer la viabilidad de disminuir el tamaño del diseño de experimentos que se usará en el capítulo 3.

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 Caracterización del CPS. La tabla 7 presenta los datos proporcionados por la empresa con respecto a la caracterización realizada del CPS alimentado al proceso durante el tiempo de muestreo.

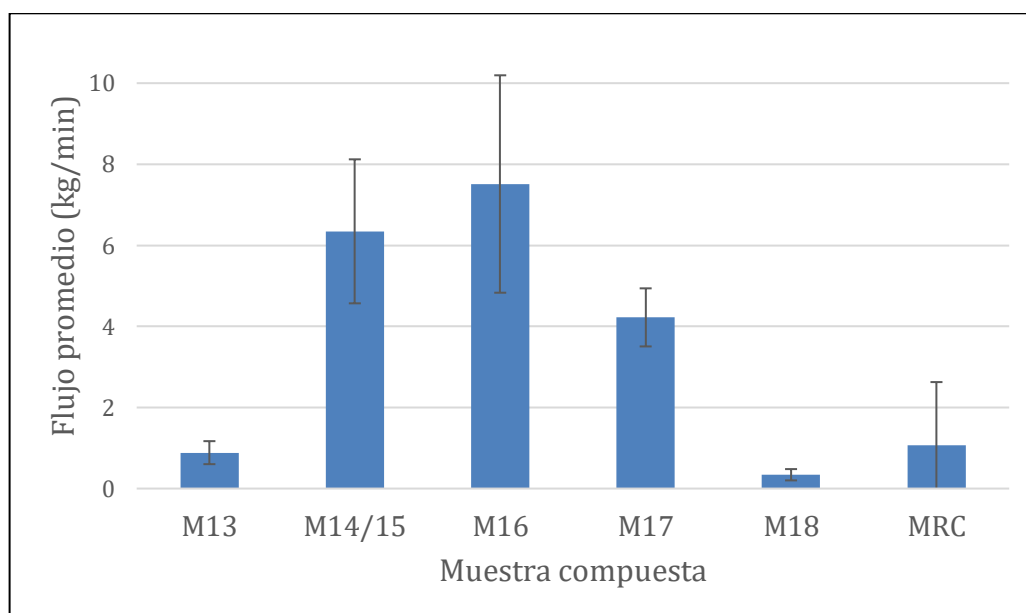
Tabla 7. Caracterización del CPS muestreado.

Cantidad (kg)	107 250
Tipo	Café corriente
Origen	Provincia de Lengupa (Boyacá): Municipios de Zetaquirá, Miraflores, Páez y San Eduardo.
Humedad (%BH)	12,8
% de merma	19,5

Fuente: elaboración propia, con base en: RACAFÉ & CIA.

La figura 5 presenta el flujo promedio de cada una de las corrientes muestreadas con su rango de variación durante el tiempo de muestreo.

Figura 5. Flujo promedio calculado para cada muestra compuesta.



Fuente: elaboración propia.

Se presenta una diferencia importante entre las cantidades del balance de materia que se presentó en la descripción del proceso del numeral 1.3.1, en esta última se encontró que el flujo de café verde de la malla 18 es aproximadamente el doble que el flujo de la malla 17 y ésta a su vez es 30% mayor al de la malla 16. Como se observa en la figura 5, el mayor flujo durante el tiempo muestreado se obtuvo para la malla 16, mientras el de la malla 18 se mantuvo muy por debajo de los demás. Dicha distribución de flujo en las corrientes varía de acuerdo a la calidad del café pergamino que se procesa, representada como el porcentaje de grano aprovechable de café, que es un factor de rendimiento que se calcula en el momento de comprar el café a los proveedores para establecer un precio de

compra y se calcula como la cantidad de kilogramos de CPS necesario para obtener 1 kg de café excelso.

2.3.2 Caracterización de muestras compuestas. Los resultados de la caracterización de las muestras compuestas se presentan en la tabla 8, y se analizan a continuación.

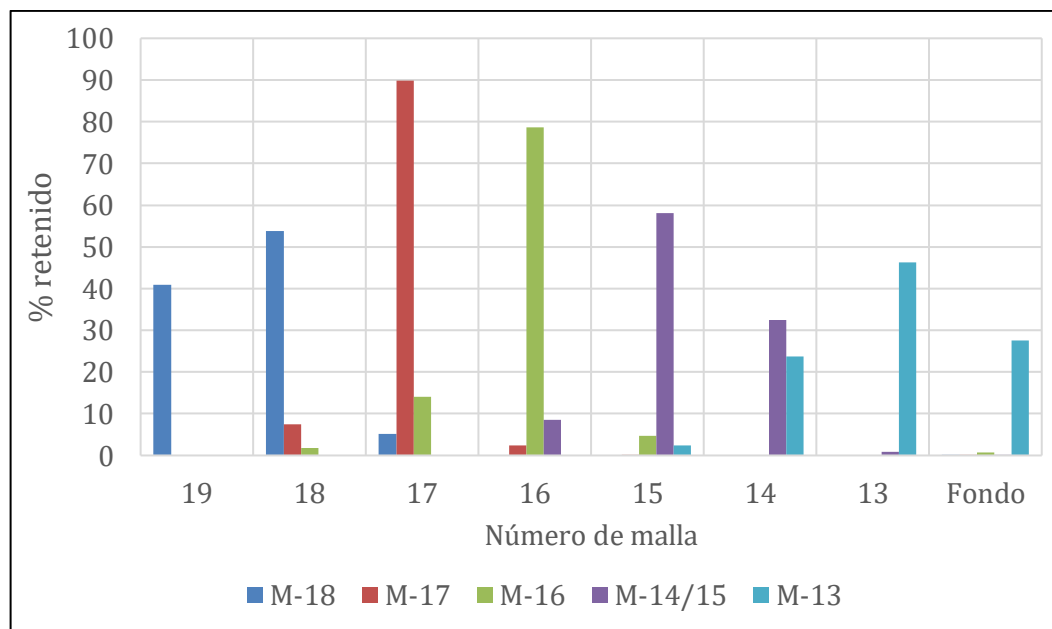
Tabla 8. Resultados de caracterización de muestras compuestas.

Muestra compuesta	Humedad promedio (%BH)	Densidad promedio (g/L)	% de ripio promedio	% de impurezas y materia extraña promedio	% de defectos mayores promedio
M-13	10,60±0,11	555,30±5,73	1,91±0,51	5,15±1,29	50,92±6,20
M-14/15	11,62±0,11	639,70±5,44	0,04±0,05	0,61±0,41	15,01±2,19
M-16	11,97±0,11	675,33±5,20	0,02±0,04	0,54±0,25	9,19±1,70
M-17	12,05±0,08	675,49±5,15	0,03±0,05	0,72±0,29	6,43±2,13
M-18	11,67±0,16	596,38±10,33	0,07±0,05	11,01±2,30	9,49±1,79
M-RC	11,20±0,13	684,69±1,70	0,02±0,04	0,06±0,11	62,54±4,90

Fuente: elaboración propia.

La caracterización por tamaño, que se muestra en la figura 6, como % retenido de muestra en cada tamiz.

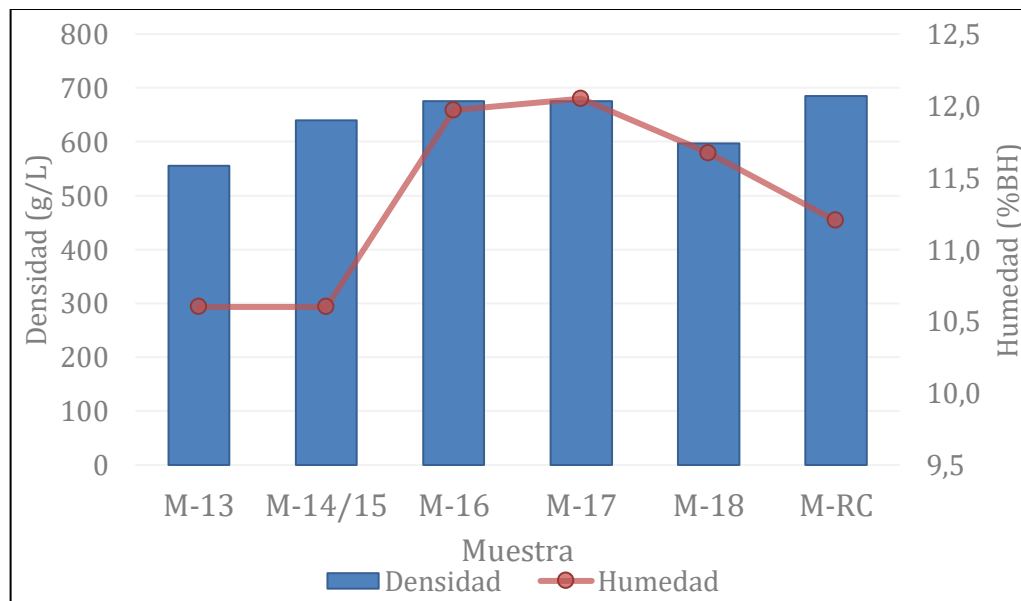
Figura 6. Distribución del tamaño de grano de cada muestra.



Fuente: elaboración propia.

La figura 6, permite deducir que no hay una homogeneidad en el tamaño de los granos aun cuando se realiza una separación por tamaño, esto es debido a que como se mencionó anteriormente, de acuerdo al plan de producción de la empresa y al porcentaje de grano aprovechable del café que se procesa, se configuran los ductos para trabajar conjuntamente ciertos flujos de mallas en las mesas densimétricas, los ductos usados para el transporte del café no son limpiados o desocupados cuando se cambia de un plan de producción a otro, lo que repercute en la uniformidad de tamaño en las muestras tomadas. Sin embargo, se observa que alrededor del 80% de los granos se retienen en su correspondiente malla, excepto para las muestras M-13, la cual presenta una mayor dispersión de tamaños.

Figura 7. Resultados de densidad y humedad de cada muestra.



Fuente: elaboración propia.

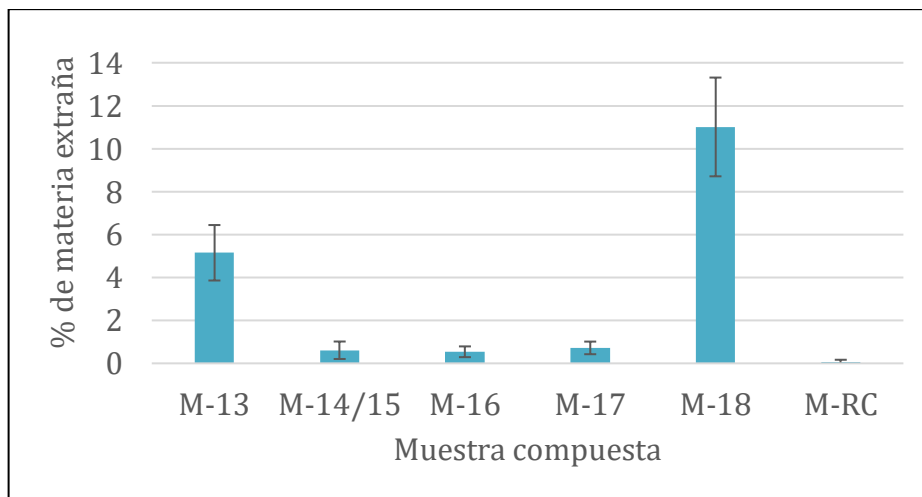
En la figura 7, se observa que la densidad de los rechazos colorimétricos fue superior que la de todas las demás muestras, como se esperaba, esto debido a que se muestreó de la corriente que reúne todas las densidades altas o “cabezas” que salen de las mesas densimétricas pero que son rechazadas por su color, sin embargo, su valor es aproximadamente 9 g/L superior a la densidad de las muestras de las mallas 17 y 16, el cual es relativamente bajo si se compara con las diferencias entre las demás muestras.

Por otro lado, se observa una correlación tanto de la densidad como de la humedad (línea continua) con respecto al tamaño del grano representado por las diferentes muestras que se tomaron. Previamente a la trilla, el CPS que se procesa es secado comúnmente con la exposición directa del café al sol, con un

mayor tamaño del grano, el proceso de transferencia de calor del secado, se presenta de una forma menos eficiente ya que debe haber un mayor recorrido del agua contenida en el grano para poder liberarse en forma de vapor al exterior, en consecuencia, el café verde obtenido va a contener un mayor contenido de agua, como se observa en el aumento de la variable humedad con respecto al tamaño de grano, que aumenta desde la muestra M-13 a M-18. Se observa, además, que los valores de humedad no varían considerablemente entre muestras, y que todos se encuentran entre 10-12%, que es el rango establecido por la NTC 5938 para el café verde de uso industrial, no obstante, la humedad de M-17 se encuentra en el límite superior, lo que se debe considerar en su almacenamiento posterior.

Entretanto, el contenido de agua, aumenta el peso de cada grano de café, aumentando así la relación masa/volumen de la muestra en general, esto explicaría, por otro lado, la misma relación de aumento de la densidad con el tamaño del grano. Sin embargo, se observa que ambas variables disminuyen para la muestra M-18, esto puede estar relacionado con el alto contenido de materia extraña e impurezas de dicha muestra (ver figura 8).

Figura 8. Resultados de materia extraña e impurezas en cada muestra.

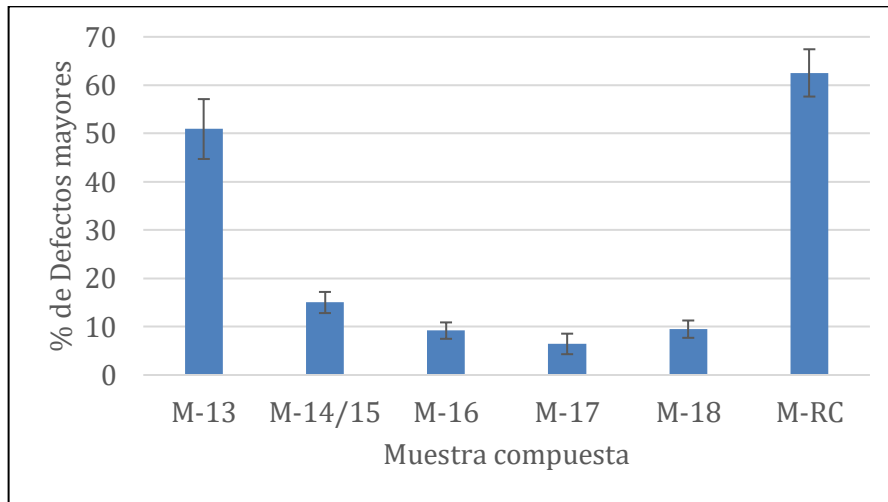


Fuente: elaboración propia.

El alto contenido de materia extraña e impurezas en la muestra de la malla 18 (11,01%), está relacionado con el hecho de que, al ser la malla de mayor abertura, ésta retiene gran parte de impurezas como, por ejemplo, granos de café llamados guayabas, éstos son considerados granos defectuosos debido a que no se les retiró correctamente la cáscara en la trilla, por ende se retienen en la malla de mayor abertura. Por otro lado, también contiene gran cantidad de materia extraña, representada por la presencia de palitos o terrones, la cual afecta, claramente la densidad medida, como se mencionaba anteriormente, debido a que la densidad fue obtenida como una densidad a granel, la cual se determina mediante la caída

libre de los granos de café de la muestra; este material genera una mayor cantidad de espacios de aire cuando la muestra cae en el recipiente donde se recoge y en consecuencia esto disminuye la masa medida, por ende la relación masa/volumen también disminuye.

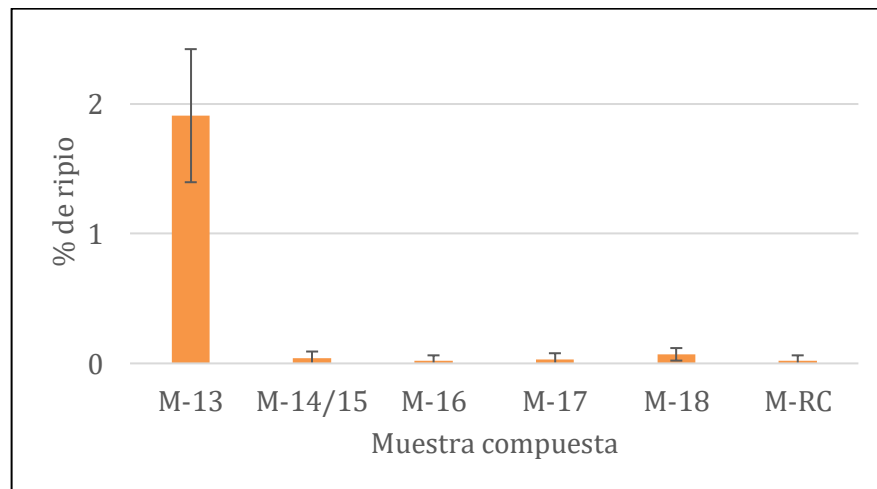
Figura 9. Resultados de defectos mayores obtenidos.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 9, se puede observar que se encontró un alto porcentaje de defectos en la malla 13, que corresponde al 50% de la muestra, estos principalmente fueron granos negros o vinagres, los cuales son considerados defectos mayores, debido a que son notorios visiblemente y además afectan la calidad de la taza obtenida, generando sabores no deseados como vinagre, fermento o celulósico.

Figura 10. Resultados del ripio de cada muestra.



Fuente: elaboración propia.

Por último, con respecto al porcentaje de ripio (ver figura 10), el mayor valor se obtuvo para la muestra M-13, clasificando a la corriente de la malla 13 muestreada de acuerdo a la NTC 5938, como café pasilla cuyo máximo valor admisible es 4%p/p, este resultado es coherente con la definición que se ha establecido para la variable ripio, el cual corresponde a todo el material que queda por debajo de la malla 12, por ende, se debe encontrar en la muestra M-13 que contiene el material retenido en la superficie de fondo de la separación por tamaño.

Las variables medidas claramente repercuten sobre el valor comercial de café verde en el mercado, un café con mayor densidad y mayor tamaño de partícula, aumenta el valor del producto clasificado, mientras que la humedad por encima de los valores establecidos lo puede disminuir debido a que se presentará una mayor merma durante la tostión, porque el contenido de agua en el grano se vaporiza en dicho proceso. Debido a esto y al interés de Racafé en analizar la posibilidad de ajustar el modelo de venta de sus productos, se realizó la clasificación de las muestras dentro de los estándares establecidos por la empresa Colcafé* (ver numeral 4.3)

2.3.3 Perfiles sensoriales de las muestras. En el anexo E se presentan los perfiles sensoriales obtenidos para cada muestra compuesta, estos se resumen en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados de la evaluación sensorial para cada muestra.

Muestra	Aroma	Sabor	Acidez	Cuerpo	Residual	Impresión Global
M-13	2	1	2	3	2	1
M-14/15	3	2	2	3	2	2
M-16	3	2	2	3	2	3
M-17	3	3	2	3	2	2
M-18	2	1	1	3	4	2
M-RC	2	3	3	2	3	3

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 9, se puede establecer que la muestra de rechazos colorimétricos (M-RC) arrojó un perfil sensorial aceptable y en varios atributos como sabor, acidez e impresión global fue superior a las demás muestras, esto se puede relacionar con el valor de densidad mayor que caracterizó ésta muestra, su sabor fue descrito por los catadores como “apanelado”, este descriptor respondió a un perfil de taza solicitado por un cliente de Racafé, por esto, la empresa analizará la posibilidad de plantearla a dicho cliente.

* Empresa Colombiana productora de café tostado y molido y de café soluble.

Destaca, de los resultados sensoriales obtenidos, la calificación de 4 en el residual de la muestra 18, de acuerdo a los expertos, esto se relacionó con el contenido de materia extraña, la cual impregna el sentido del gusto del catador, generando una mayor percepción al final de su catación, lo que quiere decir que el atributo se percibe fuertemente, pero esto no significa que sea agradable al paladar.

Las muestras M-17 y M-18 fueron detectadas con el defecto fenol, cuya nota de percepción específica es químico y humedad, este defecto es considerado de gravedad, debido a que indica poca inocuidad del producto, por lo cual normalmente se califica la taza con total rechazo²⁴.

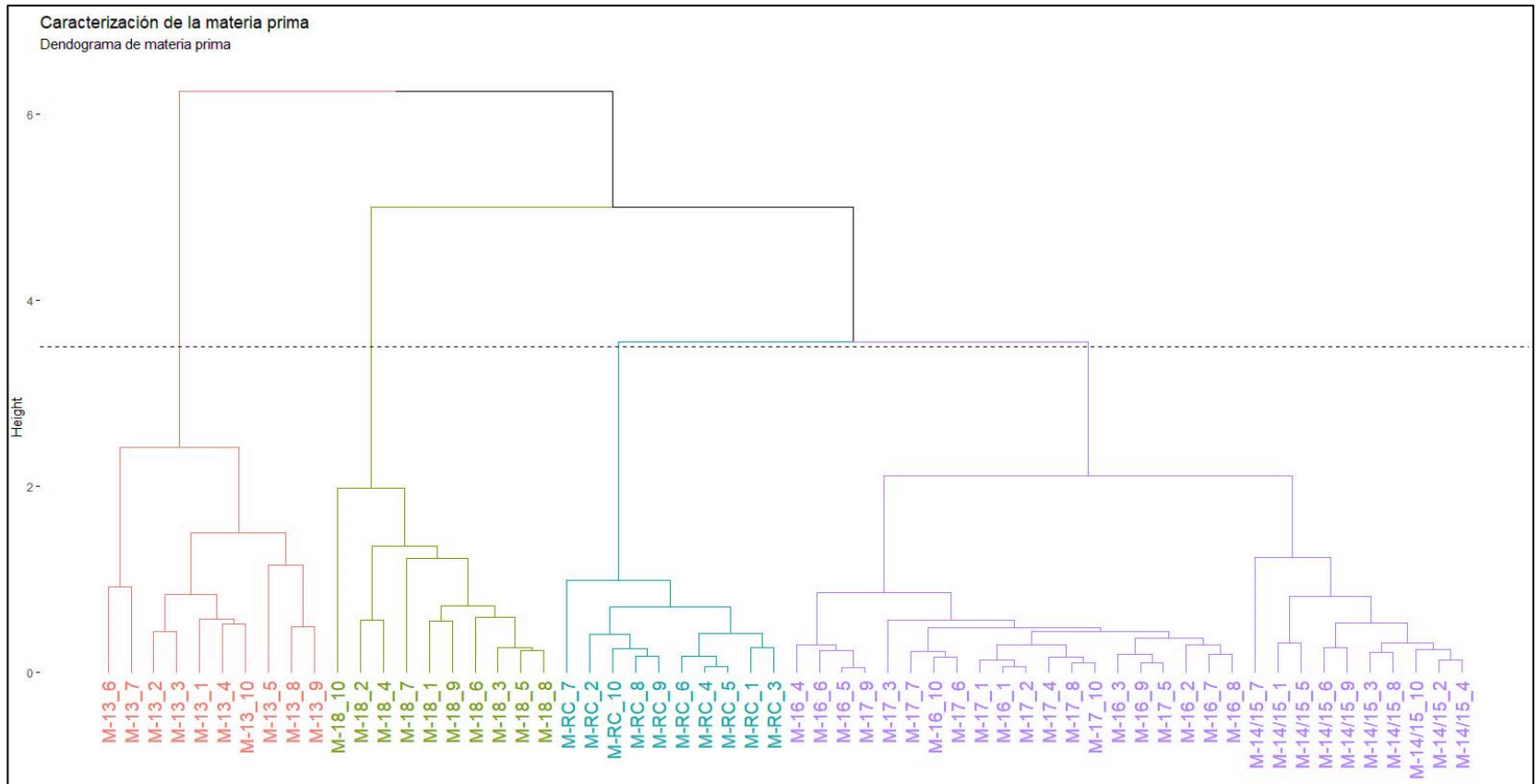
De forma general, y con base en los resultados en la impresión global, variable en la cual el catador balancea todos los atributos de la taza y genera en base a su criterio una calificación general, se puede establecer que el mejor perfil sensorial se obtuvo con la muestra M-RC, mientras la taza de menor calidad sensorial correspondió con la muestra M-13.

2.3.4 Análisis cluster. La figura 11 presenta la clasificación obtenida de las muestras, mediante el árbol de clasificación o dendograma. Éste nos indica en la parte inferior (eje horizontal) los objetos que fueron clasificados, estos objetos corresponde a las 10 réplicas realizadas para cada variable medida en la caracterización de café verde, se observan 4 grupos como se observa por los colores rojo, verde, azul y morado, donde, de acuerdo a la metodología del análisis en establecida en el anexo D que claramente cada grupo es homogéneo dentro de sí mismo, y disyunto o heterogéneo con respecto a los demás grupos, esto se puede corroborar a partir de la distancia euclidiana (eje vertical), que fue la medida de similitud empleada para definir estos grupos, como se observa la mayor distancia que une a estos grupos está cercana a 2, mientras que, el último grupo en donde se forma un solo grupo, tiene una distancia de aproximadamente 6.

El dendograma obtenido, sugiere que hay una gran homogeneidad entre las muestras M-16 y M-17, esto se observa claramente por el hecho de que se empiezan a formar clusters entre mediciones de ambas muestras a una distancia euclidiana de 0, esto concuerda con los resultados presentados anteriormente en la tabla 8, donde principalmente, los valores de densidad y humedad entre las dos muestras están bastante cercanos.

²⁴ LA REPÚBLICA. [Portal web]. Bogotá D.C.: Agronegocios, Conservemos la calidad para mejorar la rentabilidad, defecto fenol. [14-08-2019]. Disponible en: <https://www.agronegocios.co/aprenda/conservemos-la-calidad-para-mejorar-la-rentabilidad-defecto-fenol-2622732>

Figura 11. Dendrograma de clasificación de flujos de salida del proceso.

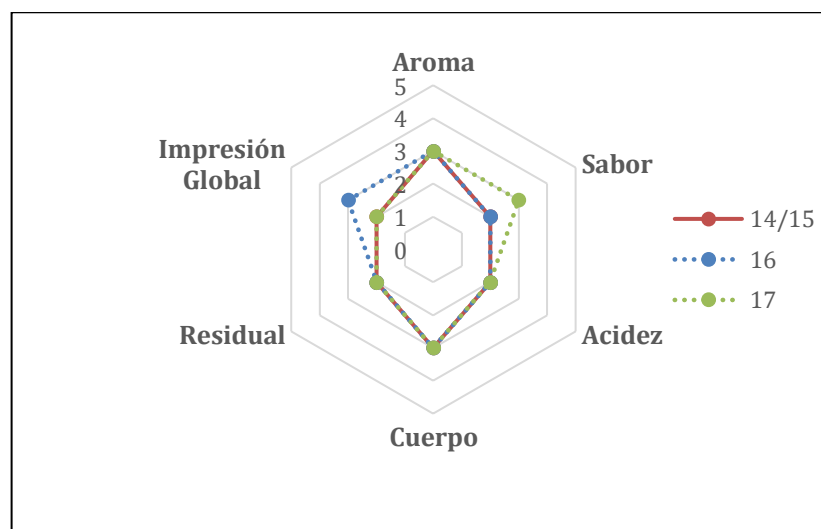


Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al diagrama obtenido, bajo un nivel de correlación (height) de 3,5 aproximadamente (línea punteada) se obtienen cuatro clusters que son: grupo 1 (color rojo): formado por la muestra M-13, grupo 2 (color verde): formado por la muestra 18, grupo 3 (color azul): formado por la muestra de rechazos colorimétricos (M-RC) y grupo 4 (color morado): formado por las muestras M-14/15, M-16 y M-17. Esto significa que, para el diseño de experimentos, se pueden mezclar las muestras compuesta M-14/15, M-16 y M-17 y trabajarse como una sola muestra compuesta, lo que ayudaría a disminuir el tamaño del diseño de experimentos. Sin embargo, las variables densidad, humedad y tamaño de partícula del grano, se consideran factores críticos en el proceso de torrefacción del café, debido a su efecto sobre el fenómeno de transferencia de calor que se produce en dicho proceso, entre más homogénea sea la muestra de café verde se podrá tener un mayor control sobre dicho proceso y por ende, se podrá obtener un grado de tuestión más uniforme; por lo tanto, se decidió trabajar el diseño de experimentos con cada muestra de café por separado. Mientras que, la clasificación obtenida mediante el análisis cluster, se presentó a Racafé, como una alternativa para establecer un sistema de almacenamiento de las colas de salida del proceso de clasificación y trilla de Racafé, debido a que, la empresa actualmente no cuenta con un sistema de almacenamiento segregado de estos flujos de salida, esto ayudará a reducir el espacio de almacenamiento requerido.

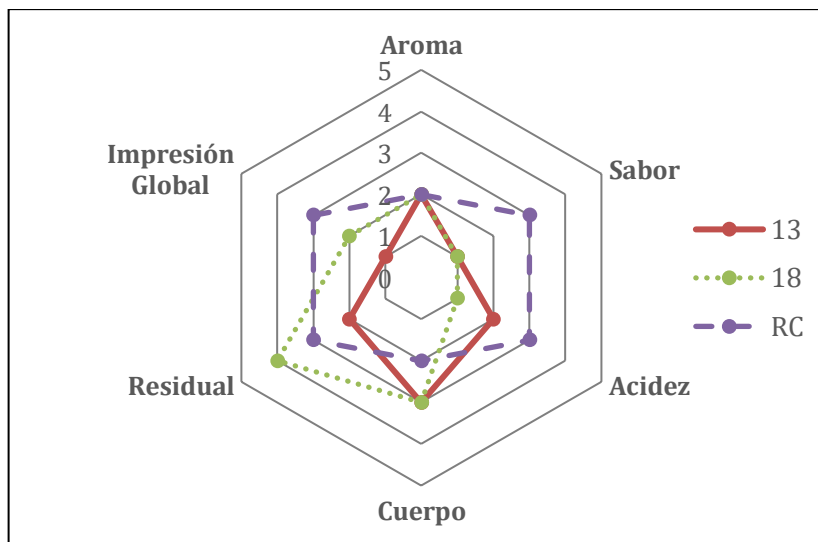
La clasificación obtenida es acorde con los perfiles sensoriales obtenidos, estos se diagramaron de acuerdo a los clusters formados y se muestran en las figuras 12 y 13.

Figura 12. Perfiles sensoriales de muestras agrupadas según el análisis cluster.



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Perfiles de las muestras más dispersos de acuerdo al análisis cluster.



Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 12, los perfiles de las muestras M-14/15, M-16 y M-17 tienen una tendencia similar, el perfil de M-14/15 se distribuye entre los perfiles de las mallas 16 y 17, los atributos en los cuales se presentó variación fue en el sabor, en el cual sobresalió M-17 e impresión global donde resaltó M-16. Mientras que los perfiles de las muestras que se mantuvieron en grupos separados (M-13, M-18 y M-RC) muestran una dispersión mayor como se observa en la figura 13.

3. EVALUACIÓN DEL TIEMPO DE TOSTIÓN Y EL GRADO DE MOLIENDA EN EL RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN Y EL PERFIL SENSORIAL DEL EXTRACTO

Se construyeron las curvas de tostión de las muestras compuestas con lo que se establecen los niveles del factor “tostión” en términos del tiempo de duración de este proceso; se realizó el análisis granulométrico de muestras de café obtenidas con diferentes graduaciones del molino disponible, con el fin de identificar cuáles de estas se ajustan a la norma como molienda fina, media y gruesa. Con esto, se planteó y ejecutó el diseño de experimentos factorial 6x3x3 que corresponde a 6 niveles del factor “Café”, tres niveles del factor “tostión” y tres niveles del factor “molienda”, el cual da como resultado un total de 54 tratamientos, para los cuales se establecieron como variables respuesta la calificación sensorial y el rendimiento de extracción.

3.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El planteamiento del diseño experimental es un procedimiento importante para determinar, tres aspectos primordiales de una experimentación: *a.* cuáles son los factores de tratamiento, entendiéndose factor de tratamiento, como una variable independiente cuya variación puede afectar la variable de salida y es de interés para el experimentador, *b.* establecer los niveles de cada factor, es decir, determinar qué valores o grados específicos va a tomar el factor de interés, y por último; *c.* aclarar cuál será la variable de salida o de respuesta, es decir, aquella variable sobre la cual se desea analizar el efecto de los factores establecidos. Con base en lo anterior, se diseña una matriz de experimentos, donde cada elemento de dicha matriz corresponde a un tratamiento, es decir, una combinación específica de niveles de los factores que generará un valor determinado en la variable respuesta. Esta matriz, permite plantear la logística adecuada para lograr el objetivo de la experimentación.

Con base en esto, a continuación se describirán los factores de interés en el presente estudio y la metodología llevada a cabo para definir sus niveles, las variables respuesta que se desean a analizar y el método de medición; además, se establecen de forma resumida algunas variables que aunque no son de interés de estudio en el diseño experimental, se considera que pueden tener incidencia sobre los resultados y por ende influirán en el porcentaje de error del experimento (factores perturbadores).

3.1.1 Factores tratamiento.

3.1.1.1 Café. Corresponde al tipo de materia prima, en éste caso de a los tipos de café verde que se diferencian básicamente en sus características de tamaño de grano, humedad y densidad de acuerdo a la caracterización realizada en el primer capítulo del trabajo. Como se establecieron seis muestras compuestas (M-13, M-

14/15, M-16, M-17, M-18, M-RC) provenientes de los seis flujos de salida del proceso (colas), cada uno de estos corresponde a un nivel del factor 'café', por lo tanto, la variable de este factor, es de tipo categórica.

3.1.1.2 Tostión. La denominación que se usará para referirse a los niveles de tostión son clara, media y oscura. Para definir los niveles de este factor, se realizaron ensayos de tostión, mediante los cuales se construyó la curva de tostión de cada muestra compuesta. Este procedimiento se hace necesario debido a que, como se mencionó anteriormente, las fases que se presentan en la tostión, se desarrollan en función de las características iniciales del café verde que se va a tostar, principalmente la humedad, la densidad y el tamaño del grano, estos valores son diferentes para cada muestra y se establecieron mediante la caracterización realizada en el capítulo 2 del trabajo.

Por lo tanto, se realizó la tostión de cada una de las muestras compuestas caracterizadas previamente, para lo cual, se llevó una cantidad de 100 g de café verde de cada muestra a un tostador de tambor giratorio para laboratorio marca Probat, el cual se muestra en la ilustración 7. Se estableció una temperatura inicial de 150°C, y cada minuto se midió la temperatura. Este procedimiento se llevó a cabo con tres repeticiones para cada una de las muestras compuestas, cada una de las cuales se tostó hasta un tiempo final diferente, usando como criterio de parada el color observado en la muestra, con lo cual, se buscó obtener una tonalidad de color clara, media y oscura en cada una de las repeticiones, además con base en la experticia del asesor asignado por Racafé para la realización de estos experimentos, se buscó que la tonalidad fuera similar u homogénea entre muestras.

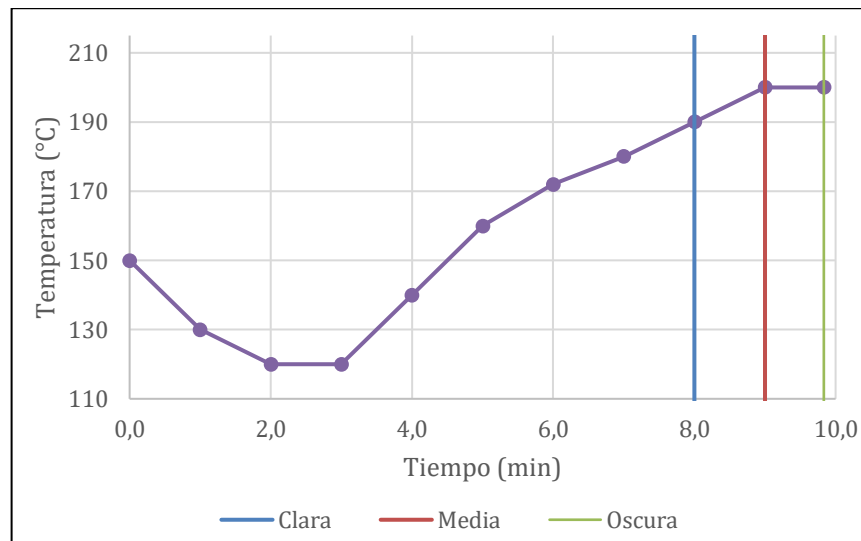
Ilustración 7. Tostador de laboratorio usado en los ensayos de tostión.



Fuente: elaboración propia.

A partir de estos ensayos, se construyó el perfil de temperatura de cada muestra, en cada perfil se indica mediante una línea vertical, el tiempo en el cual se definió la tostión clara, media y fina, como se muestra en la figura 14, ésta corresponde a la curva de tostión obtenida para la muestra M-13; las curvas correspondientes a las demás muestras se presentan en el anexo F.

Figura 14. Curva de tostión característica para M-13.



Fuente: elaboración propia.

El perfil de tostión mostrado en la figura 14, sigue claramente la tendencia de la curva de tostión ideal presentada en el numeral 1.3.3, inicialmente el tambor tostador se calentó por medio de la combustión de gas natural hasta obtener una temperatura de 150°C, una vez logrado este valor en el marcador de temperatura del tambor, se alimentaba la muestra de café verde, por ende la curva inicia en el tiempo cero con una temperatura de 150°C, posteriormente se observa la disminución de la temperatura del aire dentro del tambor como consecuencia de la fase de secado que se presenta, la evaporación del agua contenida en el grano, al ser una operación endotérmica necesita energía latente que reduzca la cinética de calentamiento interno que se está generando, es por esto que, con la posterior etapa de calentamiento, éste se hincha disminuyendo significativamente su conductividad térmica y creando tensiones mecánicas que se desplazan hasta su interior, produciendo el craqueado común, una vez se escucha dicho sonido, la temperatura del grano se debe mantener constante, debido a que se da inicio a la fase de pirólisis, donde las reacciones químicas que permiten lograr el sabor y aroma del café se producen.

La muestra que generó mayores inconvenientes en la tostión, fue la muestra M-13, esto se debe en gran parte a su alto contenido de ripio (alrededor del 2%), además al tener un tamaño inferior, la velocidad de calentamiento y de tostión de este

material es superior al del retenido sobre la malla 13, esto generó que la muestra se observe con una alta dispersión en el color (ver tabla 12). Como se había mencionado anteriormente, la homogeneidad de la muestra es un factor clave en el proceso de tosti3n, ya que sus caracteristicas de humedad, densidad y tama1o de grano, inciden directamente sobre las fases de secado y calentamiento de dicho proceso.

La tabla 10 presenta el tiempo en minutos obtenido para los niveles de tosti3n de cada muestra. Es importante recalcar, como se observa en la tabla, que el tiempo que define el nivel de tosti3n no es el mismo para todas las muestras, este varía debido a que la curva de tosti3n es propia para cada tipo de caf3 verde en espec3fico. Sin embargo, se puede establecer que el tiempo de la tosti3n clara se obtuvo en un rango de 7-8 minutos, para la tosti3n media entre 8-9 minutos y para la tosti3n oscura el tiempo es superior a 9 minutos.

Tabla 10. Tiempo de tosti3n establecido para cada nivel de tosti3n y para cada muestra.

Nivel de tosti3n	Variable medida	M-13	M-14/15	M-16	M-17	M-18	M-RC
Clara	Tiempo total(min)	8,00	7,42	8,00	8,00	8,00	7,00
Media	Tiempo total(min)	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	8,00
Oscura	Tiempo total(min)	9,83	10,50	9,75	10,50	10,83	9,83

Fuente: elaboraci3n propia.

En la tabla 10, se puede evidenciar adem3s que la muestra de rechazos colorim3tricos obtuvo el tiempo de tosti3n m3s bajo para todos los niveles, esto puede verse relacionado con que estos granos son los que presentan una humedad baja en comparaci3n con las dem3s muestras compuestas, lo que puede acelerar la fase de secado que se presenta durante la tosti3n.

A partir de los perfiles de tosti3n obtenidos, las muestras compuestas de caf3 verde, se llevaron a tostar a un tostador comercial que tuviera la capacidad apropiada para lograr que la tosti3n fuera uniforme, este factor es importante industrialmente debido a que, si el tostador no se completa en su capacidad, se da lugar a que los granos salten dentro del tambor y esto genere un tostado poco uniforme, las muestras tostadas obtenidas se caracterizaron mediante la medici3n del % de merma (%p/p), determinado como el porcentaje de p3rdida de peso de la muestra tostada con respecto a la cantidad inicial alimentada al tostador; la humedad del grano tostado y molido, la cual se determin3 como % en base h3meda mediante el determinador de humedad de granos y semillas marca Kett

PM450; el color, el cual se determinó con un colorímetro comparativo marca Tonino y se calibró sobre la escala del dispositivo, en la cual valores superiores a 100 son considerados tostados muy ligeros y corresponde a un valor agtron de 80 en la escala gourmet. Además, se indica la temperatura y el tiempo en el cual se presentó la crepitación de la muestra, es decir, el momento en el que los granos empezaron a craquear, que es el principal indicativo del inicio de las reacciones químicas internas del grano. Los resultados de la caracterización se muestran en la tabla 11, se presentan, además, las tonalidades obtenidas para cada una de las muestras compuestas tostadas en la tabla 12.

Tabla 11. Caracterización de los perfiles de tosti3n obtenidos para cada muestra.



















Tosti3n	Variable medida	M-13	M-14/15	M-16	M-17	M-18	M-RC
Clara	<i>Color</i>	95,83±1,17	107,67±4,27	108,4±2,0	100,83±2,14	97,6±3,05	109,2±1,5
	<i>Humedad (%BS)</i>	1,57±0,21	1,6±0,20	1,87±0,15	1,77±0,06	0,15±0,06	2,5±0,00
	<i>Merma (% p/p)</i>	15,8	15,1	14,5	14,8	15,1	15,2
Media	<i>Color</i>	78,83±1,94	80,67±2,25	67,8±1,92	68,67±1,86	83,6±0,55	76,8±1,30
	<i>Humedad (%BS)</i>	1,23±0,11	1,63±0,15	1,23±0,21	1,37±0,15	1,23±0,15	1,57±0,15
	<i>Merma (% p/p)</i>	15,9	15,8	15,0	15,2	16,1	15,5
Oscura	<i>Color</i>	62,00±1,41	70,33±1,21	47,6±1,5	51,33±1,21	67,2±1,48	54,2±0,45
	<i>Humedad (%BS)</i>	1,33±0,21	1,46±0,12	1,4±0,10	1,43±0,12	1,33±0,15	1,43±0,06
	<i>Merma (% p/p)</i>	16,0	15,8	15,5	15,4	16,7	16,0
	Temperatura de crepitaci3n (°C)	190	187	185	177	193	185
	Tiempo de crepitaci3n (min)	8,00	7,00	6,83	6,67	7,00	6,00

Fuente: elaboraci3n propia.

En la tabla 11 se puede observar el efecto de la falta de homogeneidad de la muestra sobre la tosti3n, esto se evidencia en el valor del color obtenido como medida de la reflectancia de la muestra tostada, en los tres niveles se observa que las muestras M-13, y M-18 son las que presentan una mayor dispersi3n del valor promedio obtenido entre muestras, as3 por ejemplo, para la tosti3n clara, el valor de reflectancia de estas dos muestras se obtuvo por debajo de 100, mientras para todas las dem3s 3ste valor se ubic3 por encima de dicho valor. Por otro lado, no se observ3 diferencia significativa entre los datos de merma y humedad para los tres niveles de tosti3n establecidos, en lo que no hay una coherencia con respecto a la colorimetr3a obtenida, que fue significativamente dis3mil entre niveles (ver tabla 12) por lo que se hubiese esperado que este porcentaje aumentara de forma m3s estrecha con el tiempo y el color obtenido. El porcentaje de merma com3nmente aumenta para tiempos de tosti3n mayores, debido al intenso proceso de evaporaci3n que tiene lugar durante la tosti3n, el agua evaporada aumenta la porosidad del grano de caf3

y con esto genera un progresivo descenso en el peso de las muestras.²⁵ Díaz, reportó porcentajes de merma superiores al 18% para muestras de café arábigo con tiempos de tostión de 7-9 minutos; sin embargo, los resultados obtenidos de este parámetro podrían no concordar con varias referencias encontradas debido a la baja calidad del café que se trabajó.

Tabla 12. Tonalidad de color obtenida para cada tosti3n y cada muestra.

	M-13	M-14/15	M-16	M-17	M-18	M-RC
Clara						
Media						
Oscura						

Fuente: elaboraci3n propia.

A partir de la tabla 12, se evidencia que, bajo un criterio cualitativo, la tonalidad de color obtenida para cada nivel de tosti3n es significativamente uniforme entre muestras, exceptuando el color de M-13, esto se debe a la falta de homogeneidad que caracteriz3 a esta muestra y que, como se indic3 anteriormente gener3 inconvenientes en el control de la tosti3n. Por otro lado, las tonalidades son significativamente disímiles entre niveles de tosti3n, este

²⁵ DÍAZ, Félix O., et. Al. Efecto de la tosti3n del café (*Coffea arábica* L. var Castillo) sobre el perfil de taza, contenido de compuestos antioxidantes y la actividad antioxidante. *Informaci3n Tecnol3gica*. 2018, Vol. 29, Nro. 4, p. 31-42. ISSN 07180764

resultado de colorimetría, es atribuido en gran medida a la generación de melanoidinas, compuestos de estructura polimérica que se producen principalmente por la reacción de Maillard y que aportan al café, y a los alimentos en general, coloraciones pardas o negras con apariencia caramelizada.

3.1.1.3 Molienda. Este factor se refiere el grado de reducción del tamaño del grano de café tostado. La variable que se manejó fue el tamaño promedio de partícula (\bar{X}) en unidades de micrómetros (μm), y los niveles se plantearon de acuerdo a la denominación de la NTC 3534 como molienda fina, media y gruesa, ésta referencia normativa define estos tres tipos de molienda en términos del diámetro promedio de partícula de acuerdo al cuadro 2.

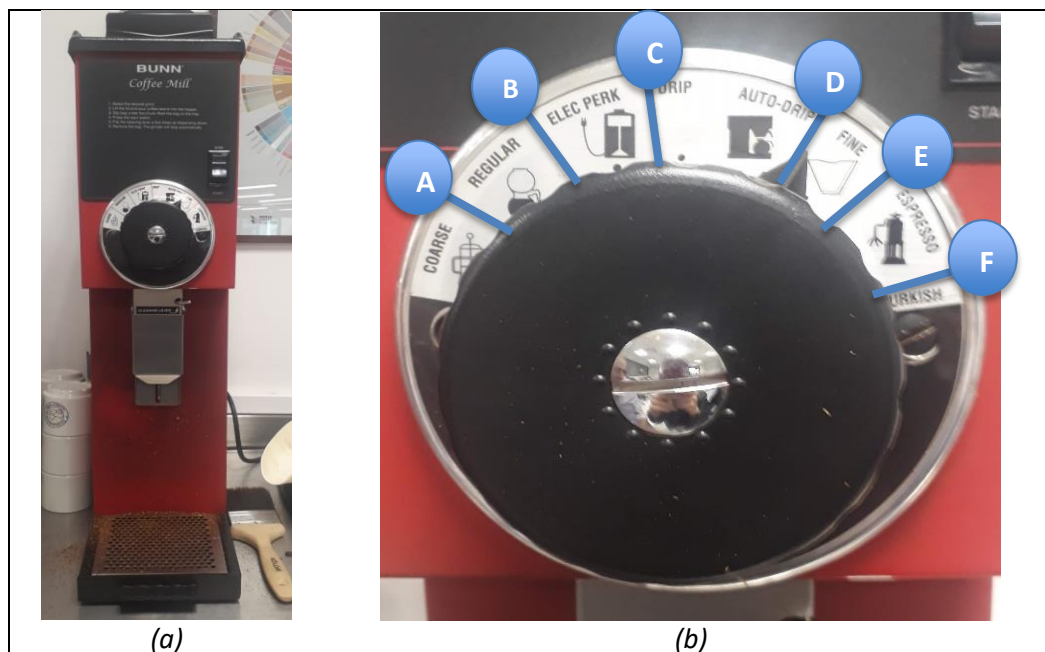
Cuadro 2. Clasificación granulométrica establecida en la NTC 3534.

Denominación	Tamaño promedio de partícula (μm)
Gruesa	≥ 700
Media	700 – 500
Fina	≤ 500

Fuente: elaboración propia, con base en: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Café tostado en grano o molido. NTC 3534. Bogotá D.C. 2007. 8 p.

Con el objetivo de establecer la graduación del molino que permitiera obtener una granulometría gruesa, media o fina que se ajuste a los rangos especificados por la norma colombiana mencionada anteriormente, se realizó el análisis granulométrico a muestras de café tostado y molido con diferentes graduaciones del molino disponible en el laboratorio de calidad de la empresa Racafé, la graduación del molino, se refiere a la posición de la perilla con la cual se configura internamente el espacio entre los discos, con el fin de ajustar la granulometría deseada en la muestra molida, es decir, éste establece qué tan fina o gruesa se obtendrá la muestra. La ilustración 8a) presenta el equipo analizado, éste es un molino de discos para laboratorio, marca BUNN, mientras en la ilustración 8b) se muestra la perilla del molino donde se indica, por medio de letras, las seis graduaciones que se analizaron.

Ilustración 8. (a). Molino utilizado para definir los niveles de molienda, (b) Graduaciones del molino analizadas.



Fuente: elaboración propia.

El análisis granulométrico de las muestras molidas se realizó con base en el procedimiento establecido en la NTC 2441, con algunas modificaciones, de acuerdo al cual, se tomaron 10 g de cada muestra, y se tamizaron durante dos minutos en un sistema de tamices para laboratorio marca Kruve (ver ilustración 9), después de esto se pesó cada tamiz con la cantidad de muestra retenida y se determinó el porcentaje retenido y acumulado en cada tamiz, este procedimiento se realizó por duplicado para cada graduación del molino.

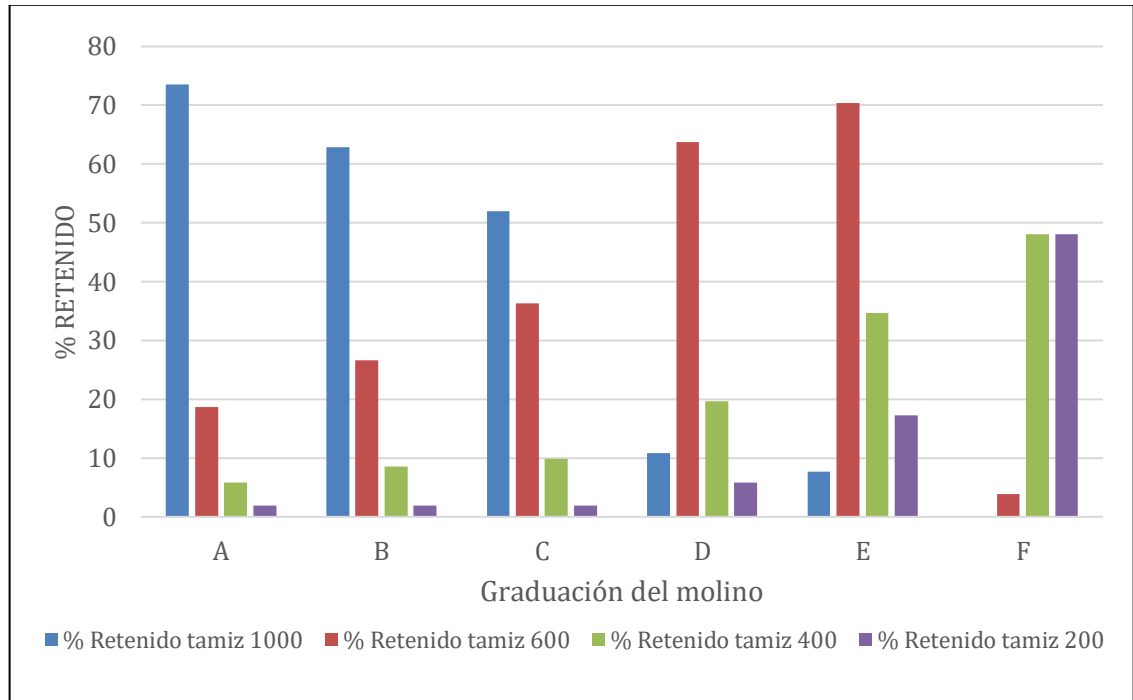
Ilustración 9. Tamices usados para el análisis granulométrico del molino.



Fuente: elaboración propia.

El porcentaje retenido en cada malla para las graduaciones del molino analizadas se muestra en el anexo G y se resumen en la figura 15.

Figura 15. Distribución granulométrica obtenida para cada graduación del molino.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 15 se observa que, con las graduaciones A, B y C la muestra se retiene en más del 50% sobre el tamiz de abertura 1000 μm , lo que indica de forma anticipada que se pueden clasificar como molienda gruesa, de acuerdo a la NTC 3534, mientras la posición D y E se retienen mayoritariamente sobre el tamiz 600, por lo que se esperaría que el tamaño promedio de partícula se obtenga en el rango de 500-700 μm ; en consecuencia se esperaría que la graduación que se debería trabajar para la molienda fina sería la graduación F, la cual se distribuye de forma aproximadamente igual entre los tamaños 400-200 μm . Aunque estas conclusiones ya permiten generar un panorama de las graduaciones que se podrían usar para cada nivel de molienda que se plantea trabajar, se completó el procedimiento establecido en la NTC 2441, para determinar el tamaño promedio de partícula que se obtienen con cada graduación; para lo cual, estas distribuciones, se ajustaron al modelo gaussiano (ver ecuación 4) con un factor de correlación superior a 0,96, mediante el uso del software Curve Expert en su versión gratuita, con esto se matemático obtuvieron los parámetros del modelo a , b y c , los cuales se introdujeron en la ecuación 5 para calcular el tamaño promedio de partícula de la muestra.

Ecuación 4. Ecuación del modelo matemático de Gauss.

$$y = ae^{\frac{-(b-x)^2}{2c^2}}$$

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Café tostado y molido. Método para la determinación del tamaño promedio de partícula por distribución granulométrica. NTC 2441. Bogotá D.C. 2011. 9 p.

Ecuación 5. Ecuación para el cálculo del tamaño promedio de partícula.

$$\bar{x} = c \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{a}{Tm}\right)}{0.5}} + b$$

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Café tostado y molido. Método para la determinación del tamaño promedio de partícula por distribución granulométrica. NTC 2441. Bogotá D.C. 2011. 9 p.

Donde \bar{x} es el tamaño promedio de partícula de la muestra, Tm es el porcentaje acumulado que se reemplaza como 50% en la ecuación, y a , b y c , son los parámetros obtenidos del modelo de Gauss.

Con la aplicación de las ecuaciones 4 y 5 se obtuvieron los diámetros promedio de partícula presentados en la tabla 13.

Tabla 13. Diámetro promedio de partícula para cada graduación.

Graduación del molino	\bar{X} (μm)
A	1 399,302
B	1 161,707
C	1 014,306
D	718,039
E	589,242
F	410,388

Fuente: elaboración propia.

A partir de la tabla 13, se observa que, como se había previsto anteriormente, las graduaciones A, B y C generaron diámetros promedio de partícula que se clasifican de acuerdo a la norma como molienda gruesa, sin embargo, se observa

que también la graduación D se clasifica como gruesa, debido a que está ligeramente por encima del límite de la molienda media (700 μm).

Con base en los rangos establecidos en la norma (ver cuadro 2), y a partir de los diámetros promedio de partícula presentados en la tabla 13, se decidió usar la graduación C, E y F para molienda gruesa, media y fina respectivamente.

3.1.2 Variables respuesta. Se establecieron dos variables respuesta, el rendimiento de la extracción y la calificación sensorial obtenida para el extracto.

3.1.2.1 Rendimiento de extracción. El rendimiento de la extracción se obtuvo a partir de la extracción de cada una de las muestras con su respectivo tratamiento de tostión y molienda, la extracción fue realizada en un equipo de extracción de café por goteo, marca BUNN, el cual se muestra en la ilustración 10.

Ilustración 10. Equipo usado para realizar la extracción de café.



Fuente: elaboración propia.

Las condiciones del procedimiento llevado a cabo se resumen en el cuadro 3 y fueron determinadas mediante ensayos de extracción que se llevaron a cabo previamente a la ejecución del diseño de experimentos.

Cuadro 3. Condiciones de operación para la extracción.

Temperatura del agua	92 °C
Presión del agua	Atmosférica
Relación café/agua	60 g/L
Volumen de agua	285 ml
Cantidad de café	17g

Fuente: elaboración propia.

El equipo de extracción usado posee un nivel de agua interno, el cual calienta previamente a la extracción, por lo tanto, se debe dar un tiempo, una vez encendido el equipo, para que se caliente el nivel de agua interno mediante resistencias eléctricas hasta alcanzar una temperatura de 92°C, de acuerdo al catálogo del equipo. Al agregarse la cantidad de agua establecida, ésta desplaza internamente el mismo volumen de agua dentro de la cafetera, debido a su diferencia de densidades, producto de la diferencia de temperaturas, el agua caliente fluye para mojar la capa de café depositada sobre el papel filtro que se coloca sobre el soporte; al entrar en contacto, se produce el proceso de extracción y de forma simultánea se realiza el proceso de filtrado.

El tiempo de la extracción se determinó de acuerdo a Moroney et. Al²⁶, quien reporta que para tiempos de contacto agua/café superiores a 100 segundos la variación de la concentración de sólidos extraídos en el extracto no es significativa, esta referencia se usó para determinar un criterio de parada para la recolección de extracto a la salida de la operación, ya que, mediante ensayos previos se encontró que el flujo continuo de salida del extracto se mantenía hasta tiempos de extracción superiores a 100 s, por ende, se estableció detener la extracción, es decir, recolectar el extracto sólo hasta el momento en se observaba que el flujo del extracto a la salida del filtro ya no era continuo. Una vez recolectado el extracto, se dejó enfriar, hasta que alcanzara la temperatura ambiente, ésta temperatura fue registrada durante el tiempo de ejecución de los experimentos y osciló entre 24-27,5°C.

Se llevó a cabo una extracción en blanco, es decir, se hizo fluir agua fría por la cafetera cada cinco repeticiones o cinco extracciones de café, debido a que el uso continuo del equipo lo recalienta generando errores en la operación, como fenómenos de “channeling” en los cuales el café no es mojado completamente por el agua, presentándose disminución en la eficiencia de la extracción de compuestos del café.

²⁶ MORONEY, K.M. et. Al. Modelling of coffee extraction during brewing using multiscale methods: An experimentally validated model. *Chemical Engineering Science*.2015, Vol. 137. p. 216-234. ISSN 00092509.

Una vez el extracto alcanzó la temperatura ambiente, se determinó el porcentaje de sólidos totales disueltos (%STD) mediante el uso de un refractómetro digital PAL-COFFEE. En función de éste valor, se determinó el rendimiento de cada extracción, aplicando la relación usada por Angeloni et al., la cual se muestra en la ecuación 6 y fue validada previamente (ver numeral 3.2), dicha ecuación relaciona el porcentaje total de café molido que finalmente se disuelve en el agua con el %STD medidos.

Ecuación 6. Ecuación para el cálculo de rendimiento de extracción a partir de %STD.

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{\text{Total de bebida obtenida (g)} * \% \text{STD}}{\text{Total de café tostado y molido usado (g)}}$$

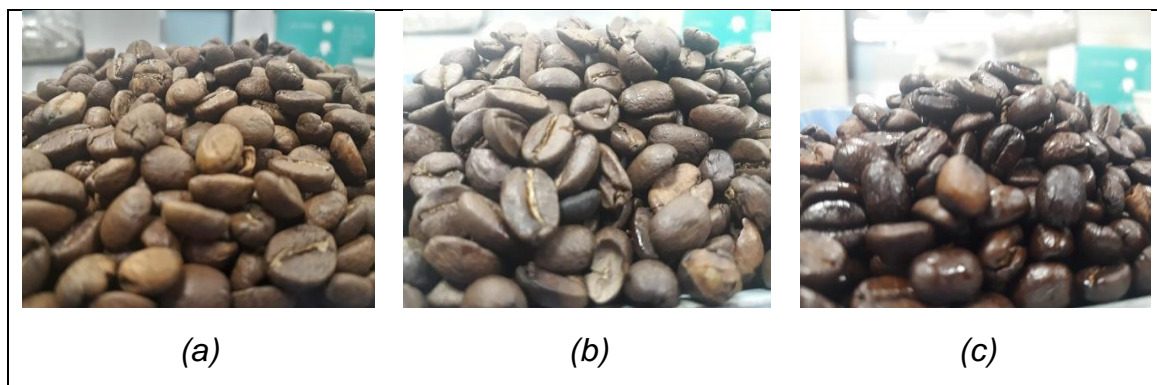
Fuente: ANGELONI, Giulia et. Al. What kind of coffee do you drink? An investigation on effects of eight different extraction methods. *Food Research International*. 2019, Vol. 116, p. 1327-1335. ISSN 09639969.

3.1.2.2 Calificación sensorial. Esta variable se obtuvo como resultado de la evaluación sensorial realizada de acuerdo al procedimiento establecido por la empresa Racafé y sujeto a la NTC 3566, este procedimiento se describió en el numeral 2.2.3.8 del segundo capítulo, y se realizó para cada muestra con su respectivo tratamiento de acuerdo al diseño de experimentos planteado, a diferencia de la evaluación sensorial realizada en el segundo capítulo del trabajo, en la cual, el objetivo fue obtener el perfil sensorial de cada muestra de CAFÉ VERDE como un parámetro de caracterización y agrupación de los flujos de salida de Racafé. El resultado analizado a partir de esta metodología corresponde a la impresión global asignada por el catador para cada muestra, debido a que se trabajó con un panel compuesto por tres catadores, se usó como medida de tendencia central la moda, como se mencionó en el numeral 2.2.3.8.

3.1.3 Factores perturbadores. También denominados factores ruido, son aquellos factores que pueden influir en la variable respuesta, pero en los cuales no hay un interés específico por analizar. De acuerdo a esta definición, se estableció que se puede presentar variabilidad en los resultados del experimento debido a:

3.1.3.1 Humedad del ambiente. La humedad del ambiente al que están expuestas las muestras de café, puede añadir variabilidad a los resultados debido al proceso de oxidación natural que presenta el grano de café, este fenómeno se observa mediante la formación de gotas aceitosas sobre la superficie del grano de café tostado y se presenta con mayor intensidad en los granos de café tostado oscuro, a pesar de los esfuerzos realizados para la correcta conservación de las muestras de café tostado, dicho fenómeno se observó en las muestra de café trabajadas y se muestra en la ilustración 11.

Ilustración 11. Proceso de oxidación observada en las muestra con tosti3n a). Clara, b). Media y c). Oscura.



Fuente: elaboraci3n propia.

Se puede deducir a partir de la ilustraci3n 11, que el fen3meno de oxidaci3n lip3dica del grano se intensifica en las muestras de caf3 con tosti3n oscura, lo cual indica que, a mayor tiempo de tosti3n, se da lugar a la degradaci3n parcial de compuestos que contribuyen a la actividad antioxidante del grano, entre estos se destacan principalmente los 3cidos hidroxicin3micos, como el 3cido clorog3nico, mientras, como se mencion3 anteriormente, se aumenta el contenido de compuestos de alto peso molecular como las melanoidinas. Aunque 3stas 3ltimas, tambi3n pueden aportar al caf3 cierto grado antioxidante, varios estudios han encontrado que la generaci3n de melanoidinas con capacidad antioxidante solamente ocurre en ciertas fases del proceso de tosti3n, arrojando una mejor inhibici3n de la oxidaci3n lip3dica para grados de tosti3n medios²⁷, lo que sugiere que dichos compuestos se forman en las etapas intermedias de la reacci3n de Maillard, y se degradan en los pasos posteriores de dicha reacci3n, todo esto disminuye finalmente la capacidad de los granos de caf3 para resistir este fen3meno para mayores tiempos de tosti3n.²⁸

3.1.4 Matriz de experimentos. A partir de los factores y los niveles establecidos, se obtiene un dise1o factorial 6*3*3 que corresponde a los seis niveles de caf3 (M-13, M-14/15, M-16, M-17, M-18 y M-RC), tres niveles de tosti3n (clara, media, oscura) y 3 niveles de molienda (gruesa, media, fina), para un total de 54 tratamientos, donde para cada uno de estos se realizaron cinco r3plicas. La tabla

²⁷ DEL CASTILLO, Maria Dolores et. Al. Effect of roasting on the antioxidant activity of coffee brews. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002, Vol. 50, p. 3698-3703. Doi.org/10.1021/jf011702q

²⁸ DEL PINO GARCÍA, RAQUEL. Influencia del grado de tostado sobre la capacidad antioxidante y el efecto genoprotector del caf3 soluble. Contribuci3n de la fracci3n de melanoidinas. [en l3nea]. Tesis de m3ster en seguridad y biotecnolog3a alimentaria. Universidad de Burgos, Burgos: 2011. [Consultado 12, junio, 2019]. Disponible en: http://riubu.ubu.es/bitstream/10259.1/128/1/Pino_Garc%C3%ADa.pdf

14 muestra la matriz de experimentos obtenida, donde cada elemento de la matriz corresponde un tratamiento denominado $T_{i,j,k}$ con el cual se obtuvo un valor específico de las variables respuesta establecidas.

Tabla 14. Matriz de experimentos obtenida del diseño factorial 6*3*3.

		CAFÉ (Factor i)						
		M-13	M-14/15	M-16	M-17	M-18	M-RC	
TOSTIÓN (Factor j)	Clara (Nivel 1)	$T_{13.1.1}$	$T_{14/15.1.1}$	$T_{16.1.1}$	$T_{17.1.1}$	$T_{18.1.1}$	$T_{RC.1.1}$	Gruesa (Nivel 3)
		$T_{13.1.2}$	$T_{14/15.1.2}$	$T_{16.1.2}$	$T_{17.1.2}$	$T_{18.1.2}$	$T_{RC.1.2}$	Media (Nivel 2)
		$T_{13.1.3}$	$T_{14/15.1.3}$	$T_{16.1.3}$	$T_{17.1.3}$	$T_{18.1.3}$	$T_{RC.1.3}$	Fina (Nivel 1)
	Media (Nivel 2)	$T_{13.2.1}$	$T_{14/15.2.1}$	$T_{16.2.1}$	$T_{17.2.1}$	$T_{18.2.1}$	$T_{RC.2.1}$	Gruesa (Nivel 3)
		$T_{13.2.2}$	$T_{14/15.2.2}$	$T_{16.2.2}$	$T_{17.2.2}$	$T_{18.2.2}$	$T_{RC.2.2}$	Media (Nivel 2)
		$T_{13.2.3}$	$T_{14/15.2.3}$	$T_{16.2.3}$	$T_{17.2.3}$	$T_{18.2.3}$	$T_{RC.2.3}$	Fina (Nivel 1)
	Oscura (Nivel 3)	$T_{13.3.1}$	$T_{14/15.3.1}$	$T_{16.3.1}$	$T_{17.3.1}$	$T_{18.3.1}$	$T_{RC.3.1}$	Gruesa (Nivel 3)
		$T_{13.3.2}$	$T_{14/15.3.2}$	$T_{16.3.2}$	$T_{17.3.2}$	$T_{18.3.2}$	$T_{RC.3.2}$	Media (Nivel 2)
		$T_{1.3.3}$	$T_{2.3.3}$	$T_{3.3.3}$	$T_{4.3.3}$	$T_{5.3.3}$	$T_{6.3.3}$	Fina (Nivel 1)

Fuente: elaboración propia.

3.2 VALIDACIÓN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RENDIMIENTO

El procedimiento de secado establecido en la NTC 4602-1, permite la determinación del rendimiento de la extracción de café y ha sido usado en varias investigaciones colombianas con este objetivo. Sin embargo, debido al tamaño del diseño de experimentos obtenido y reconociendo que es necesaria la determinación del rendimiento para todos los tratamientos obtenidos en el diseño planteado, ya que sólo así se logrará cumplir el objetivo general del presente proyecto, que es evaluar la influencia de los factores “café”, “tostión” y “molienda” sobre el rendimiento de la extracción; se planteó un procedimiento de validación de la metodología establecida por la NTC 4602-1, y la ecuación de obtención del rendimiento a partir de %STD, planteada por Angeloni et al, ya que éste último facilita el cumplimiento del objetivo.

El procedimiento de validación consistió en la extracción de las muestras compuestas establecidas como los niveles de “café”, éstas muestras se tostaron y molieron previamente a la extracción, en un grado de tostión y molienda estándar

(medio), el procedimiento de extracción se realizó con cinco repeticiones en el equipo de extracción por goteo y se determinó el rendimiento de la extracción con la ecuación establecida por Angeloni (ver ecuación 6) a partir del %STD medidos con el refractómetro digital PAL-COFFEE que se mencionó anteriormente.

Posteriormente, se realizó el procedimiento de secado establecido en la norma anteriormente mencionada para cada uno de los extractos. Esto se realizó tomando una alícuota de 10 ml en una cápsula de porcelana, secada en horno previamente, la cual se llevó durante 4 horas a la estufa a 103°C. Cumplido este tiempo, se colocaron en un desecador durante 2 horas más. Finalmente se registró el peso de la cápsula con la muestra seca y se realizó el cálculo del % de sólidos solubles (%SS) y el rendimiento de acuerdo a las ecuaciones 7 y 8. Este procedimiento se realizó por triplicado para cada una de las muestras.

Ecuación 7. Ecuación para la estimación del porcentaje de sólidos solubles.

$$\%SS = \frac{m_4 - m_o}{m_3 - m_o} * 100\%$$

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Determinación del rendimiento de extracción y de los sólidos solubles en la bebida de café. Método por goteo directo. NTC 4602-1. Bogotá D.C. 1999. 5 p.

Ecuación 8. Ecuación para la estimación del rendimiento de extracción a partir de secado.

$$\%RE = \%SS * \frac{m_2}{m_1} * 100$$

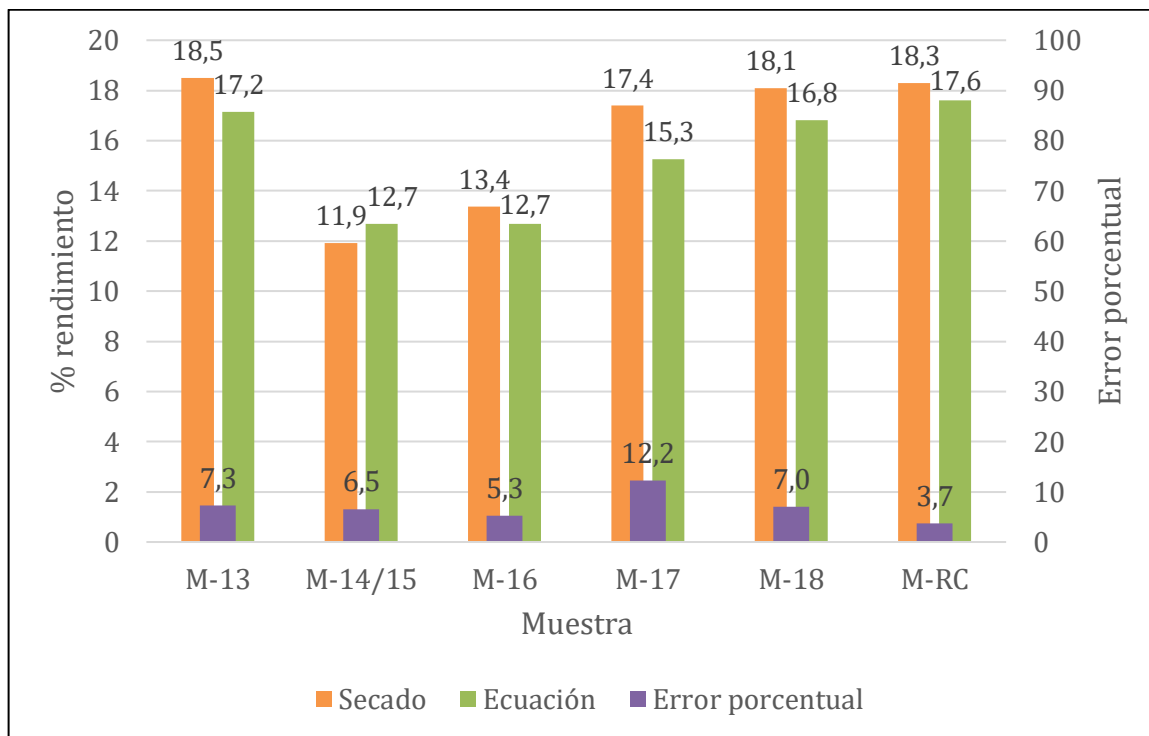
Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Determinación del rendimiento de extracción y de los sólidos solubles en la bebida de café. Método por goteo directo. NTC 4602-1. Bogotá D.C. 1999. 5 p.

Donde, m_o corresponde a la masa en gramos, de la cápsula metálica con la tapa, m_1 a la masa, en gramos, de la muestra de café tostado y molido usado en la extracción (17 g, ver cuadro 3), m_2 a la masa, en gramos, de la bebida total obtenida (determinado en la extracción), m_3 a la masa, en gramos, de la alícuota de la bebida usada y m_4 es la masa, en gramos, de la cápsula metálica y su tapa con la muestra evaporada.

A partir de los resultados obtenidos para cada metodología se analizó la validez de la ecuación planteada por Angeloni con respecto a la norma mencionada y se planteó un factor de corrección de la ecuación con respecto a los valores

obtenidos con el procedimiento de la norma técnica. Los valores de rendimiento obtenidos para cada metodología se presentan en el anexo H y se resumen en la figura 16.

Figura 16. Relación entre los rendimientos obtenidos para cada método.



Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la figura 16 muestran un comportamiento similar en el rendimiento obtenido a partir de las dos metodologías y no se presenta una variación significativa en el rendimiento obtenido por cada técnica, esto se refleja en el valor del error porcentual, el cual no es mayor del 10%, excepto para la muestra M17, la cual se alejó en aproximadamente 12% del valor obtenido por el procedimiento de la norma. Por otro lado, se observa que el rendimiento obtenido mediante el secado es superior al estimado mediante la ecuación en la mayoría de los casos, excepto para la muestra M-14/15, posiblemente esto se debe al tiempo de enfriamiento que se dio a las muestras posterior a la extracción, donde posiblemente parte de los sólidos que se extrajeron se precipitaron al fondo del recipiente, pues como se sabe, la solubilidad en agua de la mayoría de las sustancias aumenta con la temperatura y viceversa, por ende, en el momento de medir el %STD con el refractómetro, lo cual se hizo tomando una gota del extracto por medio de una pipeta plástica y poniéndola sobre el lector del refractómetro, se generó una lectura de %STD errónea o menor en cuanto no se consideraron los sólidos extraídos que se pudieron precipitar. Por lo que se recomendó la agitación del extracto frío previamente a la medición del %STD con el refractómetro.

3.3 EXTRACCIÓN DE CAFÉS COMERCIALES

Se realizó la extracción de muestras de café tostado y molido comerciales con el fin de obtener resultados comparativos, se analizaron dos muestras de café de la empresa Colcafé, en sus líneas, Sello Rojo Tradicional y Sello Rojo Vive. Por otro lado, se analizaron también cuatro muestras de preparaciones comerciales de café verde provenientes de las trilladoras de Racafé de Pereira (RP), Santander (RS), Huila (RH) y Armenia (RA).

Las cuatro muestras de café de Racafé, corresponden a productos de café verde comerciales de las trilladoras mencionadas, por ende, fueron tostadas y molidas a grados estándar (medio), para posteriormente llevar a cabo la extracción mediante la misma metodología de extracción que se realizó a todos los tratamientos del diseño de experimentos (ver numeral 3.1.2.1), a partir de esto se obtuvieron los rendimientos de estos productos de café comerciales con el fin de tener un punto de comparación para los rendimientos obtenidos mediante el diseño de experimentos.

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.4.1 Análisis estadístico. Se realizó un análisis de varianza ANOVA mediante el cual se analizaron los efectos de los factores planteados y de sus interacciones en el rendimiento de la extracción. Además, se aplicó una prueba comparativa usando el método de Tukey, con el fin de comparar internamente los niveles de cada factor y determinar si los niveles planteados son significativamente diferentes entre sí. Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software de estadística Minitab 18.

3.4.2 Selección de los mejores extractos. A partir de los resultados de rendimiento y calificación sensorial obtenidos, se buscó seleccionar el mejor tratamiento tostión-molienda para cada nivel del factor café, para lo cual se utilizó la metodología de la matriz de Richman, ésta consiste en una técnica de selección por ponderaciones, que parte del planteamiento de los criterios determinantes para la selección de las posibles opciones.

El rendimiento obtenido en la extracción se planteó como medida de la eficiencia económica de la muestra, esta eficiencia operacional, claramente debe ir sujeta a la penetración en el mercado que la muestra presente; debido a que el café, se comercializa mayoritariamente como una bebida, cuya penetración en el mercado se maximiza si se logra su preferencia por parte del consumidor, ésta variable de percepción se define, en el caso de los productos alimenticios por medio de la calidad sensorial, por ende la variable que se consideró en el presente trabajo fue la impresión global asignada por el panel de catación de Racafé.

Una vez establecidos los criterios de interés, se asignó el peso o porcentaje de ponderación a cada uno, este parámetro permite definir un orden de prioridad en los criterios planteados y se establece de acuerdo al objetivo del proyecto. Para el presente trabajo, se asignaron los pesos que se muestran en el cuadro 4, con base en las indicaciones y las prioridades de la empresa, considerando además que la calidad sensorial comprende una evaluación con tendencial subjetiva, mientras el rendimiento de la extracción comprende un procedimiento más objetivo.

Cuadro 4. Pesos establecidos para cada criterio de valoración.

Criterio	Peso establecido
Calificación sensorial	50%
Rendimiento de extracción	50%

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se planteó la escala de valoración de los criterios, como se describió anteriormente, la impresión global fue calificada por el panel de catación en un rango de 0 a 5, donde 0 corresponde a una taza defectuosa y 5 a una taza sobresaliente (ver cuadro 1), la escala de valoración de ésta variable ya se encuentra definida dentro del procedimiento mismo de evaluación sensorial. Por otro lado, la variable rendimiento de extracción, corresponde a valores continuos, razón por la cual se utilizó la metodología de percentiles con el objetivo de generar los rangos de valoración del rendimiento dentro de la misma escala que se tiene para la impresión global. A partir de este procedimiento se obtuvo la escala presentada en la tabla 15.

Tabla 15. Escala de valoración del rendimiento de extracción a partir del cálculo de percentiles.

Rendimiento de extracción (%)	Clasificación	Calificación
0	Nulo	0
10,7	Bajo	1
10,71-14,74	Medio-bajo	2
14,75-18,89	Intermedio	3
18,90-21,83	Medio-alto	4
21,84-28,39	Alto	5

Fuente: elaboración propia.

La tabla 15 se construyó a partir de los resultados de rendimiento de extracción obtenidos para todas las muestras del diseño de experimentos, los cuales se analizan más adelante (ver numeral 3.5.2), de acuerdo a estos resultados se observa que los valores de rendimiento obtenidos oscilan en un rango de 10,7-

28,39%, por lo cual la calificación de 1 será asignada a la muestra que presentó el rendimiento de 10,7%. El valor de cero en el rendimiento se incluyó solamente de forma conceptual, representando una extracción en blanco, en la cual el contenido de sólidos extraídos es nulo.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSION

3.5.1 Análisis estadístico. La caracterización completa de los extractos con respecto a rendimiento y calificación sensorial obtenida se presenta en el anexo I. El análisis de varianza se aplicó para los resultados de rendimiento para el cual se obtuvo una bondad de ajuste de 86%.

Se realizó el análisis estadístico en el mismo software con los datos obtenidos de calificación sensorial de cada extracto, sin embargo el modelo no generó un ajuste aceptable (menor al 20%), lo que se atribuyó al hecho de, ésta variable respuesta se define como una variable categórica, que junto a los factores planteados, que también son categóricos, generaron inconvenientes en el ajuste del análisis de varianza que se planteó. Sin embargo, el análisis estadístico de la calificación sensorial no es el procedimiento indispensable para el logro del objetivo del presente proyecto, como si lo es el análisis estadístico de la variable rendimiento de extracción, por ende, los resultados sensoriales se usaron solamente para la selección de los mejores tratamientos, resultados que se analizarán más adelante.

La tabla 16 presenta los resultados del análisis de varianza del rendimiento, mostrándose en la columna uno la fuente de variación, entre los cuales se ubican los tres factores analizados, pero además se presentan las interacciones dobles del modelo, con su respectivo valor del estadístico p en la segunda columna. Cuanto menor sea el valor del estadístico comparado con el nivel de significancia en su valor decimal (0,05) más significativa será la influencia del factor.

Tabla 16. Resultados del análisis de varianza para cada factor y sus interacciones.

Fuente	Valor p
Café	0,027
Tostión	0,000
Molienda	0,000
Café*Tostión	0,000
Café*Molienda	0,002
Tostión*Molienda	0,084

Fuente: elaboración propia.

Lo resultados presentados en la tabla 16 establecen que existe influencia estadísticamente significativa de los tres factores analizados bajo un nivel de significancia de 5%, aunque se puede observar que el factor café se encuentra

más cerca del punto de corte (0,05), por lo que se podría decir que hay mayor impacto en el rendimiento con la variación de la tostión y la molienda que del tipo de café que se utiliza. Con respecto a las interacciones dobles, tienen influencia estadísticamente significativa la interacción café*tostión y café*molienda, pero no la interacción tostión*molienda, la cual presenta una probabilidad superior al nivel de significancia.

Los resultados obtenidos concuerdan con los reportados por Castaño y colaboradores²⁹ quienes evaluaron el rendimiento de la extracción de café, analizando además la influencia del cambio del método de extracción, para lo cual encontraron que, en su orden de probabilidad los factores que influyen mayormente la variable fueron la molienda, el tipo de extracción, la interacción molienda*extracción, el tipo de café y la tostión. Éste autor reporta rendimientos en un rango de 13-23% aproximadamente, determinados mediante el procedimiento de secado establecido por la NTC 4602-1; como se mencionó en el numeral 3.4.2. los rendimientos obtenidos en el presente trabajo se obtuvieron en un rango de 10-28% aproximadamente, variando significativamente con el grado de molienda, la diferencia en el rango obtenido puede estar asociada a los niveles de tostión y de café que se trabajaron, debido a que la molienda fue definida por el autor, de acuerdo al procedimiento establecido por la NTC 2441 y a los rangos de la NTC 3534, de la misma forma que se realizó en este trabajo. Por otro lado, se ha reportado que el método de extracción es una variable estadísticamente significativa sobre el rendimiento³⁰, por lo cual los resultados obtenidos pueden variar de forma importante al cambiar de un método de extracción a otro. Además del método, Medina et. Al³¹ estos autores encontraron que cada equipo presenta una eficiencia de extracción diferente, estableciendo que el equipo de extracción utilizado también influye sobre los resultados obtenidos, por lo que no se puede asumir una eficiencia del equipo del 100%. Los resultados aquí presentados se definen por las condiciones utilizadas y el diseño de experimentos planteado; manipular o variar el método de extracción fue algo que no se planteó dentro del alcance del presente trabajo, sin embargo se puede plantear la necesidad de corroborar la eficiencia del equipo previamente a su uso.

Las tablas 17,18 y 19 presentan los resultados de la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%, se muestran los niveles trabajados por cada factor, en la primera columna de las tablas y en la segunda columna la agrupación obtenida para cada nivel, estableciéndose que, niveles que no comparten letra no presenta diferencia significativa entre sí.

²⁹ CASTAÑO CASTRILLÓN, José Jaime et. Al. Caracterización del rendimiento de extracción y del contenido de sólidos solubles de la bebida de café. Cenicafé. 2000, Vol. 51, Nro. 3, p. 253-263. ISSN 185195.

³⁰ Ibid.

³¹ MEDINA ALMEIDA, Javier Leonardo & RIAÑO LUNA, Campo Elías. Evaluación del rendimiento de extracción de algunas cafeteras. Cenicafé. 2006, Vol. 57, Nro. 1, p. 31-36.)

Tabla 17. Resultados de prueba comparativa Tukey para el factor café.

Café	Agrupación
M-13	A
M-RC	AB
M-17	AB
M-14/15	AB
M-18	AB
M-16	B

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 17 se observa que los niveles trabajados para el factor café, donde cada uno representa una corriente de salida del proceso de Racafé, no presentan diferencia significativa con respecto al rendimiento obtenido, excepto entre las muestras M-13 y M-16, donde no se encontró una correlación de estos resultados con respecto a la caracterización física que se realizó a cada muestra y que se describió en el segundo capítulo del presente trabajo. Sin embargo, como se verá más adelante, fue para estas dos muestras para las cuales se obtuvo el mayor rendimiento medio (muestra M-13 con 17,0707%) y el menor valor de rendimiento (muestra M-16 con 15,8535%) bajo el efecto individual del factor café (ver figura 17).

Tabla 18. Resultados de prueba comparativa Tukey para el factor molienda.

Molienda	Agrupación
Fina	A
Media	B
Gruesa	C

Fuente: elaboración propia.

Tabla 19. Resultados de prueba comparativa Tukey para el factor tosti3n.

Tosti3n	Agrupaci3n
Clara	A
Oscura	B
Media	C

Fuente: elaboraci3n propia.

Con respecto a las tablas 18 y 19, las cuales presentan los resultados de la prueba de Tukey para los factores molienda y tosti3n respectivamente, se observa que los tres niveles planteados generaron rendimientos significativamente diferentes entre s3, para ambos factores. A pesar de que el tiempo establecido

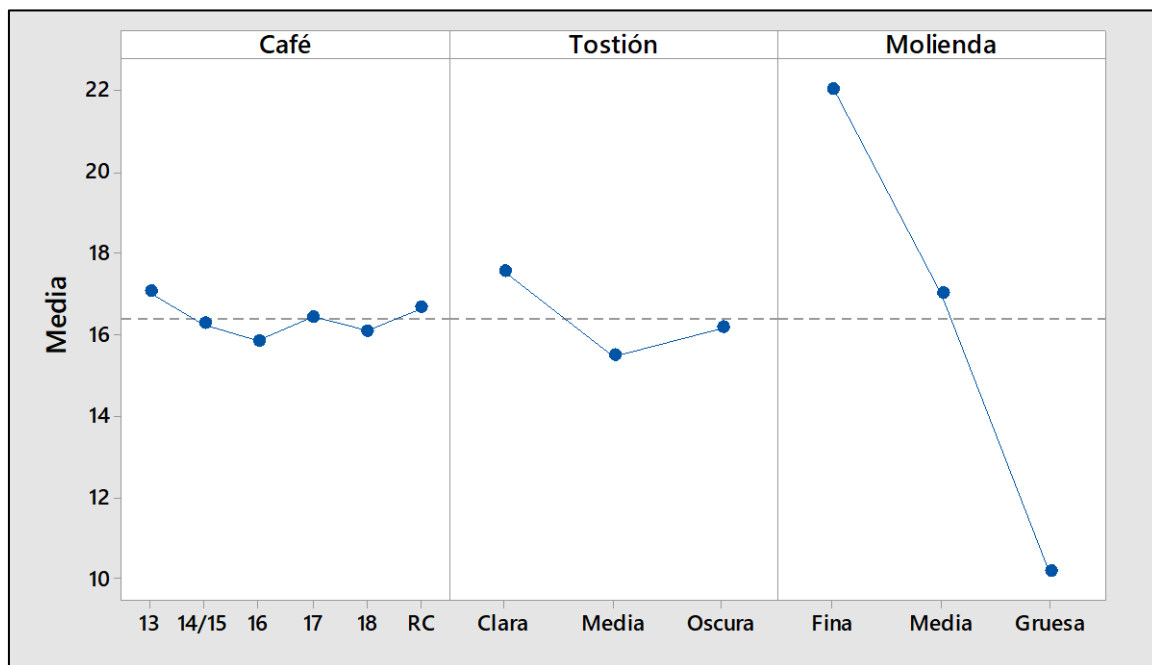
para cada nivel de tuestión no varió en gran medida (7-10 minutos) permitió obtener rendimientos medios significativamente diferentes bajo un nivel de significancia del 5%, lo que sugiere una gran sensibilidad del rendimiento con respecto al efecto de la tuestión.

La figura 17 permite observar el efecto individual de los factores planteados sobre el rendimiento medio. En el cuadro izquierdo, se observa el efecto individual del factor café con los seis niveles establecidos, ésta figura, indica que si el rendimiento dependiera solamente del tipo de café, el mayor valor estaría dado para la muestra M-13 (17,07%), seguido de la muestra M-RC (16,67%). Actualmente, en la industria cafetera, se relaciona el alto contenido de granos defectuosos en las muestras de café verde con bajos rendimientos de extracción, esta afirmación parece ser cierta para métodos de extracción en olla abierta usados generalmente con moliendas gruesas,³² pero no concuerda con los resultados del presente trabajo, ya que, los mejores rendimientos se obtuvieron con las muestras que presentaron el mayor contenido de granos defectuosos de acuerdo a la caracterización realizada en el segundo capítulo del trabajo. Cuéllar y Castaño³³ reportaron resultados similares, obteniendo mejores rendimientos de extracción para muestras de café con alto contenido de pasillas o granos defectuosos cuando se usa la extracción por goteo, indicando que estos resultados se presentan debido a que, al tostar y moler un café pasilla se produce una mayor cantidad de partículas finas, que dado el caso pueden atravesar el filtro utilizado en la extracción, aumentando así el contenido de sólidos solubles en el extracto y por ende arrojando mejores rendimientos de extracción.

³² Op. Cit.

³³ CUÉLLAR SOÁRES, Paula Cristina & CASTAÑO CASTRILLÓN, José Jaime. Influencia de la materia prima, del grado de tuestión y de molienda en la densidad de café tostado y molido y en algunas propiedades del extracto obtenido. Cenicafé. 2001, Vol. 52, Nro.2, p. 127-140.

Figura 17. Gráfica de efectos principales para el rendimiento.



Fuente: elaboración propia.

En el segundo recuadro, se observa el efecto individual del factor tostión sobre el rendimiento de extracción, a partir de la inclinación de la pendiente de las líneas que unen los niveles de tostión, se puede deducir que el efecto de este factor presenta una influencia mayor que la provista por el factor café (pendientes menos inclinadas). La tostión es el proceso de transformación del grano de café verde previo a la extracción mas complejo, debido a que comprende cambios fisicoquímicos en el grano, por lo que probablemente su efecto sobre el rendimiento encierra una mayor cantidad de variables que puede incluir el carácter de solubilidad de los compuestos formados en el grano. Se observa que el factor presenta claramente un nivel predominante, que es la tostión clara, con éste se obtiene un rendimiento medio incluso superior a la media global de los niveles de tostión media y oscura, que es de 14,7%, Díaz et. Al.³⁴ Indicaron que estos resultados se deben a que el tiempo de tostado incide sobre la transformación y solubilización de los azúcares, los ácidos orgánicos, las sales y demás compuestos solubles en agua presentes en el café; degradándose a otros compuestos en tanto es mayor el tiempo de tostión. Los resultados también concuerdan con Clarke et. Al.³⁵, este autor establece que frecuentemente los cafés

³⁴ DÍAZ, Félix O., et. Al. Efecto de la tostión del café (*Coffea arábica* L. var Castillo) sobre el perfil de taza, contenido de compuestos antioxidantes y la actividad antioxidante. *Información Tecnológica*. 2018, Vol. 29, Nro. 4, p. 31-42. ISSN 07180764

³⁵ CLARKE, R. & MACRAE, R. *Coffe Technology*. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1989. 321 p. ISBN 139789401080286

con tostiones “rápidas” proporcionan una mayor cantidad de sólidos solubles aumentando el rendimiento de la extracción.

Por otro lado, la tostión oscura generó un mayor rendimiento medio que la tostión media, este resultado no concuerda con algunas referencias consultadas, en las cuales establecen que los mayores tiempos de tostión producen la degradación de compuestos solubles en agua hacia compuestos de mayor peso molecular cuya extracción usando agua se dificulta. Clarke et. Al indica que en la extracción de café, todos los compuestos son extraídos en mayor o menor grado, excepto el aceite de café y la lignina cuya eficiencia de extracción se encuentra generalmente entre 1 al 5%, por lo que si se usan tostados oscuros se esperaría que el rendimiento de la extracción sea menor por la presencia de un mayor contenido de estos compuestos. Sin embargo, Cuéllar indica que entre mayor sea el grado de tostión, más quebradizo es el café y menor es el tamaño de las partículas producidas en la molienda³⁶, lo cual podría explicar los resultados obtenidos en este trabajo.

En el último recuadro de la figura 17, se observa el efecto individual del factor molienda. Para este factor se observan pendientes muy inclinadas por lo que se deduce que es el factor que mayor influencia sobre el rendimiento obtenido, lo que demuestra que, aunque efectivamente la tostión es la operación en la cual se conforman las propiedades del sabor y aroma del grano de café tostado, debido a que es el proceso en el cual se presentan transformaciones químicas; la superficie de contacto entre el sólido y el solvente, proporcionada mediante la molienda, puede definir en mayor medida el rendimiento del proceso.

Como se esperaba, el rendimiento aumenta significativamente en cuanto mayor es la reducción del tamaño de partícula de la muestra tostada, obteniéndose el mayor rendimiento del modelo con una molienda fina. Este resultado es claramente coherente con el hecho de que el tamaño de partícula, establece el área de contacto que se tendrá entre el café y el agua, en cuanto el tamaño es menor, el área de contacto se maximiza y con esto aumenta la eficiencia de la extracción, ya que se logra un mayor penetración del solvente en el sólido, mientras una molienda gruesa, da lugar a que una mayor cantidad de sólidos permanezcan atrapados en el interior de la partícula de café tostado y molido.

Por otro lado, Guevara³⁷ indica que, existen falencias importantes en el procedimiento establecido por la NTC 2441 para determinar el tamaño promedio de partícula de una muestra de café tostado y molido, principalmente para la

³⁶ CASTAÑO CASTRILLÓN, José Jaime et. Al. Caracterización del rendimiento de extracción y del contenido de sólidos solubles de la bebida de café. Cenicafé. 2000, Vol. 51, Nro. 3, p. 253-263. ISSN 185195.

³⁷ GUEVARA BARRETO, Ricardo Alfonso & CASTAÑO CASTRILLÓN, José Jaime. Caracterización granulométrica del café colombiano tostado y molido. Cenicafé. 2005, Vol. 56, Nro.1, p. 5-18.

molienda fina, ya que se presentan fenómenos de obstrucción y aglomeración en el análisis granulométrico establecido por la NTC 2441. Este fenómeno se presenta con mayor frecuencia en la molienda fina de cafés tostados hasta un grado oscuro, debido a la exudación de aceite del grano de café, producto de la oxidación lipídica que se mencionó en este trabajo. Este autor encontró que el problema es mayor, en tanto mayor es la cantidad de muestra que se usa para el análisis granulométrico, por ende recomienda utilizar una menor cantidad de muestra que la establecida en la NTC 2441, lo cual se realizó en el presente trabajo, y aunque no se evidenció la obstrucción de los tamices, si se observó la formación de aglomeraciones entre partículas de café de la muestra. Todos estos errores procedimentales, generan que la molienda fina se caracterice con valores de tamaño de partícula superiores a $430\mu\text{m}$, cuando en realidad se agrupa en valores entre 250 y $380\mu\text{m}$, probablemente esto podría explicar la gran diferencia en el rendimiento medio logrado con la molienda fina con respecto a los otros dos niveles (para media 5% y para gruesa 12% aproximadamente). Ésta observación plantea la necesidad de validar los valores de molienda planteados mediante una técnica más robusta, como por ejemplo la difracción de rayos láser.

A partir del modelo obtenido se determinó la ecuación 9, ésta permite estimar el rendimiento de la extracción a partir de los factores que se plantearon en este trabajo.

Ecuación 9. Ecuación del modelo para la estimación del rendimiento de extracción en función del tratamiento aplicado.

$$\bar{R}(\%) = 16,407 + 0,664i_{13} - 0,135i_{14} - 0,553i_{16} + 0,046i_{17} - 0,295i_{18} + 0,273i_{RC} + 1,143j_1 - 0,918j_2 - 0,225j_3 + 5,644k_1 + 0,593k_2 - 6,237k_3$$

Fuente: elaboración propia.

El modelo calcula el valor de la media del rendimiento obtenido para la cantidad de experimentos totales realizados, es decir, para los 54 tratamientos aplicados; la cual fue de 16,407, a este valor se le aplica el coeficiente correspondiente al nivel usado para cada factor, por ende, las variables i_n, j_n y k_n son variables binarias, que toman el valor 1 indicando que se usó n-nivel para el factor correspondiente, de lo contrario se le asignara el valor cero (0); por ejemplo, si en el procedimiento se utilizó una muestra M-16 a la cual se le aplicó una tostión clara y una molienda fina, el valor del rendimiento estimado se calcularía, a partir de la ecuación del modelo como:

Ecuación 10. Uso de la ecuación del modelo para estimar el rendimiento de extracción.

$$\bar{R}(\%) = 16,407 - 0,553 + 1,143 + 5,644 = 22,641\%$$

Fuente: elaboración propia.

3.5.2 Selección de los mejores tratamientos. A partir del procedimiento planteado para seleccionar las mejores muestras, se construyó una matriz de Richman para cada nivel de café, esto con el fin de obtener para cada uno de ellos, el mejor tratamiento tostión-molienda de acuerdo al rendimiento que se obtiene y a la calidad de la bebida determinada como la impresión global asignada mediante el análisis sensorial o catación.

Las seis matrices se presentan en el anexo J, donde cada elemento de la matriz corresponde a la calificación obtenida para cada combinación tostión-molienda, la tabla 20 presenta la matriz realizada para la muestra M-13, para la cual, el mejor tratamiento se obtuvo con tostión clara y molienda fina.

Tabla 20. Matriz de Richman para la muestra compuesta M-13.

M-13	Tostión		
Molienda	1	2	3
1	3,2	3,2	3,2
2	1,8	3	3
3	2	2	2

Fuente: elaboración propia.

Cada elemento de la matriz se calculó mediante la metodología de ponderación de 50% para el criterio de rendimiento y 50% para el criterio de calificación sensorial, debido a que ambos indicadores se manejaron en una escala de 0 a 5, el mayor valor que se puede obtener en cualquier elemento de la matriz es de 5. En la matriz presentada en la tabla 20, el mayor valor fue de 3,2 y se obtuvo para los tres niveles de tostión con una molienda fina, por ende, para seleccionar un solo tratamiento entre estos tres se recurrió al valor exacto del rendimiento obtenido, ya que, como se describió en el numeral 3.4.2. la escala de valoración del rendimiento se generó a partir del cálculo de los percentiles de todos los rendimientos, de esta forma, se seleccionó finalmente el tratamiento tostión-molienda con el mayor valor de rendimiento.

Con esta metodología aplicada a cada nivel del factor café, se seleccionaron los tratamientos que se presentan en la tabla 21, en esta se presenta además el rendimiento y la calificación sensorial obtenida para cada tratamiento, así como el puntaje total en la matriz de Richman.

Tabla 21. Resumen de los mejores tratamientos obtenidos para cada muestra compuesta.

Muestra	Tostión	Molienda	Rendimiento (%)	Calificación sensorial	Puntaje total (matriz de Richman)
M-13	Clara	Fina	24,266	2	3,2
M-14/15	Oscura	Fina	21,353	3	3,8
M-16	Oscura	Fina	23,372	3	3,8
M-17	Clara	Fina	24,205	3	3,8
M-18	Oscura	Fina	19,642	2	2,8
M-RC	Media	Fina	21,824	4	4,4

Fuente: elaboración propia.

A partir de la metodología de selección multicriterio establecida se obtuvo que las muestras M-13 y M-17 arrojaron los rendimientos de extracción más altos con una tostión clara, por lo que una vez más, se cree que los cafés tostados "rápidos" proporcionan porcentajes más altos de sólidos solubles que los tostados convencionalmente. Las muestras M-14/15, M-16 y M-18 arrojaron mayores rendimientos de extracción con tostiones oscuras, por lo que se confirma la creencia de que la tostión oscura provee granos con una estructura más quebradiza y genera en la tostión partículas más finas que mejoran la transferencia de masa entre el café y el agua y por ende mejoran la eficiencia de la extracción. La muestra de rechazos colorimétricos (M-RC) arrojó un valor de rendimiento significativo si se considera que comúnmente se asocia el contenido de granos defectuosos con bajos rendimientos.

La impresión global representa la sumatoria que el catador en su proceso sensitivo realiza como resultado de todos los atributos que percibe, por tal razón, la variable que se consideró fue la impresión global, por lo cual, un mayor valor en impresión global indica una mayor aceptación de ese tipo de café en el mercado colombiano. Tras la socialización de los resultados sensoriales con el panel de catación de Racafé, estos concordaron en que la baja calificación obtenida para las muestras M-13 y M-18 se debe a la presencia de tazas sucias, es decir, sabores o percepciones no propias del café, lo que probablemente se relaciona con el alto contenido de material extraño e impurezas obtenido en las muestras de café verde (ver numeral 2.3.2). Además de esto, la muestra M-18 también fue descrita con sabores "amargos", Cheng et. Al.³⁸ Indican que los flavonoides son responsables de conferir sabor amargo al café por su contenido de fenoles en su estructura. No obstante, también el proceso de tostión puede conferir sabor amargo al café, así pues para tostiones oscuras aumenta el sabor amargo de la bebida, además se incrementa el contenido de taninos que también aportan notas de astringencia.

³⁸ CHENG, B. et. Al. Influence of genotype and environment on coffee quality. *Trends Food Science and Technology*. 2016, Vol. 57, p. 20-30. Doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.003

Mientras tanto, las tostiones claras generan notas ácidas, aunque para la evaluación sensorial aquí realizada no se logró establecer esta relación, la percepción de sabores ácidos en cafés con baja tostión, parece estar relacionada con la presencia de ácidos clorogénicos, los cuales aportan acidez, astringencia y también notas amargas a la bebida, estos compuestos también han sido reconocidos por su alta capacidad antioxidante.³⁹

Por otro lado, la muestra de rechazos colorimétricos, mostró una calificación sobresaliente por parte del panel, siendo la mayor calificación para todas las muestras evaluadas. Esta muestra, de acuerdo al panel, representa claramente la preferencia del mercado colombiano; cabe recordar que dicha muestra, se tomó de la corriente de granos que se rechazan debido a que presentan un color diferente al estándar (verde-azulado), ésta característica se atribuye a la sobrefermentación de los granos, por lo que normalmente se considera negativa en el café verde, sin embargo, las tendencias de consumo de café en Colombia, hacen que sean deseables ya que generan sabores “dulces”, “apanelados” o a “residuos de jarabe de caña” de acuerdo a las descripciones del panel, que no son preferidas en el consumo internacional, pero que son agradables al gusto del consumidor colombiano.

Las muestra M-17 y M-18 presentaron varias calificaciones de defecto como el fenol, el cual es atribuido por los catadores a sabores similares al cloro, por lo que comúnmente se le denomina también “químico”. Cuando estos sabores se reconocen en una muestra de café, comúnmente lo que se hace es repetir el procedimiento para la muestra que lo presentó, con el objetivo de determinar la frecuencia de percepción de este sabor negativo, ya que en la industria del café, rechazar una muestra que se valoró con 5 tazas de 10g, es decir, a partir de 50g de la muestra, podría significar rechazar un lote de 20 mil kg de café del proceso, lo cual, claramente no se justifica. Sin embargo, para el presente trabajo, esta repetición del procedimiento no se llevó a cabo, ya que reduce la reproducibilidad de los resultados presentados.

3.5.3 Resultados de cafés comerciales. Por medio del procedimiento de extracción planteado, se obtuvo el rendimiento de extracción de cuatro muestras de café obtenidas de las plantas trilladoras de Racafé en Pereira (pasilla RP), Santander (Pasilla RP), Huila (Consumo RH) y Armenia (Consumo RA). Además, se analizaron también mediante el mismo procedimiento, el rendimiento de dos muestras de café comercial de la empresa Colcafé, en sus líneas Café Sello Rojo Tradicional (SRT) y Café Sello Rojo Vive (SRV). Los resultados de la extracción de dichas muestras se presentan en la tabla 22.

³⁹ HELCIMOVIĆ. I. et. Al. Comparative study of polyphenols and caffeine in different coffee varieties affected by the degree of roasting. *Food Chemistry*. 2011, Vol.129, p. 991-1000. ISSN 03088146.

Tabla 22. Resultados de extracción de cafés comerciales.

Malla	Rendimiento promedio (%)
Pasilla RP	15,224
Pasilla RS	15,581
Consumo RH	17,550
Consumo RA	17,084
SRT	17,875
SRV	15,090

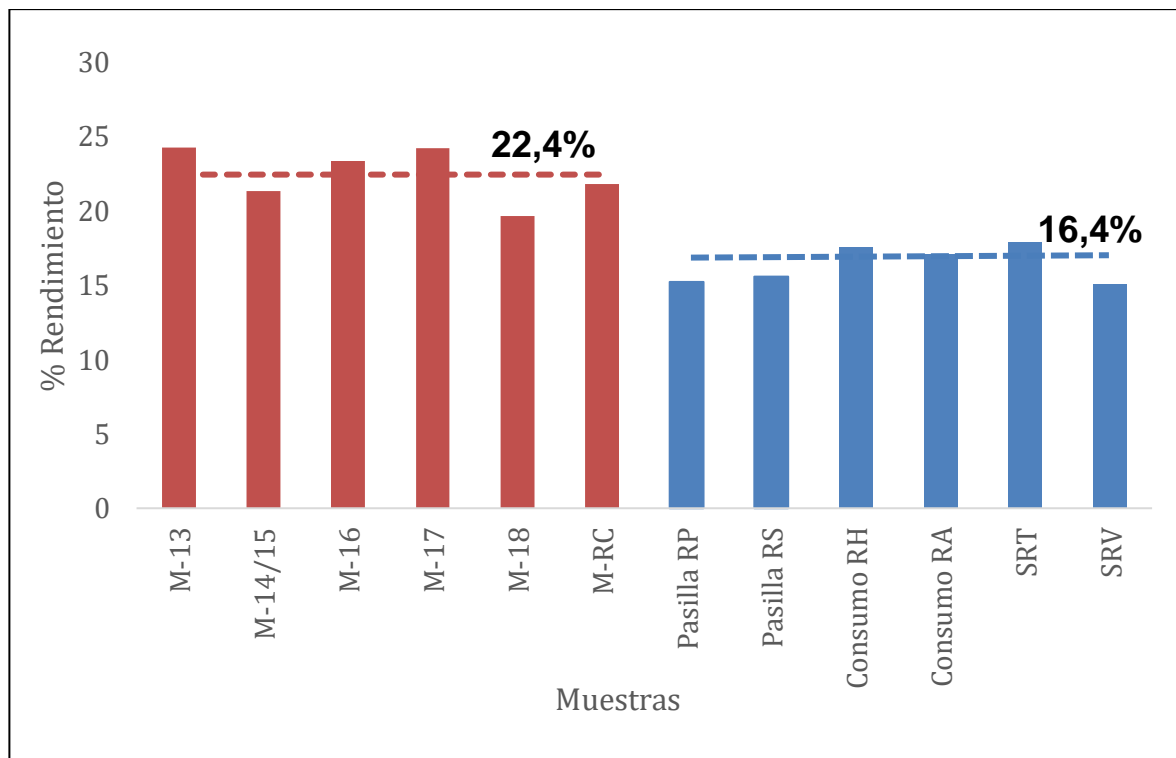
Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 22, el rendimiento obtenido para los productos de café pasilla de las trilladoras Pereira y Santander es inferior que el obtenido para los consumos en aproximadamente 2%, estos productos se diferencian en variables como la densidad, el contenido de ripio y el contenido de granos defectuosos, en las cuales puede residir la variabilidad del rendimiento, éstas muestras fueron tostadas y molidas en grados estándar establecidos por Racafé, por lo que estos resultados no concuerdan con lo mencionado previamente, donde a mayor contenido de granos defectuosos se obtuvieron mejores rendimientos, sin embargo, también se determinó que presenta mayor efecto el tratamiento tostión-molienda, en lo que podría radicar la discordancia de los resultados.

Por otro lado, se observó que la muestra SRV presentaba una tonalidad de color significativamente más clara que la muestra SRT, SRV es una línea de café tostado y molido que ha declarado presentar un mayor contenido de compuestos antioxidantes, lo cual es coherente con el color claro que presenta, debido a que, de acuerdo a con lo consultado en referencias bibliográficas las tostiones claras conservan una mayor capacidad antioxidante. No obstante, el rendimiento obtenido fue inferior al de la muestra más oscura (SRT).

A partir de estos resultados, de los obtenidos para los tratamientos seleccionados mediante la evaluación multicriterio (ver tabla 21) se construyó la figura 18, la cual permite comparar los rendimientos obtenidos en el diseño de experimentos con los que se obtienen a partir de los productos actuales.

Figura 18. Comparación de resultados seleccionados con respecto a los valores actuales obtenidos.



Fuente: elaboración propia.

En la figura 18, se puede observar que el rendimiento promedio de las muestras seleccionadas en el presente trabajo son significativamente superiores (6%) a los rendimientos que se obtuvieron con muestras de café comercializadas actualmente.

La variedad en las propiedades fisicoquímicas del café es un tema tan complejo como que cada grano de café de una misma cosecha puede presentar características diferentes, por lo que su procesamiento en adelante, se desarrollará de forma distinta para cada uno. Los resultados positivos obtenidos en este trabajo, probablemente se deben al uso segregado del café, lo que permitió establecer el tratamiento óptimo (entre los que se plantearon) para cada tipo de café, lo cual indica que, con base en las características del café verde establecidas, se debe aplicar un tratamiento tosti3n-molienda específico con el fin de obtener mejores rendimientos en la extracci3n, esto contribuye a disminuir la posibilidad de que los granos de café con propiedades superiores, se equilibren con granos de menor calidad, como puede estar sucediendo en las mezclas de café que se comercializan actualmente. Con base en esto, se plantea la posibilidad de segregar los componentes de cada mezcla para su procesamiento como café soluble.

4. ANÁLISIS DEL COSTO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS SELECCIONADOS

En base a la estimación del costo del proceso de producción de café soluble, consultado en la bibliografía, se evaluarán las repercusiones de aplicar las condiciones de tostión y molienda con las cuales se obtuvieron los mejores resultados en cata y rendimiento, sobre el costo del proceso, definiendo así, la viabilidad de su aplicación industrial. Además, se plantean algunos aspectos económicos importantes que se generarían para Racafé & Cia, al cambiar de un esquema de venta por “preparaciones” a “ingredientes”, esto en base a la caracterización física obtenida en el capítulo 2 del presente trabajo y a los rendimientos en extracción obtenidos.

4.2 ESQUEMA DE VENTA DE CAFÉ VERDE POR “PREPARACIONES”

Actualmente, Racafé comercializa el café verde producto del proceso de trilla y clasificación como preparaciones, estas son mezclas de los flujos de salida de su proceso que difieren en un mayor o menor contenido de granos defectuosos, representados por ejemplo en el porcentaje de ripio, de defectos mayores o impurezas.

El cuadro 5 presenta las principales preparaciones que Racafé comercializa en el mercado nacional y los precios aproximados para cada una.

Cuadro 5. Preparaciones comercializadas nacionalmente por Racafé.

Preparación	Precio aproximado/kilo
Consumo	\$ 6 500
Pasilla	\$ 5 200

Fuente: elaboración propia, con base en: RACAFÉ & CIA.

Sin embargo, la mezcla que comúnmente se utiliza para la elaboración de café soluble nacionalmente es la pasilla, la cual se compone de los flujos de salida trabajados en el presente trabajo como se muestra en el cuadro 6.

Cuadro 6. Composición de la pasilla comercializada para producción de café soluble.

Flujo de salida	Proporción
Rechazos colorimétricos	20%
Retenido en mallas 16, 17 y 18	40%
Retenido en mallas 13, 14 y 15	40%

Fuente: elaboración propia, con base en: RACAFÉ & CIA.

4.3 ESQUEMA DE VENTAS DE RACAFÉ POR INGREDIENTES

Debido a que, como se mencionó anteriormente, el proceso de trilla y clasificación de café verde presenta un margen de variabilidad debido a la naturaleza misma del café, los flujos de salida obtenidos no son completamente homogéneos en sus características, sino que, en algunos casos, se presenten desviaciones importantes en valores de importancia comercial, como el porcentaje de granos defectuosos o el porcentaje de ripio, la humedad o el tamaño promedio del grano, en este hecho se centra el principal interés de Racafé en modificar el esquema de ventas de estos productos de café verde, ya que esto evita inconvenientes de inconformidad o desacuerdo con el cliente. Sin embargo, la estimación del precio que se pueda acordar para cada flujo por separado, a modo de “ingrediente”, debe ajustarse a la necesidad del cliente, esto debido a que, si bien, el cambio de esquema beneficia directamente el costo del proceso de Racafé, ya que representa un ahorro energético y de mano de obra en operaciones de mezclado y repasado de preparaciones, esto no puede significar un aumento en el costo del proceso del cliente, pues de ser así, se corre el riesgo de perder fidelidad respecto a estos. Por ende, la estrategia de venta de cada flujo por separado debe consistir en persuadir al cliente de la ventaja que tiene al manipular cada ingrediente, completamente caracterizado por Racafé, no solamente en cuanto a las variables comerciales, sino también en cuanto al rendimiento que se puede obtener con cada una.

El cuadro 7 presenta los estándares comerciales establecidos por colcafé, esta información es la base de Racafé para la operación de las operaciones de mezclado de flujos de salida, alcarando que dichas mezclas se hacen mayoritariamente con el café de menor calidad, pues como se mencionó anteriormente, el 90% del café de mayor calidad o excelso es exportado.

Cuadro 7. Requerimientos de los compradores mayoritarios de Racafé.

<i>Denominación del café verde</i>	<i>Chorreados de pergamino</i>	<i>Consumo fresco</i>	<i>Pasilla de máquinas</i>	<i>Pasilla catadoras</i>
Prueba de taza (Escala 1 a 10)	Mínimo 7.5	Mínimo 6	Mínimo 5	Mínimo 5
% ripio	Máximo 1	Máximo 2	Máximo 5	Máximo 7
% de impurezas	Máximo 1	Máximo 1	Máximo 2	Máximo 3
% materia extraña	0	Máximo 0.5	Máximo 0.5	Máximo 0.5
Densidad (g/L)	Mínimo 700	Mínimo 650	Mínimo 600	Mínimo 540
Humedad (%)	Máximo 12	Máximo 12	Máximo 12	Máximo 12

Fuente: elaboración propia, con base en: RACAFÉ & CIA.

Con base en las especificaciones de Colcafé, se construyó la tabla 23 en la cual se clasificó cada uno de los flujos que se muestrearon en este trabajo y con los cuales se trabajó todo el diseño de experimentos. De acuerdo a esto, los flujos pueden pertenecer a uno de tres tipos de productos que compra Colcafé, denominados consumo fresco, pasilla de máquinas y pasillas catadoras, para cada una el precio de compra disminuye en cuanto disminuyen también los requisitos de cada propiedad establecida.

Tabla 23. Clasificación de los flujos muestreados con respecto a las especificaciones de calidad de Colcafé.

Criterio	Muestra compuesta					
	M-13	M-14/15	M-16	M-17	M-18	M-RC
% ripio	Con. Fresco	ch. pergamino	ch. pergamino	ch. pergamino	ch. pergamino	ch. pergamino
% IME*	No cumple	ch. pergamino	ch. pergamino	ch. pergamino	No cumple	ch. pergamino
Densidad (g/L)	Pas. Catadora	Pas. Maquinas	Con. Fresco	Con. Fresco	Pas. Catadora	Con. Fresco
Humedad (%)	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: elaboración propia.**Impureza y materia extraña. Consumo fresco (Con. Fresco); Chorreado de pergamino (ch. pergamino); pasilla de máquinas (pas. Máquinas); Pasilla catadora (pas. Catadora).*

4.4 COSTOS VARIABLES ESTIMADOS DE LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ SOLUBLE

4.4.1 Proceso producción de café soluble. Debido a que no se contó con datos reales del proceso de producción de café soluble de Colcafé, por políticas de confidencialidad de la información, se partió de un proceso de producción base cuyas condiciones de operación se obtuvieron a partir de dos referencias bibliográficas principales de los autores Galindo⁴⁰ y Alcántara y colaboradores⁴¹, en base a estos dos trabajos, se construyó el diagrama mostrado en la figura 19.

Posteriormente, se realizaron los cálculos correspondientes al balance de materia y energía de las operaciones primordiales para la obtención de café soluble, las cuales se definieron en las generalidades del presente trabajo (tostión, molienda,

⁴⁰ GALINDO VELIZ, XIOMARA RAIZA. Producción e industrialización de café soluble. Caso: solubles instantáneos. [en línea]. Tesis, Universidad de Guayaquil, Guayaquil (Ecuador): 2011. [Consultado 25, julio, 2019]. Disponible en: <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/01/Galindo-Veliz-Xiomara-Raiza.pdf>

⁴¹ ALCÁNTARA SÁNCHEZ, Roberto Carlos et. Al. Estudio de prefactibilidad de una planta productora de café soluble con raíz de achicoria. [en línea]. Trabajo de grado, Universidad Autónoma Metropolitana, México: S.F. [Consultado 24, julio, 2019]. Disponible en: <http://148.206.53.84/tesiuami/Evelin.pdf>

extracción, concentración o evaporación del extracto y secado). Posteriormente, se estimó el costo variable de cada una de estas operaciones en base al consumo de servicios que requiere cada uno, debido a que se estableció que la aplicación de los factores analizados en el presente trabajo, a saber, la materia prima, el tiempo de tuestión y el grado de molienda, impactará principalmente los costos de operación, en cuanto modifica algunas de las condiciones actuales de operación. Por ende, no se consideraron los costos debidos al transporte de material, bombeo de fluidos o intercambio de calor de las operaciones complementarias del proceso.

Como se observa en la figura 19, el proceso se dividió en dos partes que se separaron por líneas entrecortadas de dos colores, la primera fase del proceso es la que incluye las etapas de tuestión, molienda y extracción que se trabajaron experimentalmente, mientras la segunda fase del proceso conlleva las operaciones de concentración y secado, que se realizaron en el trabajo solamente para la validación del método de determinación del rendimiento, debido a esto, se hizo la suposición de que no hay pérdidas de los sólidos solubles presentes en el extracto con las operaciones posteriores, es decir, que todos los sólidos disueltos en el extracto se convierten en café soluble.

De esta forma, los costos del proceso se estimaron para cada muestra de café con su debido tratamiento tuestión-molienda seleccionado mediante la matriz de Richman como el tratamiento que generó mejores resultados de rendimiento y calidad de extracto.

4.4.2 Descripción del proceso de producción de café soluble. En este proceso, inicialmente el café verde, se pesa y se alimenta en baches por medio de un transportador de tornillo a un tostador de tambor rotativo por el que circulan gases calientes producto de la cámara de combustión de gas natural, en este el aire alcanza temperaturas aproximadas a 250°C, lo que asegura una rápida transferencia de calor. Posteriormente, el café tostado se deja caer por gravedad en tolvas donde se deposita temporalmente, dando un tiempo de reposo para la liberación de los gases retenidos producto de la tosti3n.

Despu3s de esto, el caf3 tostado se deja caer por gravedad en un transportador de canguilones que alimenta los molinos, donde el caf3 se tritura por acci3n de los discos giratorios de 3stos, para posteriormente pesarse en baches y ser transportado mediante una tolva m3vil y alimentarse a los extractores.

La bater3a de extracci3n consta de cinco percoladores de acero inoxidable cada uno, que funcionan en un sistema semi-continuo a contra corriente. En cada percolador se carga caf3 tostado y molido, al abrir una tapa que cada uno poseen en la parte superior. La tapa del percolador se cierra, e inmediatamente se abren las v3lvulas que permiten el paso del agua caliente, el agua ingresa de abajo hacia arriba, retirando el aire de los intersticios, el cual se va removiendo al abrir la purga, situada en la parte superior del percolador, una vez se ha desalojado todo el aire por inundaci3n con agua, se cierra la purga y el extracto permanece a presi3n durante el tiempo establecido para el ciclo de extracci3n.

A continuaci3n, se descarga el extracto del primer percolador y se alimenta al segundo percolador, donde se repite el proceso de extracci3n y se concentra el extracto; de esta forma, por todos los percoladores excepto uno, pasa el extracto que se concentra progresivamente al pasar del uno al otro y se retira al finalizar la extracci3n en el 3ltimo percolador de la serie.

A medida que finaliza la extracci3n en cada percolador, cada uno se va aislando del sistema, para retirar el residuo s3lido insoluble del caf3 tostado y molido, tambi3n conocido como la borra del caf3, 3ste se descarga mediante la apertura de una v3lvula situada en la parte inferior, este residuo es una mezcla entre s3lidos insolubles y vapor de agua, por ende se transporta a un hidrocicl3n, que libera el vapor al ambiente y el residuo s3lido de caf3 es transportado al relleno sanitario.

El extracto que sale del proceso, tiene una concentraci3n aproximada de 22 °brix, este se enfr3a al pasar por un intercambiador de calor de placas, desde una temperatura de 100°C hasta 24°C, esto se realiza con el fin de que el extracto mantenga sus propiedades, especialmente el aroma y adem3s para evitar el desarrollo de microorganismos, mientras se almacena de forma temporal en un tanque. Desde donde, posteriormente, se descarga a un evaporador centr3fuga, en donde se lleva a cabo un proceso f3sico de evaporaci3n del agua presente en

el extracto, con el cual se aumenta la concentración de sólidos solubles del 22% al 45% del volumen total. El extracto concentrado que sale, se enfría en un intercambiador de placas donde su temperatura disminuye hasta la temperatura del ambiente 24°C y se almacena en tanques nuevamente.

La última etapa del proceso consiste en llevar el extracto líquido a polvo, para esto, el extracto que se ha concentrado se hace pasar a través de un intercambiador de calor de placas para aumentar su temperatura hasta 40°C, a continuación, se bombea hasta la torre de secado; ésta posee en la parte superior un sistema de toberas que atomizan el extracto en forma de pequeñas gotas. Por la torre de secado circulan gases calientes a una temperatura de aproximadamente 230°C, producto de la combustión de gas natural en una cámara de combustión. Las gotas de extracto a medida que caen por la torre entran en contacto con los gases calientes, produciéndose una transferencia de calor desde el aire a la gota, y desde la gota hacia el aire se da un fenómeno de transferencia de masa, de forma que, por la parte inferior de la torre se obtienen las partículas de café seco, pero además también se recoge una mezcla de aire con vapor de agua.

Los cuadros 8 y 9 presentan los equipos y las propiedades de las corrientes que se plantearon en el diagrama de flujo de proceso de la figura 19.

Cuadro 8. Lista de equipos correspondientes al PFD planteado.

<i>Denominación</i>	<i>Nombre de equipo</i>
TD-101/202	Tolva dosificadora
TT-101	Transportador de tornillo
T-101	Tostador de tambor giratorio
BV-110	Ventilador
H-101/102	Quemador
TC-101/102	Transportador de canguilones
TK-101/203/204	Tanque de almacenamiento cerrado
TP-101/102	Tolva de pesaje
M-101	Molino de discos
TE-201/202/203/204/205	Torre de extracción
E-201/202/203	Intercambiador de calor de placas
CV-101/102	Caldera
EV-201	Evaporador
TS-201	Secador por aspersión
E-104	Intercambiador de calor

Fuente: elaboración propia, con base en: ALCÁNTARA SÁNCHEZ, Roberto Carlos et. Al. Estudio de prefactibilidad de una planta productora de café soluble con raíz de achicoria. [en línea]. Trabajo de grado, Universidad Autónoma Metropolitana, México: S.F. [Consultado 24, julio, 2019]. Disponible en: <http://148.206.53.84/tesiuami/Evelin.pdf>

Cuadro 9. Lista de corrientes correspondientes al PFD planteado.

Corriente	Descripción	Temperatura (°C)	Presión (kPa)
1	Café verde	24	85,33
2	Gases liberados	240	85,33
3	Café tostado	205	85,33
4	Pérdidas de café molido	24	85,33
5	Café molido	24	85,33
6	Café molido	24	85,33
7	Agua de proceso	24	85,33
8	Agua de proceso	175	827,37
9	Sólidos gastados	95	85,33
10	Extracto de café diluído	100	85,33
11	Extracto de café diluído	24	85,33
12	Extracto de café concentrado	41,203	85,33
13	Agua de proceso	24	85,33
14	Gas natural	24	85,33
15	Vapor de agua	95,135	85,33
16	Extracto de café concentrado	24	85,33
17	Extracto de café concentrado	40	85,33
18	Aire caliente	230	85,33
19	Gas natural	24	85,33
20	Aire frío	24	85,33
21	Aire húmedo	24	85,33
22	Café soluble	24	85,33
23	Agua evaporada	41,203	9,20
24	Vapor sobrecalentado	200	85,33
25	Vapor saturado	95,1255	85,33
26	Agua de proceso	24	85,33
27	Gas natural	24	85,33
28	Vapor	24	85,33

Fuente: elaboración propia con base en ALCÁNTARA SÁNCHEZ, Roberto Carlos et. Al. Estudio de prefactibilidad de una planta productora de café soluble con raíz de achicoria. [en línea]. Trabajo de grado, Universidad Autónoma Metropolitana, México: S.F. [Consultado 24, julio, 2019]. Disponible en: <http://148.206.53.84/tesiuami/Evelin.pdf>

4.4.3 Balance de materia del proceso. El balance de materia se realizó con un factor de producción diario de 1 800kg/día de café soluble,⁴² el cual se tomó como

⁴² GALINDO VELIZ, XIOMARA RAIZA. Producción e industrialización de café soluble. Caso: solubles instantáneos. [en línea]. Tesis, Universidad de Guayaquil, Guayaquil (Ecuador): 2011. [Consultado 25, julio, 2019]. Disponible en: <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/01/Galindo-Veliz-Xiomara-Raiza.pdf>

referencia de la planta de producción de café soluble Solubles Instantáneos S.A. y se consideró un tiempo de operación diario de 8 horas como base teórica. Debido a que el diseño del proceso es un aspecto que está por fuera del alcance planteado para el presente proyecto, algunas consideraciones de aproximación a los fenómenos reales se aplicaron para su desarrollo, dichas consideraciones pueden observarse en el anexo K, donde se presenta la muestra de cálculo de los balances aplicados; los resultados obtenidos fueron tabulados para cada tipo de café y se presentan en dicho anexo como se muestra en la tabla 24 para la muestra de café M-13. La designación de las corrientes corresponde a la usada en el cuadro 9.

Tabla 24. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café de M-13.

Corriente	Flujo (kg/h)	Contenido de sólidos disueltos (X p/p)	Contenido de agua (X p/p)	Otros compuestos (Xc)
1	1 109,980	0,89	0,11	0,00
2	151,448	0,32	0,68	0,00
3	958,532	0,98	0,02	0,00
4	9,585	0,98	0,02	0,00
5	948,947	0,98	0,02	0,00
6	948,947	0,98	0,02	0,00
7	1 508,826	0,00	1,00	0,00
8	1 508,826	0,00	1,00	0,00
9	1 435,045	0,49	0,51	0,00
10	1 022,727	0,22	0,78	0,00
11	1 022,727	0,22	0,78	0,00
12	500,000	0,45	0,55	0,00
13	508,181	1,00	0,00	0,00
14	31,258	0,00	0,00	1,00
15	508,181	0,00	1,00	0,00
16	508,181	0,00	1,00	0,00
17	508,181	0,00	1,00	0,00
18	343,741	0,00	0,01	0,99
19	1,811	0,00	0,00	1,00
20	343,741	0,00	0,01	0,99
21	610,191	0,00	0,80	0,20
22	233,550	0,96	0,04	0,00
23	522,727	0,00	1,00	0,00
24	4 586,863	0,00	1,00	0,00
25	4 586,863	0,00	1,00	0,00
26	4 586,863	0,00	1,00	0,00
27	305,219	0,00	0,00	1,00
28	249,396	0,00	0,00	1,00

Fuente: elaboración propia.

4.4.4 Balance de energía del proceso. Se realizó el balance de energía del proceso en base a la revisión bibliográfica para cada tipo de café, como se mencionó anteriormente; debido a que el diseño del proceso es un aspecto que está por fuera del alcance planteado para el presente proyecto, algunas consideraciones de aproximación a los fenómenos reales se aplicaron para su desarrollo, dichas consideraciones pueden observarse en el anexo L, donde se presenta la muestra de cálculo de los balances de energía aplicados, y se tabulan los resultados obtenidos para cada muestra como se presenta en la tabla 25 para la muestra M-13.

Tabla 25. Calor estimado para cada equipo de acuerdo al balance de energía realizado para M-13.

Equipo	Q del equipo (kW)	Equipo complementario	Servicio requerido	Q del equipo complementario (kW)
Tostador	131,279	Cámara de combustión	Gas natural	2889,466
Molino	-	-	Energía eléctrica	-
Batería de extracción	244,859	Intercambiador de calor/caldera	Vapor/gas natural	3536,224
Evaporador	338,690	Caldera	Gas natural	362,148
Secador por aspersión	-	Cámara de combustión	Gas natural	20,982

Fuente: elaboración propia.

4.4.5 Estimación de los costos variables del proceso. Se estimaron los costos variables del proceso, en base al consumo de energía de los equipos usados en las operaciones principales. El costo del servicio de gas natural y de energía eléctrica usados para la estimación de los costos se presentan en el cuadro 10.

Cuadro 10. Precio de servicios usados para la estimación del costo de cada operación.

Precio Variable de gas natural (\$/m3)	1045,05
Precio fijo de gas natural (\$/factura)	2 277,00
Precio de energía eléctrica (\$/kW*h)	559,07

Fuente: elaboración propia, con base en: Grupo Vanti. Informe para el mes de junio de 2019. *Grupo Vanti*. 2019 y Enel. Tarifas de energía eléctrica reguladas por la comisión de regulación de energía y gas. Enel Web site. <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp%C3%B1ol/personas/1-17-1/2019/Tarifario-julio-2019.pdf>. Updated 2019. Accessed Agosto 30, 2019.

Con base en estos valores, se calcularon los costos de cada operación bajo un factor de operación de 8 horas diarias. Los costos variables para cada tipo de café pueden observarse en el anexo M, donde se tabularon los resultados para cada muestra como se muestra en la tabla 26 para muestra M-13.

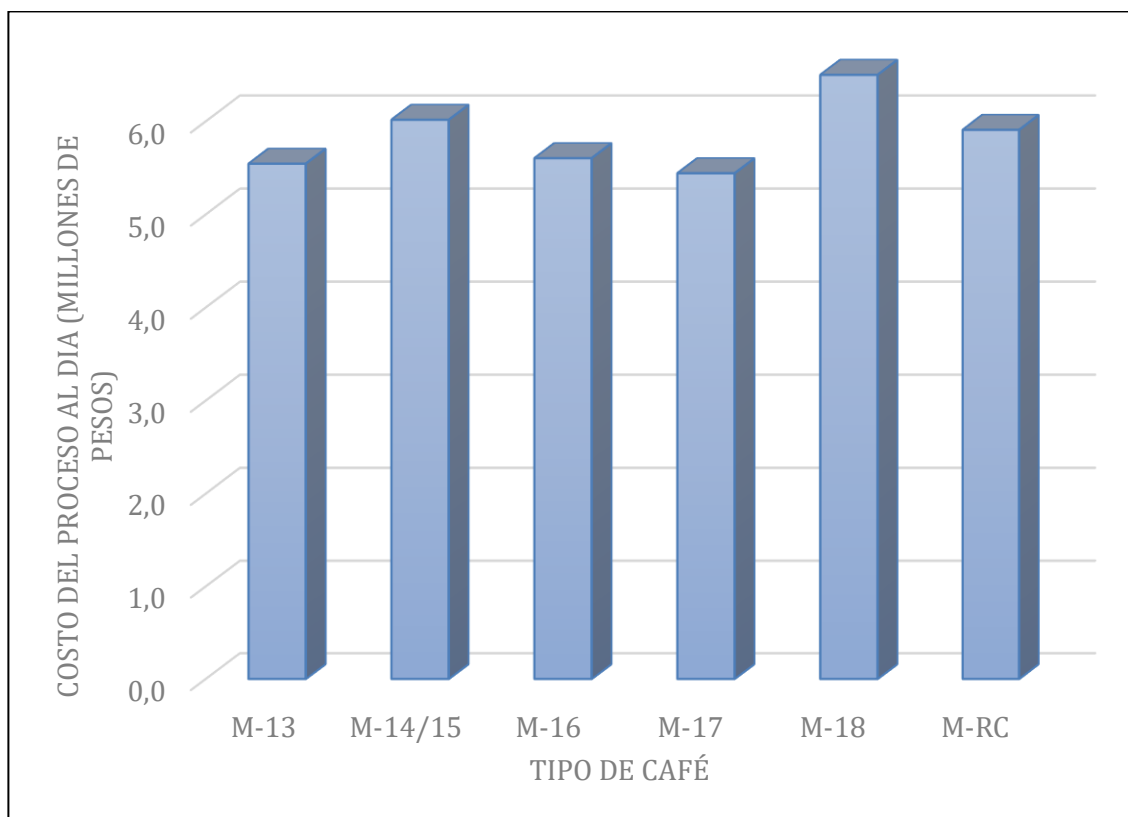
Tabla 26. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-13.

Equipo	Servicio que requiere	Flujo de servicio requerido		Costo del servicio al día
Tostador	Gas natural	249,396	m ³ /h	\$ 2.085.046,23
Molino	Energía eléctrica	1130,807	kW*h	\$ 632.208,82
Batería de extracción	Gas natural	305,219	m ³ /h	\$ 2.551.749,26
Evaporador	Gas natural	31,258	m ³ /h	\$ 261.326,67
Secador por aspersión	Gas natural	1,811	m ³ /h	\$ 15.140,53
		TOTAL		\$ 5.545.472

Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados presentados anteriormente, se construyó la figura 20, en la cual se puede observar la variación en el costo total de proceso con respecto al tipo de café o a las características de la materia prima alimentadas al proceso. A partir de ésta figura se puede establecer que los menores costos se obtuvieron para la muestra de Café verde M-17, para la cual se obtuvo el mayor rendimiento con una tostión clara, lo que representa una menor merma en tostión, estos resultados sugieren una correlación directa entre estas variables y el costo del proceso.

Figura 20. Comparación del costo estimado obtenido para cada tipo de café.

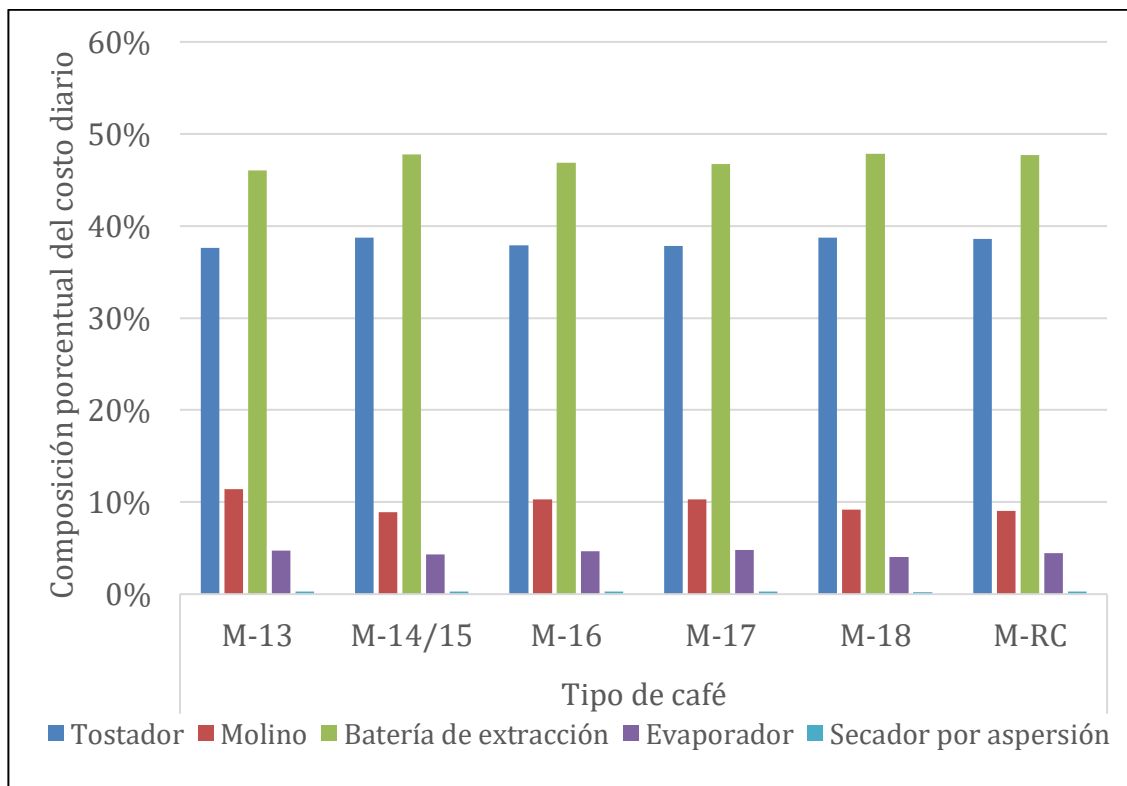


Fuente: elaboración propia.

La variación máxima observada, de las muestras con respecto al menor costo, que corresponde a la muestra M-17, fue de aproximadamente 20%, este valor se obtiene al compararla con el mayor costo, que se obtuvo para la muestra M-18, cabe recordar que con esta muestra se obtuvo el menor rendimiento de las muestras seleccionadas y el mayor porcentaje de merma en tostión. Por lo tanto, si se utiliza café de la muestra M-18 en lugar de café de M-17 el costo del proceso podría aumentar el 20% aproximadamente. Aunque, probablemente, este no sea el objetivo de una planta productora de café soluble, debido a que, se debe considerar el factor de disponibilidad del tipo de café seleccionado en las cantidades requeridas para la producción planeada, ya que de acuerdo a la descripción del proceso de Racafé planteada en el capítulo uno del trabajo, el flujo de estas corrientes es bastante bajo, por lo que se requeriría cierto tiempo para lograr obtener el volumen adecuado de cada una para procesarse por separado como café soluble. Sin embargo, el tratamiento conjunto del rendimiento obtenido para cada muestra con el estimado del costo podría proveer a la planta un panorama de la economía del proceso para la toma de decisiones de operación o combinación de tipos de café.

En la figura 21 se puede observar la contribución de cada una de las operaciones al costo del proceso de producción de café soluble, para todas las muestras se observa el mismo comportamiento, en el cual aproximadamente el 47% del costo del proceso se debe a la operación de extracción, esto puede deberse a las condiciones que se plantearon, debido a que se planteó el uso de vapor sobrecalentado para realizar el calentamiento del agua fresca que se alimenta a la batería de extracción.

Figura 21. Contribución porcentual de cada operación al costo total del proceso.



Fuente: elaboración propia.

Seguido de la extracción la operación que más influye sobre el costo total del proceso es la tostión, con un 38%, este costo se debe al alto flujo de aire que se requiere calentar para lograr tostar los granos de café, aunque probablemente este resultado se debe a la suposición de que todo el calor se transfiere por convección, despreciándose el calor que se puede incorporar a la sistema por radiación o conducción a través de las paredes del equipo, sin embargo, cabe mencionar que el calor promedio estimado para cada muestra de café en la operación de tostión es de aproximadamente 443 851,2 kJ, que corresponde a 106 012,03 kcal, este valor es coherente con el rango sugerido por Clarke &

Macrae⁴³, autores que reportan que el calor requerido para el tostado real en sí, se puede encontrar en el rango de 87–98 kcal por kilogramo de café verde alimentado⁴⁴, para el balance realizado se obtendría una relación de 96,376 kcal/kg de café verde, la cual se encuentra en el rango sugerido por dichos autores. Las siguientes dos operaciones en orden de influencia sobre el costo del proceso, de acuerdo al balance planteado son la molienda y la evaporación, los cuales representan aproximadamente un 10% y un 4% del costo total respectivamente, la primera relacionada claramente, a la baja eficiencia que caracteriza la operación de molienda, ya que, solo una pequeña fracción de la energía incorporada al molino es utilizada realmente en la reducción del tamaño de partícula del café, mientras la evaporación es una operación, de nuevo relacionada con la generación de vapor. Por último, la operación que menos influencia el costo del proceso es el secado por aspersión, para esta operación se obtuvo un bajo consumo de gas natural, lo cual puede deberse a las consideraciones que se hicieron en aproximación a esta operación, debido a que, se consideró solamente el fenómeno de transferencia de masa que se presenta, donde el aire caliente que se alimenta a la torre, arrastra el agua contenida en las gotas de extracto formadas, sin embargo, además de esto, es claro que ocurre también un proceso de transferencia de calor desde el aire caliente hacia el interior de las gotas de extracto; sin embargo, debido a la falta de literatura clara y confiable se decidió desprestigiar este fenómeno, lo que claramente está afectando la estimación del costo de la operación de secado.

Las muestras seleccionadas mediante el análisis multicriterio establecido en el tercer capítulo del trabajo, corresponden a las muestras que se molieron hasta un grado fino, el análisis granulométrico realizado para la estimación del costo de la molienda arrojaron valores del diámetro promedio de partícula dentro del rango establecido como fino de acuerdo al diseño de experimentos que se planteó. Esto es coherente con el hecho de que, claramente cuanto más fino sea el tamaño de partícula promedio, más rápida será la tasa de extracción por agua de sólidos solubles y componentes volátiles del café, sin embargo, la aplicación del grado de molienda fino se debe considerar con cuidado a escala industrial, si se pretende utilizar para la extracción y producción de café soluble, debido a que, en la práctica, la granulometría a utilizar está limitada por el método y el equipo que se usa, ya que aunque los molinos más finos aumentarán la tasa de extracción como se mencionó y, por lo tanto, disminuirán el tiempo del ciclo, su uso puede ser autodestructivo, debido a que genera una mayor caída de presión a través de la batería, por lo que necesariamente se requieren diseños del equipo que soporten la sobrepresión creada; de forma general, las instalaciones con mayor capacidad, requieren moliendas más gruesas, sobre todo por consideraciones de

⁴³ CLARKE, R. J., MACRAE, R. Coffee chemistry. 2 Ed. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1985. 306 P. ISBN 139789401086936.

⁴⁴ CLARKE, R. & MACRAE, R. Coffee Technology. Inglaterra : Elsevier Science Publishers LTD, 1989. 321 p. ISBN 139789401080286

superficie/volumen de la columna que soporten físicamente el lecho de café contra la compresión.⁴⁵ Por otro lado, el uso de moliendas más finas, generará un mayor desgaste en los equipos de molienda, por lo que se deben considerar además aspectos de vida útil y mantenimiento de dicho equipos.

El costo del proceso se estimó por día de operación, considerándose un factor de operación diario de 8 horas, debido a que de acuerdo a lo consultado en las plantas de producción de extractos de café y café soluble del país, de las cuales existen actualmente solo tres (Colcafé en Medellín, Nestlé en Bogotá y la Fábrica de Liofilizados de la Federación Nacional de Cafeteros en Chinchiná Caldas), éstas solamente operan bajo estrictos horarios programados de acuerdo a la producción planeada, es decir, que no se puede suponer que éstas operan los 30 días comerciales del mes.

⁴⁵ Ibid.

5. CONCLUSIONES

- El mejor perfil sensorial se obtuvo para la muestra de rechazos colorimétricos con un valor en la impresión global de 3, lo que se relacionó con su alta densidad, mientras el perfil de taza más bajo se obtuvo para la muestra M-13 con un valor de 1, que puede deberse al alto contenido de materia extraña e impurezas y al tamaño de grano menor que la muestra presentó. Se pueden agrupar las corrientes de salida del proceso de Racafé en cuatro grupos, a partir del análisis cluster, con el objetivo de minimizar el área de almacenamiento requerida.
- El perfil sensorial de la muestra de rechazos colorimétricos sobresalió en la evaluación sensorial con una tostión media y molienda fina, arrojando un valor de impresión global de 4, debido a que presentó sabores “apanelados” y respondió mejor a las preferencias de consumo colombianas, por otro lado, las muestras M-13 y M-18 obtuvieron la menor calificación sensorial con una molienda fina y una tostión clara y oscura respectivamente, obteniéndose un valor en la impresión global de 2 para ambas, lo que se relacionó con el alto contenido de materia extraña e impurezas, haciendo que presentaran tazas sucias y sabores no propios del café.
- Los tres factores analizados tienen influencia estadísticamente significativa sobre el rendimiento de extracción bajo un nivel de confianza del 95%, y en orden de mayor influencia está primero el grado de molienda, seguido del tiempo de tostión y por último la materia prima o el café. El costo operativo diario del proceso de producción de café soluble se estimó en un rango de 5 a 6 millones de pesos para las muestras seleccionadas, para una producción de 1800kg/h de café soluble. Las operaciones que presentan mayor influencia sobre el costo total del proceso son la extracción con un 47% aproximadamente y la tostión con un 38%. Los rechazos colorimétricos, que fue la muestra con mejor calificación sensorial arrojó un costo de 5,9 millones de pesos al día. De forma general se encontró que mayores rendimientos en extracción y menores porcentajes de merma en tostión generan ahorros en el costo del proceso.

6. RECOMENDACIONES

- El muestreo compuesto, usado en este trabajo representa una herramienta eficiente para la obtención de muestras representativas del café que se procesa, esto unido al manejo estadístico de los resultados permitirá estimar, extrapolar o generalizar los resultados bajo un nivel de confianza establecido, disminuyendo el sesgo o incertidumbre que se presenta actualmente en el muestreo y caracterización del café verde.
- Se encontró que la densidad de los rechazos colorimétricos no es significativamente diferente a la densidad de las colas 16 y 17, por lo tanto se podría considerar la posibilidad de realizar un seguimiento y análisis de la densidad de las cabezas de las mesas densimétricas, con el fin de comparar y determinar si el hecho observado es ocasional y/o se debe a la mezcla de granos con diferente tamaño que tuvo lugar durante el muestreo, o, se puede plantear, bajo ciertas circunstancias, la posibilidad de clasificar las colas 16 y 17 como flujos con alta densidad, lo que podría mejorar la rentabilidad del proceso.
- Una alternativa que se puede considerar para establecer un sistema de almacenamiento de las colas obtenidas en las mesas densimétricas y los rechazos colorimétricos, a la salida del proceso de trilla y clasificación de Racafé, es la agrupación obtenida mediante el análisis cluster, de acuerdo al cual se podrían almacenar conjuntamente las colas 14/15, 16 y 17, mientras las colas 13, 18 y rechazos se sugiere, se almacenen por separado.
- Debido a que las operaciones de extracción y tuestión son las que influyen significativamente en los costos del proceso de producción de café soluble, se puede plantear la estrategia de sobredimensionar el equipo que se usará, con el objetivo de que se éstos operen solamente bajo estrictos horarios, lo que podría mejorar la economía del proceso.
- La validación de la metodología para la determinación del tamaño de partícula de una muestra tostada y molida, de acuerdo a la NTC 2441 se debe considerar para trabajos investigativos, debido a las fallas reportadas por varios autores que podrían generar resultados inexactos o engañosos.
- El análisis de composición de las muestras trabajadas en este proyecto podría proveer un panorama más robusto del efecto de la tuestión sobre el rendimiento de la extracción, ya que permitiría analizar las diferencias en la degradación o formación de compuestos, con respecto a variables como el contenido de granos defectuosos.

- La correcta conservación de muestras de café tostado es un factor primordial para obtener resultados confiables en las investigaciones, por lo que se sugiere ser cuidadoso en este aspecto, sobre todo para cafés con tuestión oscura, en los cuales el fenómeno de oxidación lipídica es más intenso.
- Los equipos domésticos de extracción de café son utilizados frecuentemente en trabajos investigativos, sin embargo se recomienda establecer previamente la eficiencia del equipo con el objetivo de proporcionar una mayor reproducibilidad a los resultados reportados.
- La comercialización segregada de las colas de salida del proceso de clasificación y trilla de Racafé, puede presentar una alternativa de ahorro a la empresa y disminuir las situaciones de inconformidad o desacuerdo con los clientes, además permite que éste último tenga un mayor control sobre la eficiencia de su propio proceso.

BIBLIOGRAFÍA

AGUAMARKET. Muestra compuesta. [Sitio WEB]. Santiago de Chile: La entidad. [12 abril, 2019]. Disponible en: <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=2389&termino=muestra+compuesta.%20Updated>

ALCÁNTARA SÁNCHEZ, Roberto Carlos et. Al. Estudio de prefactibilidad de una planta productora de café soluble con raíz de achicoria. [en línea]. Trabajo de grado, Universidad Autónoma Metropolitana, México: S.F. [Consultado 24, julio, 2019]. Disponible en: <http://148.206.53.84/tesiuami/Evelin.pdf>

ANGELONI, Giulia et. Al. What kind of coffee do you drink? An investigation on effects of eight different extraction methods. *Food Research International*. 2019, Vol. 116, p. 1327-1335. ISSN 09639969.

BARON PACHECO, Laura Johana. Evaluación de la cascarilla de café como materias adsorbentes para la remoción de iones plomo Pb^{2+} presente en soluciones acuosas. [en línea]. Trabajo de grado. Universidad Libre, Bogotá D.C. 2014 [Consultado 2, marzo, 2019]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11234>

CASTAÑO CASTRILLÓN, José Jaime et. Al. Caracterización del rendimiento de extracción y del contenido de sólidos solubles de la bebida de café. *Cenicafé*. 2000, Vol. 51, Nro. 3, p. 253-263. ISSN 185195.

CENGEL, Y.A., BOLES, M.A. Apéndice 1. En: *Termodinámica*. 8ª ed. México D.C.: McGraw Hill, 2015. P 722-768.

CHENG, B. et. Al. Influence of genotype and environment on coffee quality. *Trends Food Science and Technology*. 2016, Vol. 57, p. 20-30. Doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.003

CLARKE, R. J., MACRAE, R. *Coffee chemistry*. 2 Ed. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1985. 306 P. ISBN 139789401086936.

-. Coffee Technology. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1989. 321 p. ISBN 139789401080286

CUÉLLAR SOÁRES, Paula Cristina & CASTAÑO CASTRILLÓN, José Jaime. Influencia de la materia prima, del grado de tuestión y de molienda en la densidad de café tostado y molido y en algunas propiedades del extracto obtenido. *Cenicafé*. 2001, Vol. 52, Nro.2, p. 127-140.

DEL CASTILLO, María Dolores et. Al. Effect of roasting on the antioxidant activity of coffee brews. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002, Vol. 50, p. 3698-3703. Doi.org/10.1021/jf011702q

DEL PINO GARCÍA, RAQUEL. Influencia del grado de tostado sobre la capacidad antioxidante y el efecto genoprotector del café soluble. Contribución de la fracción de melanoidinas. [en línea]. Tesis de máster en seguridad y biotecnología alimentaria. Universidad de Burgos, Burgos: 2011. [Consultado 12, junio, 2019]. Disponible en:
http://riubu.ubu.es/bitstream/10259.1/128/1/Pino_Garc%C3%ADa.pdf

DÍAZ, Félix O., et. Al. Efecto de la tostión del café (*Coffea arábica* L. var Castillo) sobre el perfil de taza, contenido de compuestos antioxidantes y la actividad antioxidante. *Información Tecnológica*. 2018, Vol. 29, Nro. 4, p. 31-42. ISSN 07180764

DURSUN, E. & DURSUN, I. Some physical properties of caper seed. *Biosystems Engineering*. 2005, Vol. 92, Nro. 2, p. 237-245. Doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.06.003

ENEL. [sitio web]. Bogotá D.C.: Tarifario julio 2019. Tarifas de energía eléctrica (\$/kWh) reguladas por la comisión de regulación de energía y gas (CREG) Julio 2019. [28-07-2019]. Disponible en: <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp%C3%B1ol/personas/1-17-1/2019/Tarifario-julio-2019.pdf>. Updated 2019. Accessed agosto 30, 2019.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Café de Colombia. [Sitio WEB]. Bogotá D.C.: La entidad. [10, junio, 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/clientes/es/regulacion_nacional/exportadores/2831_calidades_de_exportacion/

----- . Cafés de Colombia. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: La entidad. [20, abril, 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/industrializacion/produccion_de_cafe_soluble//

----- . Cafés Solubles Evolucionan Hacia Segmento Premium. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: La entidad. [5, abril, 2019]. Disponible en: https://www.federaciondecafeteros.org/clientes/es/quienes_somos/119_estadisticas_historicas/

----- . Exportaciones Colombianas del Café según tipo de café. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: La entidad. [10, abril, 2019]. Disponible en: https://www.federaciondecafeteros.org/clientes/es/quienes_somos/119_estadisticas_historicas/

MONTOYA RESTREPO, Esther Cecilia et.al. Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. *Cenicafé*. 1990, Vol. 41, Nro.1, p 19-37.

GALINDO VELIZ, XIOMARA RAIZA. Producción e industrialización de café soluble. Caso: solubles instantáneos. [en línea]. Tesis, Universidad de Guayaquil, Guayaquil (Ecuador): 2011. [Consultado 25, julio, 2019]. Disponible en: <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/01/Galindo-Veliz-Xiomara-Raiza.pdf>

GEANKOPLIS, Christie. Secado de materiales de proceso. En: Procesos de transporte y operaciones unitarias. México: Compañía editorial continental, S.A., 1998. P 579-634.

GRUPO NUTRESA. [sitio web]. Bogotá D.C.: Informe integrado 2017 [2-03-2019]. Disponible en: informe2017.gruponutresa.com/pdf/Informe_COMPLETO.pdf

GUEVARA BARRETO, Ricardo Alfonso & CASTAÑO CASTRILLÓN, José Jaime. Caracterización granulométrica del café colombiano tostado y molido. *Cenicafé*. 2005, Vol. 56, Nro.1, p. 5-18.

HELCIMOVIC. I. et. Al. Comparative study of polyphenols and caffeine in different coffee varieties affected by the degree of roasting. *Food Chemistry*. 2011, Vol.129, p. 991-1000. ISSN 03088146.

IDEAM. [Sitio web]. Bogotá D.C.: Características de ciudades principales y municipios turísticos. [30-07-2019]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>.

ILLY, Andrea & VIANI, Rinantonio. Espresso Coffee. The science of quality. Reino unido: Elseviers Academic Press, 2005. 398 p. ISBN 0123703719

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

----- . Café instantáneo (soluble). NTC-4159. Bogotá D.C 2015. 10 p.

----- . Café verde. Análisis del tamaño. Tamizado manual y mecánico. NTC 5248. Bogotá D.C. 2013. 16 p.

----- . Café pergamino, verde y semitostado en sacos. Muestreo. NTC 2323. Bogotá D.C. 2012. 12 p.

-----, Café verde para uso industrial. Parte 1. Café arábica. NTC 5938. Bogotá D.C. 2012. 9 p.

-----.. Café tostado y molido. Método para la determinación del tamaño promedio de partícula por distribución granulométrica. NTC 2441. Bogotá D.C. 2011. 9 p.

-----, Café verde. Preparación de muestras para uso en análisis sensorial. NTC 3566. Bogotá D.C. 2011. 9 p.

-----, Café tostado en grano o molido. NTC 3534. Bogotá D.C. 2007. 8 p.

-----, Café tostado en grano y/o molido. Determinación del grado de tosti3n. NTC 2442. Bogotá D.C. 2004. 7 p.

-----, Café. An3lisis sensorial. Vocabulario. NTC-2758. Bogotá D.C. 2002. 10 p.

-----, An3lisis sensorial. Caf3. Metodolog3a para an3lisis sensorial cuantitativo descriptivo del caf3. NTC 4883. Bogotá D.C. 2000. 13 p.

-----, Caf3 tostado y molido. Determinaci3n del contenido de humedad. M3todo por determinaci3n de la p3rdida en masa a 103°C (m3todo de rutina). NTC 2558. Bogotá D.C. 2000. 5 p.

-----, Determinaci3n del rendimiento de extracci3n y de los s3lidos solubles en la bebida de caf3. M3todo por contacto directo. NTC 4602-2. Bogotá D.C. 1999. 5 p.

-----, Determinaci3n del rendimiento de extracci3n y de los s3lidos solubles en la bebida de caf3. M3todo por goteo directo. NTC 4602-1. Bogotá D.C. 1999. 5 p.

-----, Caf3 verde y tostado. Determinaci3n de la densidad a granel por ca3da libre de los granos enteros (m3todo de rutina). NTC 4607. Bogotá D.C. 1999. 6 p.

LA REPÚBLICA. [Portal web]. Bogotá D.C.: Agronegocios, Conservemos la calidad para mejorar la rentabilidad, defecto fenol. [14-08-2019]. Disponible en: <https://www.agronegocios.co/aprenda/conservemos-la-calidad-para-mejorar-la-rentabilidad-defecto-fenol-2622732>

MEDINA ALMEIDA, Javier Leonardo & RIAÑO LUNA, Campo El3as. Evaluaci3n del rendimiento de extracci3n de algunas cafeteras. *Cenicaf3*. 2006, Vol. 57, Nro. 1, p. 31-36.

MORONEY, K.M. et. Al. Modelling of coffee extraction during brewing using multiscale methods: An experimentally validated model. *Chemical Engineering Science*. 2015, Vol. 137. p. 216-234. ISSN 00092509.

PERRY, R. Manual del ingeniero químico. México: McGraw Hill, 1984.

REVISTA DINERO. ¿Colombia exporta café a los mayores consumidores del mundo? [Sitio WEB]. Bogotá D.C: Publicaciones semana S.A. [15, abril, 2019]. Disponible en: <http://www.dinero.com/economia/articulo/colombia-exporta-cafe-mayores-consumidores-del-mundo/210780>

SÄRNDAL, C. E. et. Al. Model assisted survey sampling. Nueva York: Springer Science & Business Media, 1992. 696 p. ISBN 9780378406206

SUAREZ AGUDELO, Jesús María. Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del café, en el municipio de Betania Antioquia: usos y aplicaciones. [en línea]. Trabajo de grado. Corporación Universitaria Lasallista, Caldas Antioquia: 2012. [Consultado 2, marzo, 2019]. Disponible en: http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/627/1/APROVECHAMIENTO_RESIDUOS_SOLIDOS_BENEFICIO_CAFE.pdf

SWISSCONTACT. [sitio web]. Ecuador: Countries, Manual básico de buenas prácticas para el tostado del café. [15-07-2019]. Disponible en: https://www.swisscontact.org/fileadmin/user_upload/COUNTRIES/Ecuador/Documents/Content/ManualTuesteCafe.pdf

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA. [Sitio WEB]. Madrid: Portal Estadística aplicada, Análisis conglomerados. [17-03-2019]. Disponible en: http://www.estadistica.net/Master-Econometria/Analisis_Cluster.pdf

VANTI. [sitio web]. Bogotá D.C.: Tarifas gas natural S.A., ESP, Informe para el mes de junio de 2019. [28-07-2019]. Disponible en: <https://www.grupovanti.com/servlet/ficheros/1297163049484/GNCBPublicacionJunio2019-TarifasReguladasyCargoDistribuci%C3%B3n.pdf>




WASMUTH, H.D. La determinación de la aptitud a la molienda y del consumo específico de energía según el ensayo de Bond para la molienda de minerales y rocas. *Materiales de construcción*. 1970, Vol. 20, Nro.140, p. 19-31.

ANEXOS

ANEXO A

MATERIAL EXTRAÑO E IMPUREZAS EN EL CAFÉ

Cuadro 11. Defectos asociados con materia extraña (impurezas)




Nombre	Imagen	Descripción	Causas
Piedra		Piedra de cualquier diámetro. Encontrado en un lote de café verde.	Inadecuada separación ó limpieza
Palitos		Ramita de cualquier diámetro. Encontrado en un lote de café verde.	Inadecuada separación ó limpieza
Terrón		Terrón granulado de partículas de suelo.	Inadecuada separación ó limpieza

Fuente: elaboración propia, con base en: ILLY, Andrea & VIANI, Rinantonio. Espresso Coffee. The science of quality. Reino Unido: Elseviers Academic Press, 2005. 398 p. ISBN 0123703719

ANEXO B

DEFECTO POR COLOR Y TAMAÑO QUE SE PRESENTAN EN EL CAFÉ

Cuadro 12. Defectos por color en el café






Nombre	Imagen	Descripción	Causas
Negro total o parcial		<ol style="list-style-type: none"> 1. Grano con coloración del pardo al negro 2. Encogido 3. Arrugado 4. Cara plana hundida 5. Hendidura muy abierta 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falta de agua durante el desarrollo del fruto 2. Fermentaciones prolongadas 3. Cerezas sobremaduras recogidas del suelo 4. Malos secados o rehumedecimientos
Cardenillo		<ol style="list-style-type: none"> 1. Grano atacado por hongos, recubierto de polvillo amarillo o amarillo rojizo 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fermentaciones prolongadas 2. Interrupciones largas del proceso de secado 3. Almacenamiento húmedo del producto
Vinagre o parcialmente vinagre		<ol style="list-style-type: none"> 1. Grano con coloración de crema al carmelita oscuro 2. Hendidura libre de tegumentos 3. Película plateada puede tender a coloraciones pardo rojizas 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Retrasos entre la recolección y el despulpado 2. Fermentaciones demasiado prolongadas 3. Uso de aguas sucias 4. Almacenamiento húmedo del café

Fuente: elaboración propia, con base en: FEEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Cafés de Colombia. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: La entidad. [20, abril, 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/industrializacion/produccion_de_cafe_soluble//

Cuadro 13. Defectos por peso y/o tamaño en el café.

Nombre	Imagen	Descripción	Causas
Mordido o cortado		1. Grano con una herida o cortada y oxidado	1. Despulpado con máquina mal ajustada o camisa defectuosa 2. Recolección de cerezas verdes
Grano Brocado		1. Los granos dañados por la broca, tienden a ser agrios y terrosos	1. ocasionado por las plagas de café, la broca, el perforador blanco del tallo del cafeto, el gorgojo del café, entre otros.
Averanado o arrugado		1. Grano con estrías	1. Desarrollo pobre del cafeto por sequía 2. Debilidad del cafeto por falta de fertilizantes
Cristalizado		1. Grano de color gris azulado; frágil y quebradizo	1. Altas temperaturas en el secado (más de 50°C)
Decolorado veteadado		Grano con vetas blancas	Rehumedecimiento después del proceso de secado
Decolorado reposado		Grano con alteraciones en su color normal, presenta colores que van desde el blanqueado, crema, amarillo hasta el carmelita.	Almacenamiento prolongado Malas condiciones de almacenamiento

Cuadro 13 (Continuación)

Nombre	Imagen	Descripción	Causas
Decolorado ámbar o mantequillo		Grano de color amarillo traslúcido	Deficiencia de hierro en el suelo
Decolorado sobresecado		Grano de color ámbar o ligeramente amarillento	Demasiado tiempo o temperatura en el secado
Granos Sin Trillar		1. Los granos sin trillar son un defecto secundario, los cuales causan astringencia y amargor en taza.	La cáscara se puede quemar durante el proceso de tueste dañando otros granos en el proceso.
Flojo		Grano de color gris oscuro y blando	Falta de secamiento
Aplastado		Grano aplanado con fracturas parciales	Pisar el café durante el proceso de secado Trilla de café humedecido
Inmaduro y/o paloteado		1. Grano de color verdoso o gris claro 2. La cutícula no desprende 3. Superficie marchita 4. Tamaño menor que el normal	1. Recolección de granos verdes o pintones.- inmaduro- 2. Cultivo en zonas marginales 3. Falta de Abono 4. Roya -sequía

Fuente: elaboración propia, con base en: FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Cafés de Colombia. [Sitio WEB]. Bogotá D.C: La entidad. [20, abril, 2019]. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/industrializacion/produccion_de_cafe_soluble//

ANEXO D

ANÁLISIS CLUSTER

Objetos: Se establecieron como los objetos, cada una de las siete muestras compuestas.

Variabes: Las variables que se consideraron para el análisis estadístico son la densidad a granel, la humedad, el porcentaje de ripio, el porcentaje de impurezas y materia extraña, junto con la cantidad de defecto contenidos en cada muestra; donde las dos primeras variables son las críticas del proceso de trilla y clasificación de Racafé & CIA, las siguientes son consideradas variables residuales.

Normalización de variables. Se realizó una normalización de las variables medidas, esto debido a que éstas presentan escalas muy diferentes entre sí, lo que podría afectar los resultados obtenidos a partir del análisis cluster.

Medida de asociación: Se estableció una medida de similaridad, la distancia euclídea, a partir de la cual se obtiene la matriz de similaridades de tamaño 6x6, donde cada elemento de la matriz corresponde a la medida enunciada. La cual se obtiene a partir de la siguiente ecuación.⁴⁶

Ecuación 11. Distancia euclídea.

$$d(x_i, x_{i'}) = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2}$$

Fuente: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA. [Sitio WEB]. Madrid: Portal Estadística aplicada, Análisis conglomerados. [17-03-2019]. Disponible en: http://www.estadistica.net/Master-Econometria/Analisis_Cluster.pdf

Donde se considera x_1, x_2, \dots, x_p las variables establecidas anteriormente, por lo tanto, x_{ij} es el valor observado para la muestra i-ésima en la variable j-ésima.

Método o técnica cluster: Este se debe seleccionar de acuerdo a las variables analizadas y con el objetivo de establecer un criterio que permita agrupar los objetos en conglomerados o clusters. El análisis cluster es de tipo jerárquico asociativo o aglomerativo, éste parte de tantos grupos como individuos hay en el

⁴⁶ UNIVERSIDAD AUTÓNOMA. [Sitio WEB]. Madrid: Portal Estadística aplicada, Análisis conglomerados. [17-03-2019]. Disponible en: http://www.estadistica.net/Master-Econometria/Analisis_Cluster.pdf

estudio, los cuales corresponden a cada una de las muestras puntuales tomadas de cada malla, estos se van agrupando hasta llegar a tener todos los casos en un mismo grupo.⁴⁷

Dendograma: Se realizó la construcción de un árbol de clasificación o dendograma. Éste es una valiosa herramienta que permite visualizar el proceso de agrupamiento de los cluster en los distintos pasos del algoritmo y por lo tanto ayuda a decidir el número de grupos que podrían representar mejor la estructura de los datos teniendo en cuenta la forma en que se van anidando y la medida de similitud a la cual lo hacen. Cortando transversalmente, a una distancia determinada, las ramas del gráfico, se obtiene una partición que podría obtenerse como recomendación para la empresa como sistema de almacenamiento de las colas obtenidas en su proceso.

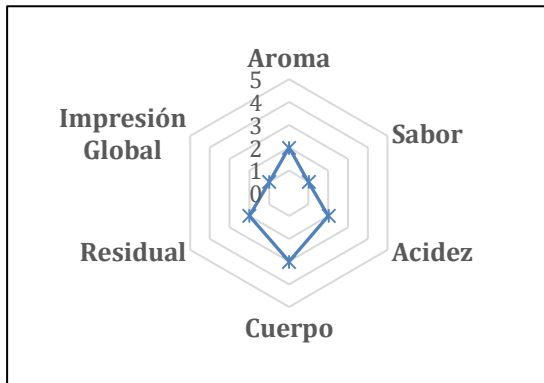
⁴⁷ Ibid.

ANEXO E

PERFILES SENSORIALES DE LAS MUESTRAS COMPUESTAS.

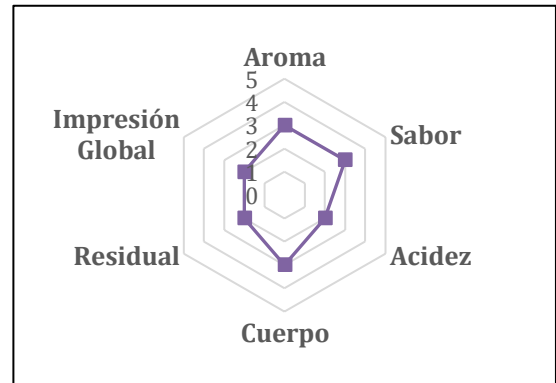
Las muestras compuestas fueron tostadas y molidas en grados estándar (medio). Los resultados de la evaluación sensorial se presentan a continuación.

Figura 22. Perfil sensorial M-13.



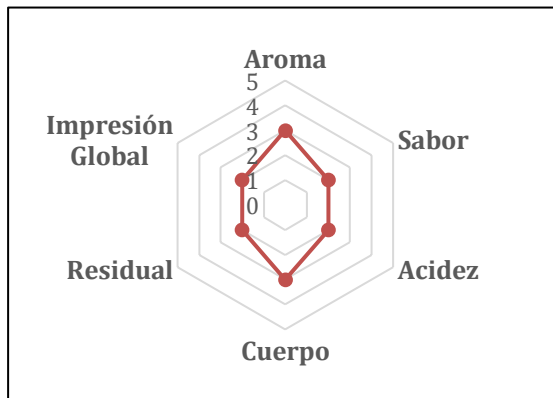
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Perfil sensorial M-17.



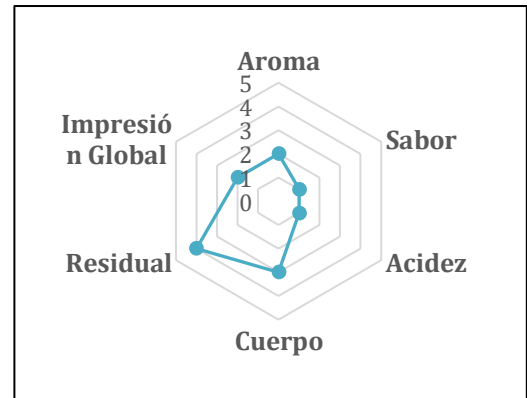
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Perfil sensorial M-14/15.



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Perfil sensorial M-18.



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Perfil sensorial M-16.



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Perfil sensorial M-RC.

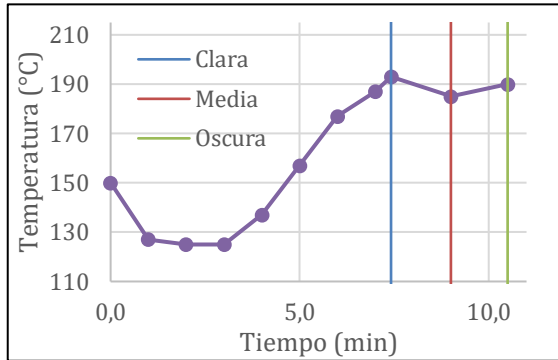


Fuente: elaboración propia.

ANEXO F

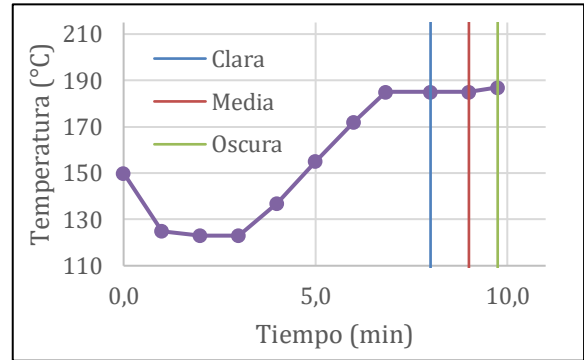
PERFILES DE TOSTIÓN

Figura 28. Perfil de tostión de M-14/15.



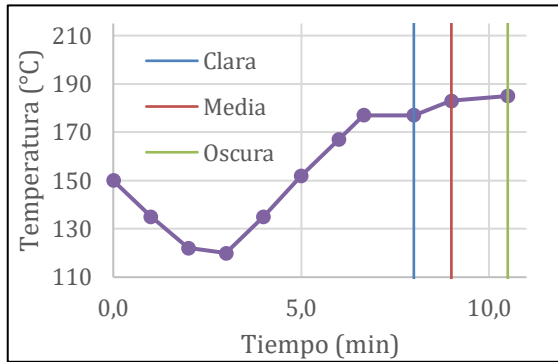
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Perfil de tostión de M-16.



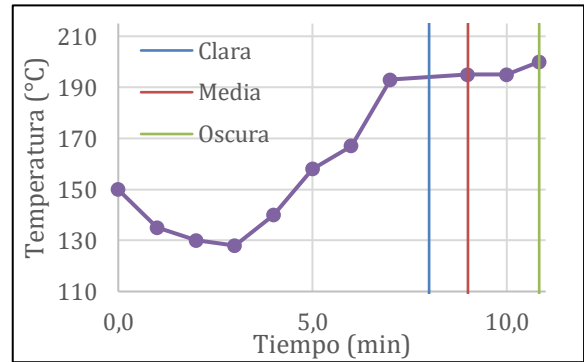
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Perfil de tostión de M-17.



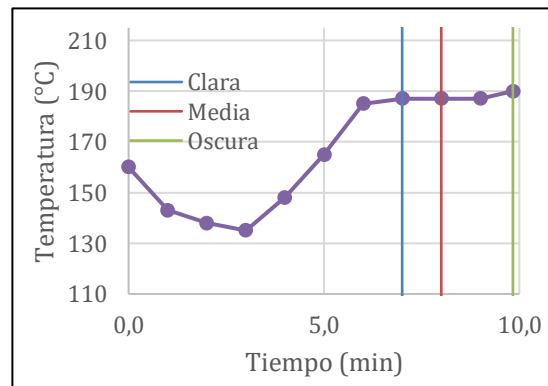
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Perfil de tostión de M-18.



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Perfil de tostión de M-RC.



Fuente: elaboración propia.

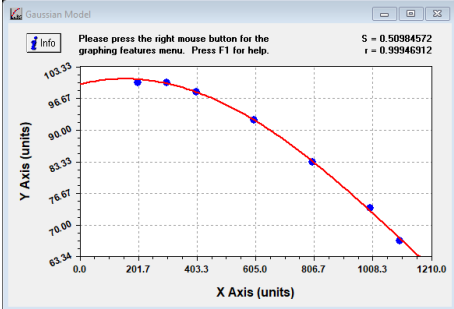
ANEXO G

RESULTADOS DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MOLINO.

Cuadro 14. Resultados del análisis granulométrico de la graduación A del molino.

Abertura de tamiz (μm)	% Acumulado	Peso tamiz inicial (g)	Peso tamiz final (g)	Diferencia	Acumulado	% Retenido
1100	66,67	68,3	75,1	6,8	6,8	66,67
1000	73,53	63,8	64,5	0,7	7,5	6,86
800	83,33	69,6	70,6	1	8,5	9,80
600	92,16	64,5	65,4	0,9	9,4	8,82
400	98,04	70,4	71	0,6	10	5,88
300	100,00	65,4	65,6	0,2	10,2	1,96
200	100,00	69,9	69,9	0	10,2	0,00
0	100,00	63,7	63,7	0	10,2	0,00

Curve Expert	
Gaussian Model: $y=a*\exp(-(b-x)^2)/(2*c^2)$	
R ²	0,998938282
a =	1,01E+02
b =	1,53E+02
c =	1,05E+03
Xprom (μm)	1399,30

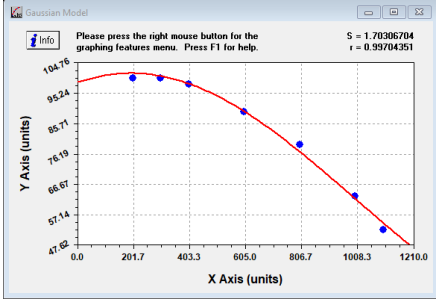


Fuente: elaboración propia.

Cuadro 15. Resultados del análisis granulométrico de la graduación B del molino.

Abertura de tamiz (μm)	% Acumulado	Peso tamiz inicial (g)	Peso tamiz final (g)	Diferencia	Acumulado	% Retenido
1100	52,38	68,3	73,8	5,5	5,5	52,38
1000	62,86	63,8	64,9	1,1	6,6	10,48
800	79,05	69,6	71,3	1,7	8,3	16,19
600	89,52	64,5	65,6	1,1	9,4	10,48
400	98,10	70,4	71,3	0,9	10,3	8,57
300	100,00	65,4	65,6	0,2	10,5	1,90
200	100,00	69,9	69,9	0	10,5	0,00
0	100,00	63,7	63,7	0	10,5	0,00

Curve Expert	
Gaussian Model: $y=a*\exp(-(b-x)^2)/(2*c^2)$	
R ²	0,994096738
a =	1,01E+02
b =	1,92E+02
c =	8,15E+02
Xprom (μm)	1161,71



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 16. Resultados del análisis granulométrico de la graduación C del molino.

Abertura de tamiz (µm)	% Acumulado	Peso tamiz inicial (g)	Peso tamiz final (g)	Diferencia	Acumulado	% Retenido
1100	36,27	68,3	72	3,7	3,7	36,27
1000	51,96	63,8	65,4	1,6	5,3	15,69
800	77,45	69,6	72,2	2,6	7,9	25,49
600	88,24	64,5	65,6	1,1	9	10,78
400	98,04	70,4	71,4	1	10	9,80
300	100,00	65,4	65,6	0,2	10,2	1,96
200	100,00	69,9	69,9	0	10,2	0,00
0	100,00	63,7	63,7	0	10,2	0,00

Curve Expert	
Gaussian Model: $y=a*\exp((-b-x)^2)/(2*c^2)$	
R ²	0,97465269
a =	1,03E+02
b =	2,27E+02
c =	6,56E+02
Xprom (µm)	1014,31

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 17. Resultados del análisis granulométrico de la graduación D del molino.

Abertura de tamiz (µm)	% Acumulado	Peso tamiz inicial (g)	Peso tamiz final (g)	Diferencia	Acumulado	% Retenido
1100	3,92	68,3	68,7	0,4	0,4	3,92
1000	10,78	63,8	64,5	0,7	1,1	6,86
800	43,14	69,6	72,9	3,3	4,4	32,35
600	74,51	64,5	67,7	3,2	7,6	31,37
400	94,12	70,4	72,4	2	9,6	19,61
300	100,00	65,4	66	0,6	10,2	5,88
200	100,00	69,9	69,9	0	10,2	0,00
0	100,00	63,7	63,7	0	10,2	0,00

Curve Expert	
Gaussian Model: $y=a*\exp((-b-x)^2)/(2*c^2)$	
R ²	0,98005842
a =	1,06E+02
b =	1,93E+02
c =	4,29E+02
Xprom (µm)	718,04

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 18.Resultados del análisis granulométrico de la graduación E del molino.

Abertura de tamiz (µm)	% Acumulado	Peso tamiz inicial (g)	Peso tamiz final (g)	Diferencia	Acumulado	% Retenido
1100	1,92	68,3	68,5	0,2	0,2	1,92
1000	7,69	63,8	64,4	0,6	0,8	5,77
800	20,19	69,6	70,9	1,3	2,1	12,50
600	48,08	64,5	67,4	2,9	5	27,88
400	82,69	70,4	74	3,6	8,6	34,62
300	99,04	65,4	67,1	1,7	10,3	16,35
200	100,00	69,9	70	0,1	10,4	0,96
0	100,00	63,7	63,7	0	10,4	0,00

Curve Expert	
Gaussian Model: $y=a*\exp(-(b-x)^2)/(2*c^2)$	
R^2	0,997421664
a =	1,06E+02
b =	1,37E+02
c =	3,70E+02
Xprom (µm)	589,24

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 19. Resultados del análisis granulométrico de la graduación F del molino

Abertura de tamiz (µm)	% Acumulado	Peso tamiz inicial (g)	Peso tamiz final (g)	Diferencia	Acumulado	% Retenido
1100	0,00	68,3	68,3	0	0	0,00
1000	0,00	63,8	63,8	0	0	0,00
800	0,96	69,6	69,7	0,1	0,1	0,96
600	3,85	64,5	64,8	0,3	0,4	2,88
400	51,92	70,4	75,4	5	5,4	48,08
300	94,23	65,4	69,8	4,4	9,8	42,31
250	98,08	70,3	70,7	0,4	10,2	3,85
200	100,00	65,1	65,3	0,2	10,4	1,92
0	100,00	63,7	63,7	0	10,4	0,00

Curve Expert	
Gaussian Model: $y=a*\exp(-(b-x)^2)/(2*c^2)$	
R^2	0,980696071
a =	1,15E+02
b =	1,25E+02
c =	2,21E+02
Xprom (µm)	410,39

Fuente: elaboración propia

ANEXO H

VALIDACIÓN DE LA ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL RENDIMIENTO.

Con la metodología planteada, se obtuvieron los resultados presentados en las tablas 27 y 28 para el rendimiento obtenido a partir de la medición de %STD y para el rendimiento obtenido con el secado establecido en la NTC 4602-1 respectivamente.

Tabla 27. Resultados de extracción obtenidos mediante la ecuación 6.

Muestra	°Brix	% STD	Volumen de bebida (ml)	Tiempo (seg)	Cantidad de bebida (g)	Rendimiento promedio (%)
M-13	1,5135	1,1985	247	92	243,3	17,1527
M-14/15	1,1185	0,881	250	89	244,9	12,6916
M-16	1,11	0,873	252	86	246,7	12,6688
M-17	1,3265	1,047	252	86	247,9	15,2677
M-18	1,469	1,162	251	83	246,1	16,8217
M-RC	1,5355	1,215	250	82	246,4	17,6104

Fuente: elaboración propia.

Tabla 28. Resultados de extracción obtenidos mediante procedimiento de NTC 4602-1.

Muestra	# repetición	m ₀ (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	%SS	%SS prm	%RE
13	1	54,08120	17	243,3	64,04640	54,21410	1,334		19,0868
13	2	86,23050	17	243,3	96,21340	86,35800	1,277	1,293	18,2788
13	3	70,12170	17	243,3	80,12980	70,24850	1,267		18,1326
14/15	1	68,51438	17	244,9	78,48800	68,58610	0,719		10,3592
14/15	2	74,27390	17	244,9	84,25550	74,34140	0,676	0,827	9,7419
14/15	3	77,07870	17	244,9	86,99350	77,18640	1,086		15,6485
16	1	68,53200	17	246,7	78,50580	68,62740	0,957		13,8806
16	2	74,24540	17	246,7	84,10770	74,32240	0,781	0,921	11,3301

Tabla 26 (Continuación)

Muestra	# repetición	m_o (g)	m₁ (g)	m₂ (g)	m₃ (g)	m₄ (g)	%SS	%SS prm	%RE	%RE promedio
16	3	77,09100	17	246,7	86,87660	77,19150	1,027		14,9039	
17	1	68,53850	17	247,9	78,52580	68,67800	1,397		20,3683	
17	2	74,25340	17	247,9	84,24460	74,36220	1,089	1,193	15,8796	17,3936
17	3	77,09880	17	247,9	87,10220	77,20810	1,093		15,9331	
18	1	54,10220	17	246,1	63,91930	54,22480	1,249		18,0788	
18	2	86,24310	17	246,1	96,15910	86,36560	1,235	1,250	17,8839	18,0965
18	3	70,13900	17	246,1	79,98920	70,26370	1,266		18,3267	
RC	1	54,11380	17	246,4	64,11500	54,24880	1,350		19,5647	
RC	2	86,26150	17	246,4	96,26820	86,39550	1,339	1,261	19,4091	18,2840
RC	3	70,14910	17	246,4	80,18110	70,25900	1,095		15,8782	

Fuente: elaboración propia.

ANEXO I

RESULTADOS DE RENDIMIENTO Y CALIFICACIÓN SENSORIAL

Tabla 29. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-13.

Tratamiento	% rendimiento promedio	Calificación de atributos	Impresión global
T _{13,1,1}	24,088 ± 0,995	10,3	2
T _{13,1,2}	16,627 ± 3,343	5,7	1
T _{13,1,3}	12,522 ± 1,812	9,7	2
T _{13,2,1}	22,037 ± 1,681	7,7	2
T _{13,2,2}	16,921 ± 1,665	9,0	3
T _{13,2,3}	11,481 ± 1,567	8,0	2
T _{13,3,1}	22,510 ± 0,749	7,7	2
T _{13,3,2}	17,199 ± 0,936	13,0	3
T _{13,3,3}	11,289 ± 1,326	7,7	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 30. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-14/15.

Tratamiento	% rendimiento promedio	Calificación de atributos	Impresión global
T _{14/15,1,1}	23,805 ± 2,390	8,0	2
T _{14/15,1,2}	16,627 ± 2,211	6,7	2
T _{14/15,1,3}	12,522 ± 1,864	7,0	2
T _{14/15,2,1}	22,037 ± 0,887	13,0	2
T _{14/15,2,2}	16,921 ± 2,578	14,7	3
T _{14/15,2,3}	11,481 ± 0,556	14,3	3
T _{14/15,3,1}	22,510 ± 1,522	8,3	3
T _{14/15,3,2}	17,199 ± 1,896	8,7	3
T _{14/15,3,3}	11,289 ± 1,556	8,3	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 31. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-16.

Tratamiento	% rendimiento promedio	Calificación de atributos	Impresión global
T _{16,1,1}	21,606 ± 0,897	14,0	3
T _{16,1,2}	16,715 ± 1,796	10,0	4
T _{16,1,3}	9,656 ± 1,142	5,7	1
T _{16,2,1}	19,900 ± 0,390	13,7	2
T _{16,2,2}	14,628 ± 1,762	13,3	3
T _{16,2,3}	7,647 ± 1,769	12,3	2
T _{16,3,1}	23,130 ± 0,578	14,0	3
T _{16,3,2}	18,393 ± 1,846	17,3	4
T _{16,3,3}	10,508 ± 0,933	13,3	3

Fuente: elaboración propia.

Tabla 32. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-17.

Tratamiento	% rendimiento promedio	Calificación de atributos	Impresión global
T _{17,1,1}	23,879 ± 0,545	15,3	3
T _{17,1,2}	18,766 ± 4,591	3,7	0
T _{17,1,3}	10,883 ± 2,240	14,7	3
T _{17,2,1}	20,997 ± 0,924	13,3	3
T _{17,2,2}	14,681 ± 1,565	0,0	0
T _{17,2,3}	8,121 ± 0,810	12,0	2
T _{17,3,1}	23,015 ± 0,839	12,3	2
T _{17,3,2}	14,742 ± 1,663	13,7	3
T _{17,3,3}	11,259 ± 1,473	12,3	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 33. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-18.

Tratamiento	% rendimiento promedio	Calificación de atributos	Impresión global
T _{18,1,1}	22,103 ± 1,451	9,7	0
T _{18,1,2}	20,808 ± 3,899	2,0	0
T _{18,1,3}	9,927 ± 1,135	6,3	0
T _{18,2,1}	20,086 ± 1,116	9,3	0
T _{18,2,2}	17,772 ± 2,016	0,0	0
T _{18,2,3}	9,173 ± 1,434	13,3	3
T _{18,3,1}	20,567 ± 1,142	7,3	2
T _{18,3,2}	15,986 ± 2,410	9,7	2
T _{18,3,3}	7,959 ± 0,776	14,3	3

Fuente: elaboración propia.

Tabla 34. Resultados obtenidos para los tratamientos de la muestra compuesta M-RC.

Tratamiento	% rendimiento promedio	Calificación de atributos	Impresión global
T _{RC,1,1}	22,329 ± 0,456	9,7	0
T _{RC,1,2}	19,949 ± 1,086	5,7	1
T _{RC,1,3}	10,511 ± 0,894	3,7	0
T _{RC,2,1}	23,156 ± 1,359	16,0	4
T _{RC,2,2}	17,164 ± 3,156	15,0	3
T _{RC,2,3}	9,432 ± 0,945	14,7	3
T _{RC,3,1}	20,356 ± 0,918	13,0	3
T _{RC,3,2}	15,408 ± 0,785	0,0	0
T _{RC,3,3}	10,87 ± 2,151	8,7	3

Fuente: elaboración propia.

ANEXO J

SELECCIÓN MULTICRITERIO DE LOS MEJORES TRATAMIENTOS

Tabla 35. Matriz de Richman para la muestra compuesta M-14/15.

M-14/15	Tostión		
Molienda	1	2	3
1	3,2	2,8	3,8
2	2,4	3	3
3	2	2,2	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 36. Matriz de Richman para la muestra compuesta M-16.

M-16	Tostión		
Molienda	1	2	3
1	3,4	2,8	3,8
2	3,6	3	3,6
3	1	1,6	2,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 37. Matriz de Richman para la muestra compuesta M-17

M-17	Tostión		
Molienda	1	2	3
1	3,8	3,4	3,2
2	1,2	0,8	2,6
3	2	3	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 38. Matriz de Richman para la muestra compuesta M-18.

M-18	Tostión		
Molienda	1	2	3
1	2	1,6	2,8
2	1,6	1,2	2,4
3	0,4	2,2	2,2

Fuente: elaboración propia.

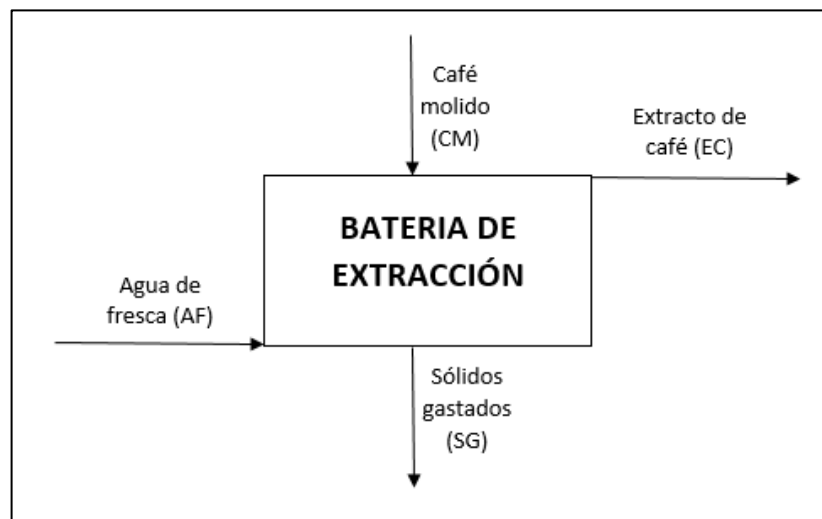
ANEXO K

CÁLCULOS DE BALANCE DE MATERIA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CAFÉ SOLUBLE

Balance de materia en la batería de extracción. El sistema de extracción planteado para el proceso consta de una batería de extracción de cinco percoladores, al cual se puede configurar para que funcione de manera isotérmica e isobárica, es decir, que mediante la instalación de equipos de intercambio de calor y bombeo de fluidos entre cada percolador, se mantengan las mismas condiciones de temperatura y presión en cada uno; mientras en otras configuraciones se alimenta el agua de extracción a elevadas temperaturas y presiones, con lo cual se presenta a través de la batería un perfil de temperatura y presión, de manera que a la salida del sistema la corriente de extracto se obtiene a la menor temperatura y a la menor presión; este último fue el sistema que se planteó en el presente trabajo.

Se consideró el sistema de cinco percoladores como una unidad, debido a la falta de datos sobre el perfil de temperatura y presión en la bibliografía. Se usa una alimentación de agua a 175°C y 827, 37kPa, obteniéndose el extracto a la salida de la batería a una presión cercana a la atmosférica y a 100°C aproximadamente; aunque dichos valores dependen del diseño y la carga de los percoladores que conforman la batería, se usaron en aproximación al fenómeno. La figura 33 presenta entonces, el diagrama planteado para el desarrollo del balance de materia del proceso.

Figura 33. Diagrama planteado para el balance de materia en la batería de extracción.



Fuente: elaboración propia.

Otras consideraciones que se tomaron a partir de la bibliografía fueron la concentración del extracto a la salida del proceso (22°BRIX⁴⁸) y la relación café: agua (1,59⁴⁹). Por otro lado, se planteó una meta de producción de café soluble con base en la producción reportada por Galindo⁵⁰ para la planta Solubles Instantáneos, la cual es de 1800 kg/día. Si se supone que no existen pérdidas de materia seca en los procesos de evaporación y secado posteriores a la extracción, se puede plantear que todos los sólidos solubles que se encuentran disueltos en el extracto a la salida de la extracción se convertirán en café soluble. A partir de estas consideraciones se aplicó la secuencia de operaciones que se describe a continuación.

1. Cálculo del flujo de café tostado y molido SECO que se debe alimentar.

$$X_{MS}^{CM} * CM = \frac{X_{MS}^{EC} * EC}{Y} * 100\%$$

2. Flujo de café tostado y molido que se debe cargar, incluyendo el contenido de humedad.

$$CM = \frac{X_{MS}^{CM} * CM}{1 - X_W^{CM}}$$

Donde X_{MS}^{CM} : Humedad del café tostado medido experimentalmente.

3. Agua contenida en el extracto, a partir de la concentración del extracto.

$$X_W^{EC} * EC = \frac{X_{MS}^{EC} * EC - 0,22X_{MS}^{EC} * EC}{0,22}$$

4. A partir de la relación café: agua se determinó la cantidad de agua fresca que se debe alimentar.

$$AF = 1,59 * CM$$

5. Mediante el balance por componente del agua se calculó el flujo de agua por la corriente de sólidos gastados.

$$X_W^{SG} * SG = X_W^{CT} * CT + AF - X_W^{EC} * EC$$

⁴⁸ GALINDO VELIZ, XIOMARA RAIZA. Producción e industrialización de café soluble. Caso: solubles instantáneos. [en línea]. Tesis, Universidad de Guayaquil, Guayaquil (Ecuador): 2011. [Consultado 25, julio, 2019]. Disponible en: <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/01/Galindo-Veliz-Xiomara-Raiza.pdf>

⁴⁹ ALCÁNTARA SÁNCHEZ, Roberto Carlos et. Al. Estudio de prefactibilidad de una planta productora de café soluble con raíz de achicoria. [en línea]. Trabajo de grado, Universidad Autónoma Metropolitana, México: S.F. [Consultado 24, julio, 2019]. Disponible en: <http://148.206.53.84/tesiuami/Evelin.pdf>

⁵⁰ Ibid.

6. Mediante el balance por componente del materia seca se calculó el flujo de materia seca por la corriente de sólidos gastados.

$$X_{MS}^{SG} * SG = X_{MS}^{CT} * CT - X_{MS}^{EC} * EC$$

7. Se calculó el flujo total de las corrientes de sólidos gastados y extracto mediante la suma de sus componentes.

$$SG = X_{MS}^{SG} * SG + X_w^{SG} * SG$$

$$EC = X_{MS}^{EC} * EC + X_w^{EC} * EC$$

Balance de materia en la molienda. Para el balance de materia en la molienda, se tomó una merma del 2%, con lo que se calculó el flujo de café tostado que se debe alimentar al molino para obtener la cantidad de café molido (CM) obtenido en el balance de materia de la extracción. Se supone que, la distribución granulométrica obtenida, es una variable que influencia sobre el consumo energético del proceso, mas no sobre su eficiencia en masa.

$$CT = CM + 0,02 * CM$$

Balance de materia en el tostador. La figura 34 muestra el diagrama y la nomenclatura de corrientes usada. Para el desarrollo del balance correspondiente al diagrama, se partió del flujo de materia calculado para el café tostado, como se muestra a continuación.

1. Se determinó el flujo de café verde que se debe alimentar al tostador, a partir del porcentaje de merma (obtenido experimentalmente) y del flujo de café tostado (CT) obtenido en el balance de la molienda.

$$CV = CT + \%merma * CT$$

2. Se determinó la composición del café verde que se alimenta, a partir de la humedad medida experimentalmente para el café verde (H_{CV}).

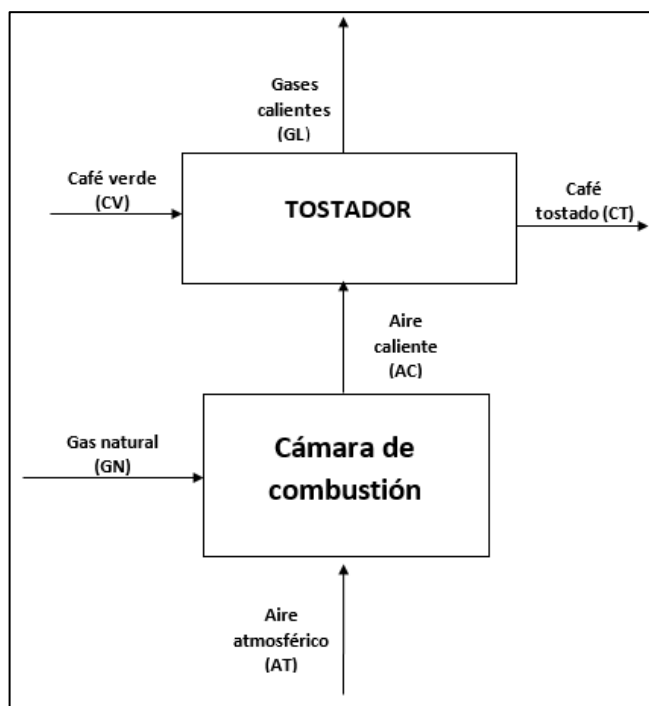
$$X_w^{CV} CV = CV * H_{CV}$$

$$X_{MS}^{CV} CV = CV - X_w^{CV} CV$$

3. Se calculó el flujo de los gases de salida del tostador.

$$GL = CV - CT$$

Figura 34. Diagrama planteado para el balance de materia el tostador.



Fuente: elaboración propia.

4. Se calculó la composición de los gases de salida, debido a que, esta corriente está compuesta no solo del agua que se evapora debido a la disminución del contenido de humedad del grano (X_w^{GL}), sino también del porcentaje de humedad generada a partir de materia seca⁵¹ (X_{MS}^{GL}).

$$X_w^{GL} GL = CV * H_{CV} - CT * H_{CT}$$

$$X_{MS}^{GL} GL = GL - X_w^{GL} GL$$

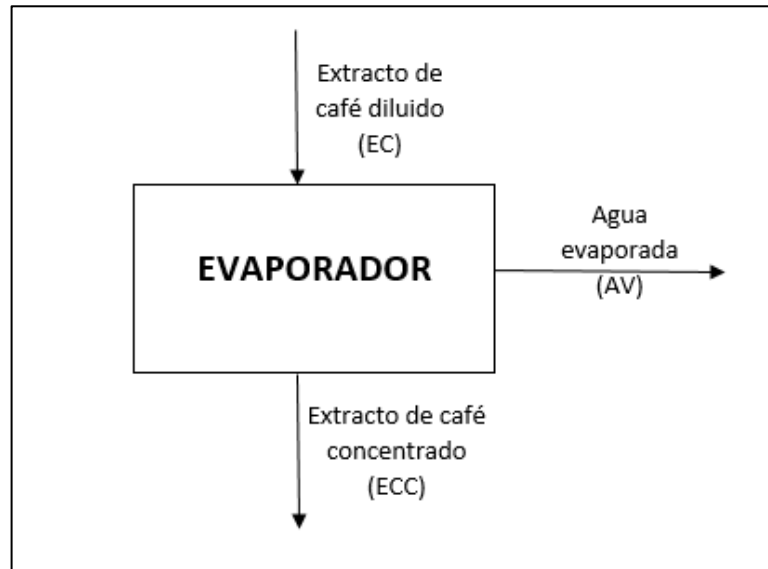
Balance de materia en el evaporador. Para el desarrollo del balance de materia del evaporador se estableció que se obtiene un extracto concentrado al 45%p/p a la salida de la operación⁵². Con este valor, se siguió la secuencia de operaciones

⁵¹ CLARKE, R. & MACRAE, R. Coffee Technology. Inglaterra: Elsevier Science Publishers LTD, 1989. 321 p. ISBN 139789401080286

⁵² GALINDO VELIZ, XIOMARA RAIZA. Producción e industrialización de café soluble. Caso: solubles instantáneos. [en línea]. Tesis, Universidad de Guayaquil, Guayaquil (Ecuador): 2011. [Consultado 25, julio, 2019]. Disponible en: <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/01/Galindo-Veliz-Xiomara-Raiza.pdf>

que se describe a continuación, la cual corresponde con la designación de corrientes presentada en la figura 35.

Figura 35. Diagrama planteado para el balance de materia en el evaporador.



Fuente: elaboración propia.

1. Se determinó el flujo de extracto concentrado a la salida de la operación.

$$ECC = \frac{X_{MS}^{EC} * EC}{X_{MS}^{ECC}}$$

Donde X_{MS}^{ECC} es la concentración del extracto a la salida (0,45)

2. Se calculó el flujo de agua evaporada.

$$AV = EC - ECC$$

3. Mediante el balance por componente del agua se obtiene el flujo de agua en el extracto.

$$X_w^{EC} * EC = X_w^{ECC} * ECC + AV$$

4. Se obtiene el flujo total de la corriente de extracto de salida, mediante la suma de sus componentes.

$$ECC = X_w^{ECC} * ECC + X_{MS}^{ECC} * ECC$$

Balance de materia en el secador por aspersion. Como una aproximación al fenómeno de secado por aspersion, se supone que no hay pérdidas de sólidos por arrastre con la corriente de aire.

Inicialmente, se consultó la humedad relativa de la ciudad de Medellín, debido a que, como se ha explicado el presente trabajo tiene como cliente objetivo la empresa productora de café soluble Colcafé, la cual tiene su planta de producción en dicha ciudad. La humedad relativa promedio para los meses de julio y agosto para Medellín es del 63%⁵³, con este valor y la temperatura promedio consultada, que tiene un valor de 24°C, se obtuvo la humedad absoluta del aire que ingresa al intercambiador de calor para calentarse por medio de los gases de combustión del gas natural; mediante la lectura en la carta psicrométrica que se consultó a una altura de 1500 msnm, que fue la más cercana a la altura de Medellín consultada (1490 msnm)⁵⁴. La humedad absoluta obtenida fue de 0,014 kg de agua/kg de aire seco.

El valor de la humedad del aire a la salida de la torre se tomó a partir de referencias bibliográficas como 80%BS, así como la humedad con la cual se debe obtener el café soluble, este valor no debe superar el 3,8%BS de acuerdo a la norma técnica colombiana 4159, por ende se tomó este valor límite para el balance.

Todas estas condiciones se resumen en el cuadro 20.

Cuadro 20. Condiciones de referencia tomadas para el secador por aspersión.

Humedad del café soluble ⁵⁵ (%BS)	3
Humedad del aire de entrada (%BS)	1,4
Humedad del aire de salida ⁵⁶ (%BS)	80

Fuente: elaboración propia.

Con estos valores, y a partir del diagrama establecido en la figura 36 se siguió la secuencia de operaciones que se describe a continuación.

1. Considerándose que los sólidos secos disueltos en el extracto se convierten en café soluble en su totalidad, y con el contenido de humedad establecido para el

⁵³ IDEAM. [Sitio web]. Bogotá D.C.: Características de ciudades principales y municipios turísticos. [30-07-2019]. Disponible en:

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>.

⁵⁴ Íbid.

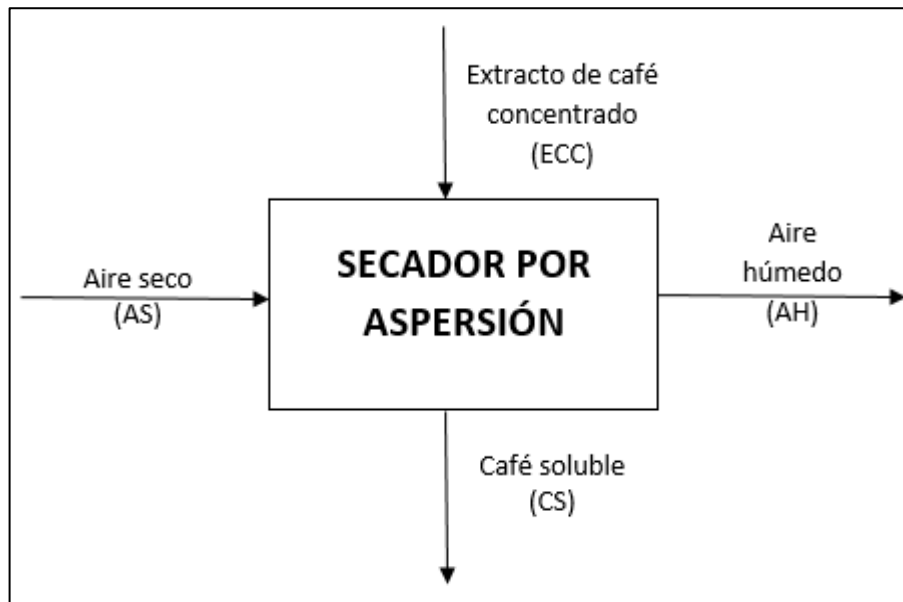
⁵⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Café instantáneo (soluble). NTC-4159. Bogotá D.C 2015. 10 p.

⁵⁶ ALCÁNTARA SÁNCHEZ, Roberto Carlos et. Al. Estudio de prefactibilidad de una planta productora de café soluble con raíz de achicoria. [en línea]. Trabajo de grado, Universidad Autónoma Metropolitana, México: S.F. [Consultado 24, julio, 2019]. Disponible en: <http://148.206.53.84/tesiuami/Evelin.pdf>

café soluble obtenido, se calculó el flujo de la corriente de café soluble (CS) a la salida de la operación.

$$CS = \frac{X_{MS}^{CS} * CS}{X_w^{CS}}$$

Figura 36. Diagrama planteado para el balance de materia en el secador por aspersión.



Fuente: elaboración propia.

2. Se determinó el flujo de agua que sale contenido en la corriente de café soluble.

$$X_w^{CS} * CS = CS - X_{MS}^{CS} * CS$$

3. A partir de la combinación del balance por componente del agua y del balance global de la operación se obtiene el flujo de la corriente de aire húmedo (AH) y aire seco (AS).

$$ECC + AS = AH + CS$$

$$X_w^{ECC} * ECC + X_w^{AS} * AS = X_w^{AH} * AH + X_w^{CS} * CS$$

4. Se calculó el flujo por componente de las dos corrientes de aire, a partir de las humedades que se tomaron de referencias bibliográficas, cabe aclarar que ambos valores se convirtieron a %BH para esta operación.

$$\%HumedadBS = \frac{X_w}{X_{MS}} * 100$$

A partir del procedimiento planteado para cada uno de los equipos, se obtuvieron los resultados que se presentan en las tablas 39 a 43, para cada una de las muestras de café trabajadas experimentalmente, las corrientes 14, 19, 27 y 28, así como las corrientes de vapor requerido se obtienen a partir del balance de energía que se describe en el anexo L.

Tabla 39. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café M-14/15.

Corriente	Flujo (kg/h)	Contenido de sólidos disueltos (X p/p)	Contenido de agua (X p/p)	Otros compuestos (Xc)
1	1239,784	0,89	0,11	0,00
2	169,159	0,32	0,68	0,00
3	1070,625	0,99	0,01	0,00
4	1,071	0,99	0,01	0,00
5	1069,555	0,99	0,01	0,00
6	1069,555	0,99	0,01	0,00
7	1700,592	0,00	1,00	0,00
8	1700,592	0,00	1,00	0,00
9	1747,419	0,47	0,53	0,00
10	1022,727	0,22	0,78	0,00
11	1022,727	0,22	0,78	0,00
12	500,000	0,45	0,55	0,00
13	508,181	1,00	0,00	0,00
14*	31,258	0,00	0,00	1,00
15	508,181	0,00	1,00	0,00
16	508,181	0,00	1,00	0,00
17	508,181	0,00	1,00	0,00
18	343,741	0,00	0,01	0,99
19*	1,811	0,00	0,00	1,00
20	343,741	0,00	0,01	0,99
21	610,191	0,00	0,80	0,20
22	233,550	0,96	0,04	0,00
23	522,727	0,00	1,00	0,00
24	5169,836	0,00	1,00	0,00
25	5169,836	0,00	1,00	0,00
26	5169,836	0,00	1,00	0,00
27*	344,011	0,00	0,00	1,00
28*	0,000	0,00	0,00	1,00

Fuente: elaboración propia.

* m³/h

Tabla 40. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café M-16.

Corriente	Flujo (kg/h)	Contenido de sólidos disueltos (X p/p)	Contenido de agua (X p/p)	Otros compuestos (Xc)
1	1131,853	0,89	0,11	0,00
2	154,432	0,31	0,69	0,00
3	977,420	0,99	0,01	0,00
4	0,977	0,99	0,01	0,00
5	976,443	0,99	0,01	0,00
6	976,443	0,99	0,01	0,00
7	1552,544	0,00	1,00	0,00
8	1552,544	0,00	1,00	0,00
9	1506,260	0,49	0,51	0,00
10	1022,727	0,22	0,78	0,00
11	1022,727	0,22	0,78	0,00
12	500,000	0,45	0,55	0,00
13	508,181	1,00	0,00	0,00
14*	31,258	0,00	0,00	1,00
15	508,181	0,00	1,00	0,00
16	508,181	0,00	1,00	0,00
17	508,181	0,00	1,00	0,00
18	343,741	0,00	0,01	0,99
19*	1,811	0,00	0,00	1,00
20	343,741	0,00	0,01	0,99
21	610,191	0,00	0,80	0,20
22	233,550	0,96	0,04	0,00
23	522,727	0,00	1,00	0,00
24	4719,769	0,00	1,00	0,00
25	4719,769	0,00	1,00	0,00
26	4719,769	0,00	1,00	0,00
27*	314,062	0,00	0,00	1,00
28*	0,000	0,00	0,00	1,00

Fuente: elaboración propia.

* m³/h

Tabla 41. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café M-17.

Corriente	Flujo (kg/h)	Contenido de sólidos disueltos (X p/p)	Contenido de agua (X p/p)	Otros compuestos (Xc)
1	1096,664	0,89	0,11	0,00
2	149,631	0,33	0,67	0,00
3	947,032	0,98	0,02	0,00
4	0,947	0,98	0,02	0,00
5	946,085	0,98	0,02	0,00
6	946,085	0,98	0,02	0,00
7	1504,276	0,00	1,00	0,00
8	1504,276	0,00	1,00	0,00
9	1427,634	0,49	0,51	0,00
10	1022,727	0,22	0,78	0,00
11	1022,727	0,22	0,78	0,00
12	500,000	0,45	0,55	0,00
13	508,181	1,00	0,00	0,00
14*	31,258	0,00	0,00	1,00
15	508,181	0,00	1,00	0,00
16	508,181	0,00	1,00	0,00
17	508,181	0,00	1,00	0,00
18	343,741	0,00	0,01	0,99
19*	1,811	0,00	0,00	1,00
20	343,741	0,00	0,01	0,99
21	610,191	0,00	0,80	0,20
22	233,550	0,96	0,04	0,00
23	522,727	0,00	1,00	0,00
24	4573,031	0,00	1,00	0,00
25	4573,031	0,00	1,00	0,00
26	4573,031	0,00	1,00	0,00
27*	304,298	0,00	0,00	1,00
28*	0,000	0,00	0,00	1,00

Fuente: elaboración propia.

* m³/h

Tabla 42. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café M-18

Corriente	Flujo (kg/h)	Contenido de sólidos disueltos (X p/p)	Contenido de agua (X p/p)	Otros compuestos (Xc)
1	1345,898	0,89	0,11	0,00
2	183,637	0,31	0,69	0,00
3	1162,261	0,99	0,01	0,00
4	1,162	0,99	0,01	0,00
5	1161,099	0,99	0,01	0,00
6	1161,099	0,99	0,01	0,00
7	1846,147	0,00	1,00	0,00
8	1846,147	0,00	1,00	0,00
9	1984,518	0,46	0,54	0,00
10	1022,727	0,22	0,78	0,00
11	1022,727	0,22	0,78	0,00
12	500,000	0,45	0,55	0,00
13	508,181	1,00	0,00	0,00
14*	31,258	0,00	0,00	1,00
15	508,181	0,00	1,00	0,00
16	508,181	0,00	1,00	0,00
17	508,181	0,00	1,00	0,00
18	343,741	0,00	0,01	0,99
19*	1,811	0,00	0,00	1,00
20	343,741	0,00	0,01	0,99
21	610,191	0,00	0,80	0,20
22	233,550	0,96	0,04	0,00
23	522,727	0,00	1,00	0,00
24	5612,327	0,00	1,00	0,00
25	5612,327	0,00	1,00	0,00
26	5612,327	0,00	1,00	0,00
27*	373,455	0,00	0,00	1,00
28*	0,000	0,00	0,00	1,00

Fuente: elaboración propia.

* m³/h

Tabla 43. Balance de materia del proceso de producción de café soluble a partir de café M-RC.

Corriente	Flujo (kg/h)	Contenido de sólidos disueltos (X p/p)	Contenido de agua (X p/p)	Otros compuestos (Xc)
1	1214,312	0,89	0,11	0,00
2	165,683	0,32	0,68	0,00
3	1048,628	0,98	0,02	0,00
4	1,049	0,98	0,02	0,00
5	1047,580	0,98	0,02	0,00
6	1047,580	0,98	0,02	0,00
7	1665,652	0,00	1,00	0,00
8	1665,652	0,00	1,00	0,00
9	1690,504	0,48	0,52	0,00
10	1022,727	0,22	0,78	0,00
11	1022,727	0,22	0,78	0,00
12	500,000	0,45	0,55	0,00
13	508,181	1,00	0,00	0,00
14*	31,258	0,00	0,00	1,00
15	508,181	0,00	1,00	0,00
16	508,181	0,00	1,00	0,00
17	508,181	0,00	1,00	0,00
18	343,741	0,00	0,01	0,99
19*	1,811	0,00	0,00	1,00
20	343,741	0,00	0,01	0,99
21	610,191	0,00	0,80	0,20
22	233,550	0,96	0,04	0,00
23	522,727	0,00	1,00	0,00
24	5063,618	0,00	1,00	0,00
25	5063,618	0,00	1,00	0,00
26	5063,618	0,00	1,00	0,00
27*	336,943	0,00	0,00	1,00
28*	0,000	0,00	0,00	1,00

Fuente: elaboración propia.

* m³/h

ANEXO L

CÁLCULOS DEL BALANCE DE ENERGÍA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CAFÉ SOLUBLE.

Balance de energía en el tostador. Para el desarrollo del balance en el tostador, se consideró un tostador alimentado con gas natural, el cual se quema en una cámara de combustión y calienta el aire que fluye a través del cilindro donde se cargan los granos de café verde, se consideró además que la transferencia de calor se da únicamente por convección entre el aire caliente y los granos de café y que la corriente de aire que se calienta y los gases producto de la combustión del gas natural NO se mezclan o entran en contacto, debido a criterios de salubridad, por tratarse del procesamiento de un producto con fines alimenticios.. Se tomaron las condiciones que se presentan en el cuadro 21. a partir de la literatura consultada.

Cuadro 21. Condiciones de operación planteadas para el balance de energía del tostador.

Temperatura del aire atmosférico (°C)	24
Temperatura de los gases calientes que ingresan al tostador (°C)	250
Temperatura de los gases liberados (°C)	240
Temperatura de salida del café tostado (°C)	205
Calor específico del café verde ⁵⁷ (kJ/kg °C)	$c_p = 0,95657 + 9,6246H_{BH}$
Calor específico del aire a temperatura promedio de entrada y salida del tostador ($T_{prom}=245^{\circ}C$) ⁵⁸ (kJ/kg)	1,043
Entalpía del aire como gas ideal a 24°C (kJ/kg) ⁵⁹	526,735
Entalpía del aire como gas ideal a 250°C (kJ/kg) ⁶⁰	297,17
Poder calorífico del gas natural ⁶¹ (PC) (kJ/m ³)	41709,1543

Fuente: elaboración propia.

⁵⁷ MONTOYA RESTREPO, Esther Cecilia et.al. Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. *Cenicafé*. 1990, Vol. 41, Nro.1, p 19-37.

⁵⁸ CENGEL, Y.A., BOLES, M.A. Apéndice 1. En: Termodinámica. 8ª ed. México D.C.: McGraw Hill, 2015. P 722-768.

⁵⁹ Ibid.

⁶⁰ Ibid.

⁶¹ VANTI. [sitio web]. Bogotá D.C.: Tarifas gas natural S.A., ESP, Informe para el mes de junio de 2019. [28-07-2019]. Disponible en:

<https://www.grupovanti.com/servlet/ficheros/1297163049484/GNCBPublicacionJunio2019-TarifasReguladasyCargoDistribuci%C3%B3n.pdf>

Con estos valores se aplicó la secuencia de operaciones que se describe a continuación, la nomenclatura de corrientes corresponde a las de la figura 34 del anexo K.

1. Se determinó el calor necesario para tostar los granos de café desde la temperatura de alimentación hasta su temperatura final.

$$Q_{tostador} = \dot{m}c_{p \text{ café verde}}(T_{ct} - T_{cv})$$

Donde $c_{p \text{ café verde}}$ se determinó a partir de la humedad el grano verde determinada experimentalmente para cada muestra con la relación establecida en el cuadro 1.

2. Se corrigió el valor de calor requerido en el tostador, a partir de la eficiencia reportada por Clarke (γ), la cual tiene un valor del 81%.

$$Q_{real \text{ tostador}} = Q_{tostador} + (1 - \gamma)Q_{tostador}$$

3. Se calculó el flujo de aire caliente a la temperatura de entrada establecida, necesario para transferir dicho calor a los granos de café, mediante el valor del calor específico promedio del aire como gas ideal consultado.

$$\dot{m}_{AC} = \frac{Q_{real \text{ tostador}}}{C_{p \text{ prom aire}}(250^{\circ}C - 240^{\circ}C)}$$

4. Se consideró que todo el aire caliente que ingresa al tostador, es tomado del ambiente, filtrado y calentado en una cámara de combustión, por ende $\dot{m}_{AC} = \dot{m}_{AT}$, de esta manera, se calculó el calor que se requiere producir en la cámara de combustión para calentar dicha cantidad de aire.

$$Q_{caámara} = \dot{m}_{AC}(h_{aire \text{ a } 250^{\circ}C} - h_{aire \text{ a } 24^{\circ}C})$$

5. Si se considera que todo el calor generado en la cámara de combustión corresponde al calor producto de la combustión de gas natural y que no hay pérdidas hacia los alrededores, se calculó el flujo requerido de gas natural a partir de su poder de combustión consultado (PC).

$$\frac{Q_{caámara}}{PC} = \dot{m}_{GN}$$

Balance de energía en la molienda. De acuerdo a consulta bibliográfica, se estableció que el consumo energético del molino se ve influenciado principalmente

por variados parámetros, que por un lado, se definen por las propiedades del material a moler y por otra parte por los datos de servicio y diseño del molino.⁶² Como la materia prima que se alimenta al proceso no cambia, el dimensionamiento del consumo industrial de la molienda depende solamente del diseño del equipo. Sin embargo, el escalamiento del diseño del equipo no hace parte del alcance del presente proyecto, por ende se utilizaron las ecuaciones de Kick, Rittinger y Bond, las cuales provienen de metodologías aceptadas para la correlación de la granulometría obtenida, con el flujo de la alimentación para estimar el costo de la operación de molienda.

Para esto, se molió una cantidad de 150 g del café tostado de las muestras seleccionadas, el diámetro de los granos alimentados fue obtenido previamente mediante la medición de sus dimensiones y el cálculo del diámetro geométrico y aritmético, a partir de las ecuaciones 12 y 13. Durante la molienda, se registró el amperaje del molino mediante el uso de un multímetro y se registró además el tiempo que tomó moler la cantidad alimentada. Una vez molida la muestra se realizó el análisis granulométrico de acuerdo al procedimiento de la NTC 2441, el cual fue descrito en el numeral 3.1.1.3 el presente trabajo, obteniéndose el tamaño promedio de partícula de cada muestra. Este procedimiento se realizó por duplicado para cada muestra de café.

Ecuación 12. Ecuación del diámetro aritmético.

$$Da_1 = \frac{largo + ancho + alto}{3}$$

Fuente: DURSUN, E. & DURSUN, I. Some physical properties of caper seed. *Biosystems Engineering*. 2005, Vol. 92, Nro. 2, p. 237-245. Doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.06.003

Ecuación 13. Ecuación del diámetro geométrico.

$$Dg_1 = (largo * ancho * alto)^{\frac{1}{3}}$$

Fuente: DURSUN, E. & DURSUN, I. Some physical properties of caper seed. *Biosystems Engineering*. 2005, Vol. 92, Nro. 2, p. 237-245. Doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.06.003

⁶² WASMUTH, H.D. La determinación de la aptitud a la molienda y del consumo específico de energía según el ensayo de Bond para la molienda de minerales y rocas. *Materiales de construcción*. 1970, Vol. 20, Nro.140, p. 19-31.

A partir de estos resultados, se estimaron las constantes de Rittinger, Kick y Bond para cada muestra de café, mediante el despeje de las ecuaciones 14, 15 y 16; con lo que se obtuvieron los valores que se muestran en la tabla 44.

Ecuación 14. Ecuación del modelo de Rittinger.

$$K_r \left[\frac{1}{D_{sp}} - \frac{1}{D_{sa}} \right] = \frac{P}{m}$$

Fuente: PERRY, R. Manual del ingeniero químico. México: McGraw Hill, 1984.

Ecuación 15. Ecuación del modelo de Kick.

$$K_k * \ln \left(\frac{D_{sa}}{D_{sp}} \right) = \frac{P}{m}$$

Fuente: PERRY, R. Manual del ingeniero químico. México: McGraw Hill, 1984.

Ecuación 16. Ecuación del modelo de Bond.

$$K_B * \left[\frac{1}{\sqrt{D_{pp}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right] = \frac{P}{m}$$

Fuente: PERRY, R. Manual del ingeniero químico. México: McGraw Hill, 1984.

Donde: K_R , K_k y K_B corresponden a las constantes de Rittinger, Kick y Bond respectivamente; D_{sa} y D_{sp} son el diámetro promedio de partícula de la alimentación y de la muestra molida respectivamente en mm, P es la potencia medida en kW y m el flujo de la alimentación en Ton/min para el modelo de Kick y Rittinger y ton corta/h para el modelo de Bond.

Tabla 44. Constantes de Kick, Rittinger y Bond obtenidas para cada muestra de café tostado.

Muestra	Constante de Kick	Constante de Rittinger	Constante de Bond
	$\left[\frac{KW}{\frac{TON}{min}} \right]$	$\left[\frac{KW \text{ mm}}{\frac{TON}{min}} \right]$	$\left[\frac{KW \text{ mm}^{\frac{1}{2}}}{\frac{Ton \text{ corta}}{h}} \right]$
M-13	2986,942	4116,263	113,613
M-14/15	2466,189	3226,609	91,720
M-16	2666,689	3525,125	99,619
M-17	2650,791	3638,846	100,660
M-18	2864,928	4041,843	110,089
M-RC	2557,736	3609,076	98,296

Fuente: elaboración propia.

A partir de los valores de las constantes obtenidas, se realizó el cálculo de la potencia requerida por el molino, a partir de la alimentación de café de cada muestra, para esto se utilizaron los diámetros del café tostado medidos en la experimentación y el diámetro promedio de partícula obtenido también en dichos ensayos, con lo cual, la variable que se modificó con respecto a los ensayos de laboratorio fue el flujo de la alimentación, el cual se reemplazó por el valor de la alimentación obtenido mediante el balance de materia realizado. Los diámetros de alimentación y muestra molida usados se presentan en la tabla 45, así como la relación de reducción obtenida para cada muestra y calculada como el diámetro promedio de la alimentación en mm sobre el diámetro promedio de la muestra molida en mm.

Tabla 45. Tamaños promedio de la alimentación y la muestra molida obtenida en los ensayos de molienda.

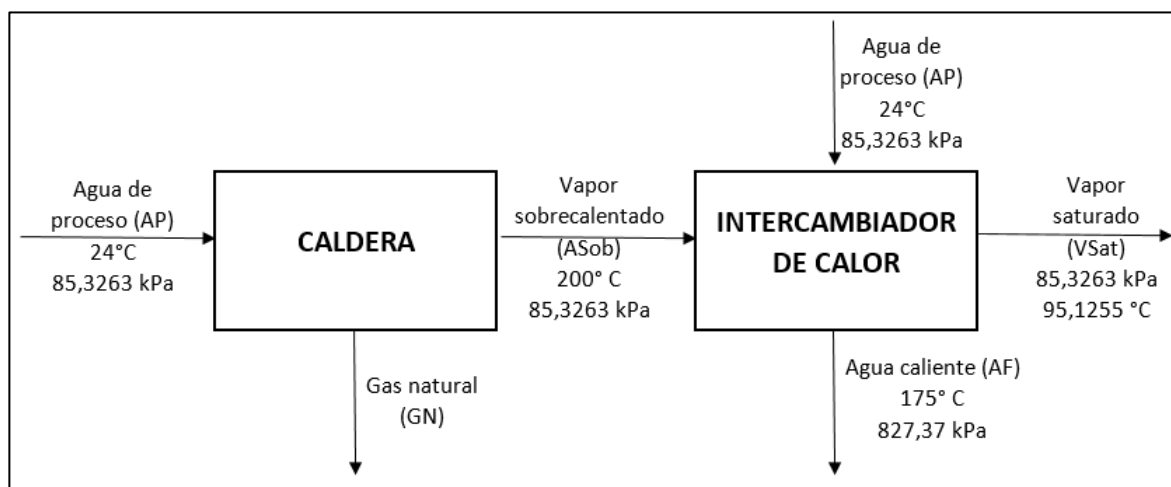
Muestra	Diámetro promedio de la alimentación (mm)	Diámetro promedio de salida (mm)	Relación de reducción
M-13	6,3159	0,4753	13,29
M-14/15	7,4280	0,4414	16,83
M-16	7,5505	0,4479	16,86
M-17	7,8135	0,4726	16,53
M-18	7,9165	0,4914	16,11
M-RC	7,1175	0,4914	14,48

Fuente: elaboración propia.

Balance de energía en la batería de extracción. Para el balance de energía en la extracción, se consideraron las etapas previas de obtención del agua a la temperatura de alimentación requerida, de acuerdo a lo mencionado en el anexo K sobre esta operación, esto debido a que para el cálculo del calor disipado en la batería, se requieren datos de entalpía del extracto obtenido, valores que no se logró obtener en la literatura; por lo tanto, se planteó el balance para el intercambiador de calor con vapor, mediante el cual se calienta la corriente de agua que se alimenta a la batería (AF) y posteriormente se estableció el balance en la caldera, necesaria para la generación del vapor, todo esto con el objetivo de estimar el flujo de servicio industrial, en este caso de gas natural requerido para el proceso.

La nomenclatura de las corrientes, así como las condiciones de operación tomadas de literatura se presentan en la figura 37.

Figura 37. Diagrama planteado para el cálculo de calor requerido en la extracción.



Fuente: elaboración propia.

A partir de las condiciones de presión y temperatura tomadas, se obtuvieron de las tablas del agua las entalpías de cada corriente que se muestran en el cuadro 22.

Cuadro 22. Valores de entalpía de las corrientes de agua y poder calorífico del gas natural usados en el balance de energía.

Entalpía del agua a la salida del intercambiador ⁶³ (h_{AF}) (kJ/kg)	2 777,92
Entalpía del agua de proceso a la entrada del intercambiador de calor ⁶⁴ (h_{AP}) (kJ/kg)	100,724
Entalpía del vapor sobrecalentado (h_{VSob}) ⁶⁵ (kJ/kg)	2 876,13
Entalpía del vapor saturado ⁶⁶ (h_{VSat}) (kJ/kg)	2 667,98
Poder calorífico del gas natural PC (kJ/m ³)	4 1709,1543
Calor específico del agua a temperatura promedio de entrada y salida del intercambiador ⁶⁷ (75 °C) (kJ/kg °C)	4,1906

Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos presentados anteriormente se llevó a cabo la siguiente secuencia de operaciones para calcular el flujo de servicio requerido para la operación de extracción.

⁶³ CENGEL, Y.A., BOLES, M.A. Apéndice 1. En: Termodinámica. 8ª ed. México D.C.: McGraw Hill, 2015. P 722-768.

⁶⁴ Íbid, p. 904.

⁶⁵ Íbid, p. 908.

⁶⁶ Íbid, p. 906.

⁶⁷ Íbid, p. 902.

1. Se calculó el calor requerido en el intercambiador para calentar el agua de proceso hasta la temperatura requerida.

$$Q_{intercambiador} = \dot{m}c_{p\text{ agua}}(175^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C})$$

2. Con este calor, se determinó el flujo de vapor requerido para transferir dicho calor al agua de proceso.

$$\dot{m}_{VSob} = \dot{m}_{VSat} = \frac{Q_{intercambiador}}{h_{VSob} - h_{VSat}}$$

3. A partir de este flujo se determinó el calor requerido en la caldera.

$$Q_{caldera} = \dot{m}_{VSob}(h_{VSob} - h_{AP})$$

4. Con este calor, se determinó el flujo requerido de gas natural, a partir del poder calorífico consultado.

$$\dot{m}_{GN} = \frac{Q_{caldera}}{CP}$$

Balance de energía en el evaporador. Para el desarrollo del balance de energía en el evaporador, se requirieron los datos de temperatura de ebullición y calor de vaporización del extracto, estos dos valores fueron estimados por Alcántara⁶⁸ a partir de una metodología de aproximación, por ende se decidió trabajar con las condiciones que estos autores mencionan en sus trabajo; por otro lado se tomó el valor del calor específico del agua a las condiciones de entrada del extracto, como aproximación al fenómeno real, debido a que no se logró obtener dicho valor a partir de literatura. Las condiciones de usadas para el balance se resumen en el cuadro 23.

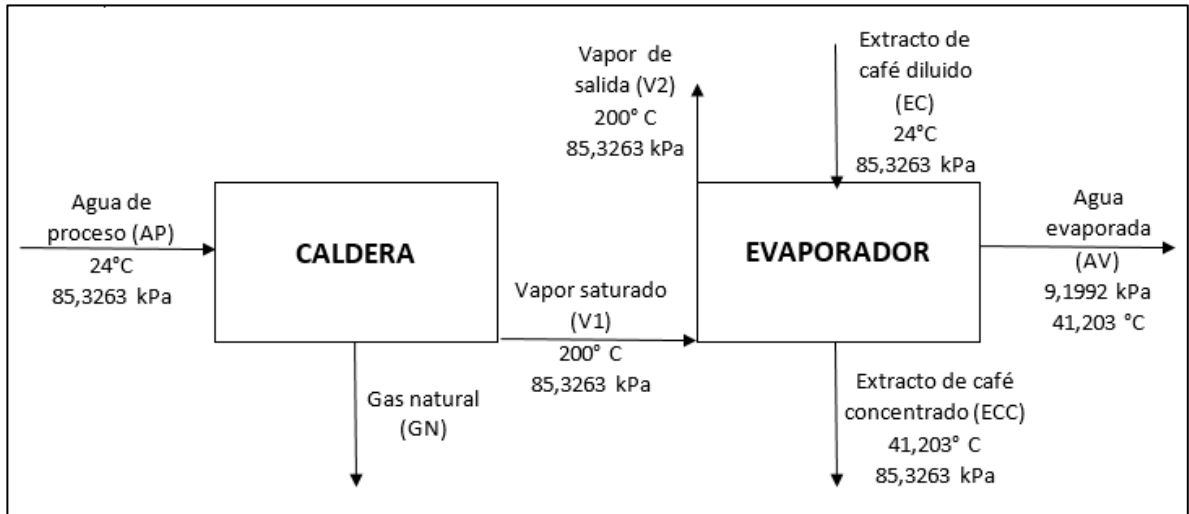
⁶⁸ ALCÁNTARA SÁNCHEZ, Roberto Carlos et. Al. Estudio de prefactibilidad de una planta productora de café soluble con raíz de achicoria. [en línea]. Trabajo de grado, Universidad Autónoma Metropolitana, México: S.F. [Consultado 24, julio, 2019]. Disponible en: <http://148.206.53.84/tesiuami/Evelin.pdf>

Cuadro 23. Condiciones usadas para el balance de energía en el evaporador.

Entalpía de vaporización del vapor a la entrada del evaporador (λ_{V1}) (kJ/kg agua)	2 267,7489
Presión de operación del evaporador (kPa)	9,1982
Temperatura de ebullición del extracto a la presión de operación del evaporador (T_{eb}) (°C)	41,203
Entalpía de vaporización del extracto a temperatura de ebullición (λ_{EC}) (kJ/kg agua)	2 399,3148
Entalpía del vapor a la entrada del evaporador (h_{V1}) (kJ/kg)	2 666,2122
Entalpía del agua evaporada (h_{AV}) (kJ/kg)	2401,7076
Entalpía del extracto a la entrada del evaporador por aproximación a la del agua (h_{EC}) (kJ/kg)	100,723

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Diagrama planteado para el cálculo de calor requerido en el evaporador.



Fuente: elaboración propia.

A partir de estas condiciones de operación se desarrolló la secuencia de operaciones que se describe a continuación.

1. Se estimó el calor retirado del extracto para lograr la evaporación del contenido de agua establecido mediante el balance de materia.

$$Q = \dot{m}_{AV}\lambda_{AV} + \dot{m}_{EC}c_p EC(T_{eb} - T_{EC})$$

2. A partir del calor obtenido, se calculó el flujo de vapor requerido para evaporar la cantidad de agua establecida en el balance de materia (V1), mediante

el balance global de la operación y se canceló el término del extracto de salida debido a que se encontraba en las condiciones de referencia⁶⁹.

$$ECh_{EC} + V_1h_{v1} = AVh_{AV}$$

3. Con este valor, se planteó el balance de calor en la caldera, en la cual se generaría dicho vapor.

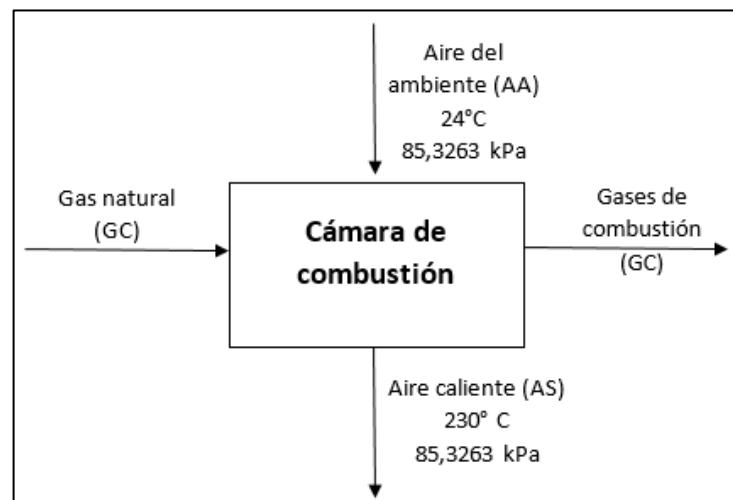
$$Q_{caldera} = V_1 * (h_{v1} - h_{AP})$$

4. Con el calor de la caldera se obtuvo el flujo de gas natural requerido para obtener el vapor en las condiciones planteadas, a partir del poder calorífico consultado para el gas natural.

$$\dot{m}_{GN} = \frac{Q_{caldera}}{PC}$$

Balance de energía en el secador por aspersión. Para determinar el consumo de servicio de la operación de secado, se consideró el balance en la cámara de combustión en la cual se generan los gases de combustión que calientan el aire que ingresa a la torre y arrastra el agua contenido en las gotas de extracto que se alimentan a la torre. Para esto se estableció de acuerdo a referencias bibliográficas, que el aire debe ingresar a la torre a una temperatura de 230 ° C se planteó el balance en la cámara de acuerdo a la figura 39.

Figura 39. Diagrama planteado para el cálculo de calor requerido en la operación de secado.



Fuente: elaboración propia.

⁶⁹ GEANKOPLIS, Christie. Secado de materiales de proceso. En: Procesos de transporte y operaciones unitarias. México: Compañía editorial continental, S.A., 1998. P 579-634.

Para la corriente de entrada, a partir de las condiciones que se describieron en el balance de materia, se leyó en la carta psicrométrica el valor de la entalpía, obteniéndose un valor de $H_{AA}= 60,25$ kJ/kg. Al suponer que el aire a la salida de la cámara de combustión, posee la misma humedad absoluta del aire de entrada, de igual forma se encuentra a la misma presión, se obtuvo la entalpía de esta corriente de salida, mediante el uso de la siguiente relación obtenida de la literatura⁷⁰:

$$H_{AS} = C_s(T - T_0) + H\lambda_0$$

Donde, H_{AS} es la entalpía de la corriente de aire a 230°C en kJ/kg, T es la temperatura en °C a la cual se desea calcular la entalpía (230°C), T_0 es la temperatura de referencia de las tablas de vapor de agua (0°C),⁷¹ H es la humedad absoluta de la corriente en su valor decimal, λ_0 es la entalpía de vaporización del vapor de agua a la temperatura de referencia obtenida de tablas de vapor del agua⁷² en kJ/kg y C_s es el calor húmedo de la mezcla de aire y vapor de agua obtenida mediante la relación:

$$C_s = C_{p \text{ aire a } 230^\circ\text{C}} + C_{p \text{ vapor de agua a } 230^\circ\text{C}} * \text{Humedad absoluta}^{73}$$

Con esta relación y a partir de la consulta de los coeficientes del calor específico del aire se obtuvo que $C_s=1,0651$ kJ/kg °C. Además el valor de la entalpía de vaporización a temperatura de referencia de 0°C leído de tablas es de 2501,4 kJ/kg. Con estos valores, se calculó $H_{AS}= 279,9926$ kJ/kg.

De esta forma, a partir del balance de entalpías de las corrientes de aire se obtuvo el calor requerido en la cámara de combustión. Es importante aclarar que se supone que los gases producto de la combustión de gas natural y el aire no entran en contacto directo y por ende no se mezclan, esto en base a que se trata de la producción de un producto alimenticio que no se puede ver contaminado por los gases contaminantes que se generan en la combustión de gas natural.

$$Q_{cámara} = \dot{m}_{AH}(H_{AH} - H_{AA})$$

Obtenido el calor de la cámara y suponiendo que no hay pérdidas en el equipo y que todo el calor requerido proviene de la combustión del combustible usado, se calculó el flujo requerido de gas natural, a partir del poder calorífico consultado.

$$\dot{m}_{GN} = \frac{Q_{cámara}}{PC}$$

⁷⁰ GEANKOPLIS, Christie. Secado de materiales de proceso. En: Procesos de transporte y operaciones unitarias. México: Compañía editorial continental, S.A., 1998. P 579-634.

⁷¹ Íbid, p. 946.

⁷² Íbid, p. 946.

⁷³Íbid, p. 587.

A partir del procedimiento planteado, se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas 46 a 50.

Tabla 46. Resultados del balance de calor realizado para la muestra M-14/15.

Equipo	Q del equipo (kW)	Equipo complementario	Q del equipo complementario (kW)
Tostador	146,631	Cámara de combustión	3227,366
Molino	-	-	-
Batería de extracción	358,291	Intercambiador de calor/caldera	3985,665
Evaporador	338,690	Caldera	362,148
Secador por aspersión	-	Cámara de combustión	20,982

Fuente: elaboración propia.

Tabla 47. Resultados del balance de calor realizado para la muestra M-16.

Equipo	Q del equipo (kW)	Equipo complementario	Q del equipo complementario (kW)
Tostador	133,866	Cámara de combustión	2946,403
Molino	-	-	-
Batería de extracción	270,719	Intercambiador de calor/caldera	3638,687
Evaporador	338,690	Caldera	362,147
Secador por aspersión	-	Cámara de combustión	20,981

Fuente: elaboración propia.

Tabla 48. Resultados del balance de calor realizado para la muestra M-17.

Equipo	Q del equipo (kW)	Equipo complementario	Q del equipo complementario (kW)
Tostador	129,704	Cámara de combustión	2854,799
Molino	-	-	-
Batería de extracción	242,167	Intercambiador de calor/caldera	3525,561
Evaporador	338,690	Caldera	362,148
Secador por aspersión	-	Cámara de combustión	20,982

Fuente: elaboración propia.

Tabla 49. Resultados del balance de calor realizado para la muestra M-18.

Equipo	Q del equipo (kW)	Equipo complementario	Q del equipo complementario (kW)
Tostador	159,182	Cámara de combustión	3503,599
Molino	-	-	-
Batería de extracción	444,390	Intercambiador de calor/caldera	4326,802
Evaporador	338,690	Caldera	362,148
Secador por aspersión	-	Cámara de combustión	20,982

Fuente: elaboración propia.

Tabla 50. Resultados del balance de calor realizado para la muestra M-RC.

Equipo	Q del equipo (kW)	Equipo complementario	Q del equipo complementario (kW)
Tostador	143,619	Cámara de combustión	3161,057
Molino	-	-	-
Batería de extracción	337,624	Intercambiador de calor/caldera	3903,776
Evaporador	338,690	Caldera	362,148
Secador por aspersión	-	Cámara de combustión	20,982

Fuente: elaboración propia.

ANEXO M

ESTIMACIÓN DE COSTOS VARIABLES DEL PROCESAMIENTO INDUSTRIAL DE CADA MUESTRA

Tabla 51. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-14/15.

Equipo	Servicio que requiere	Flujo de servicio requerido		Costo del servicio al día
Tostador	Gas natural	278,5604	m ³ /h	\$ 2 328 876,14
Molino	Energía eléctrica	958,8152	kW*h	\$ 536 051,90
Batería de extracción	Gas natural	344,0107	m ³ /h	\$ 2 876 066,96
Evaporador	Gas natural	31,2577	m ³ /h	\$ 261 326,67
Secador por aspersión	Gas natural	1,8110	m ³ /h	\$ 15 140,53
TOTAL				\$ 6 017 462

Fuente: elaboración propia.

Tabla 52. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-16.

Equipo	Servicio que requiere	Flujo de servicio requerido		Costo del servicio al día
Tostador	Gas natural	254,3099	m ³ /h	\$ 2 126 132,61
Molino	Energía eléctrica	1031,0911	kW*h	\$ 576 459,71
Batería de extracción	Gas natural	314,0624	m ³ /h	\$ 2 625 686,98
Evaporador	Gas natural	31,2577	m ³ /h	\$ 261 326,67
Secador por aspersión	Gas natural	1,8110	m ³ /h	\$ 15 140,53
TOTAL				\$ 5 604 747

Fuente: elaboración propia.

Tabla 53. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-17.

Equipo	Servicio que requiere	Flujo de servicio requerido		Costo del servicio al día
Tostador	Gas natural	246,4034	m ³ /h	\$ 2 060 031,11
Molino	Energía eléctrica	1005,1231	kW*h	\$ 561 941,63
Batería de extracción	Gas natural	304,2982	m ³ /h	\$ 2 544 054,33
Evaporador	Gas natural	31,2577	m ³ /h	\$ 261 326,67
Secador por aspersión	Gas natural	1,8110	m ³ /h	\$ 15 140,53
TOTAL				\$ 5 442 494

Fuente: elaboración propia.

Tabla 54. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-18.

Equipo	Servicio que requiere	Flujo de servicio requerido		Costo del servicio al día
Tostador	Gas natural	302,4026	m ³ /h	\$ 2 528 206,65
Molino	Energía eléctrica	1070,4149	kW*h	\$ 598 444,75
Batería de extracción	Gas natural	373,4549	m ³ /h	\$ 3 122 232,01
Evaporador	Gas natural	31,2577	m ³ /h	\$ 261 326,67
Secador por aspersion	Gas natural	1,8110	m ³ /h	\$ 15 140,53
TOTAL				\$ 6 525 351

Fuente: elaboración propia.

Tabla 55. Costos de operación estimados para cada operación con la muestra M-RC.

Equipo	Servicio que requiere	Flujo de servicio requerido		Costo del servicio al día
Tostador	Gas natural	272,8371	m ³ /h	\$ 2 281 027,43
Molino	Energía eléctrica	955,9224	kW*h	\$ 534 434,62
Batería de extracción	Gas natural	336,9427	m ³ /h	\$ 2 816 975,76
Evaporador	Gas natural	31,2577	m ³ /h	\$ 261 326,67
Secador por aspersion	Gas natural	1,8110	m ³ /h	\$ 15 140,53
TOTAL				\$ 5 908 905

Fuente: elaboración propia.