



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Efecto de la composición del café cosechado (*Coffea arábica* L.) sobre la calidad sensorial de la bebida en fincas con potencial de producción de cafés especiales en el suroeste del departamento de Antioquia

Víctor Manuel Martínez Castro

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos

Área curricular Agro Ingeniería y Alimentos

Maestría Ingeniería Agroindustrial

Medellín, Colombia

2016

Efecto de la composición del café cosechado (*Coffea arabica* L.) sobre la calidad sensorial de la bebida en fincas con potencial de producción de cafés especiales en el suroeste del departamento de Antioquia

Víctor Manuel Martínez Castro

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Agroindustrial

Director:

D.Sc, Iván Darío Aristizábal Torres

Codirector:

D.Sc, Edilson León Moreno Cárdenas

Línea de Investigación:

Agroindustria y Poscosecha

Grupo de Investigación:

Ingeniería Agrícola

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos

Área curricular Agro Ingeniería y Alimentos

Maestría Ingeniería Agroindustrial

Medellín, Colombia

2016

Dedicatoria

A Dios por concederme la oportunidad de seguir avanzando en sus designios, a mi Esposa Heidi Yaikana por apoyarme y acompañarme incondicionalmente en esta travesía, a mis Hijos Aura Helena y Emmanuel por proveer amor, esperanza y fe todos los días, son mi principal razón de existencia junto con mis Padres y Hermanas.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y a sus Profesores del Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, por su contribución a la alta formación académica y préstamo de equipos e instalaciones como el Laboratorio de Mecanización Agrícola y de Procesos Agrícolas para el desarrollo de esta investigación.

A la Gobernación de Antioquia que a través del proyecto “Antioquia: Origen de Cafés Especiales” al financiar la mayor parte de la investigación; así como la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia a través de la DIME.

Al Profesor Iván Darío Aristizábal Torres, Director de la investigación, miembro del Grupo de Investigación de Ingeniería Agrícola, por el continuo acompañamiento en la orientación de la investigación en asesorías, ajustes y por darme la oportunidad de pertenecer al grupo de investigadores en el proyecto “Antioquia: Origen de Cafés Especiales”.

Al Profesor Edilson León Moreno Cárdenas, Codirector de la investigación, Profesor Auxiliar del Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos por que fue inicialmente el gestor de esta iniciativa, al abrirme el espacio en la valiosa comunidad Académica de la Universidad Nacional de Colombia, sus continuas asesorías, orientaciones académicas y personales, fueron de gran apoyo para cumplir este propósito.

A mi Esposa e Hijos (Heidy Yaikana Triana Andrade, Aura Helena y Emmanuel) por su apoyo incondicional en este proyecto desarrollado en las hermosas tierras Antioqueñas.

A mis padres (Miryam Castro Gonzales. y Manuel Ignacio Martínez Villarreal) y Hermanas (Luz Adriana y Sandra junto con sus familias) por todo el apoyo prestado desde la distancia para este objetivo.

Al Magister Jhon Wilson Mejía Montoya, Director de la Línea de Cultivo en el proyecto “Antioquia: Origen de Cafés Especiales” por sus orientaciones y apoyo incondicional en el desarrollo de la investigación.

Al Profesor Guillermo Antonio Correa Londoño de la Facultad de Ciencias Agrarias, por su asesoría en el diseño experimental y análisis estadísticos.

Al Profesor Héctor José Ciro Velásquez del Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, por sus orientaciones y disposición de equipos y espacio en el Laboratorio de Procesos Agrícolas, ubicado en la planta física de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Al Profesor Fernando Álvarez Mejía del Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, quien fue uno de los gestores iniciales del proyecto “Antioquia: Origen de Cafés Especiales” ante la Gobernación de Antioquia en su componente de Investigación, por permitirme ingresar a este grupo selecto de investigadores y realizar este trabajo de investigación.

A los Caficultores Sergio Tobón Vélez, Marco Aurelio Cardona y Edison Gil Callejas por facilitar las actividades de muestreo en sus fincas, y la gran calidez humana de sus familias en el tiempo que nos acogieron en sus hogares.

A la Señora María Victoria López Franco por todo su apoyo incondicional en las actividades diarias y trámites administrativos generados desde la Secretaria del Laboratorio de Mecanización Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

A la Ingeniera Agrónoma Gloria Denise Álvarez y Estudiantes de Ingeniería Agrícola Paula Yiseth Ramírez Tamayo y Juan Sebastián Espinosa Henao por su apoyo en las actividades de Muestreo en Campo.

Al Panel de Catación de la Gobernación de Antioquia por realizar los análisis físicos y sensoriales a las muestras de CPS procesadas en campo.

Resumen

En la presente investigación se evaluó el efecto de la composición del café cereza cosechado respecto a la calidad organoléptica de la bebida de café para las variedades Caturra y Colombia con potencial de producción de cafés especiales en dos fincas del suroeste de Antioquia. Previamente se obtuvo la información de caracterización típica de los estados de maduración; con esta se definieron cuatro tratamientos de café cereza M1, M2, M3 y un testigo M4, los cuales contemplan los estados de maduración maduro (M), sobremaduro (SM), pintón (P) y verde (V), valores en proporciones diferentes en una unidad experimental de 10 kg. El diseño experimental contempló tres pases de cosecha para la mitaca cafetera en el año 2015. Se realizó la clasificación de los estados de maduración con ayuda de una escala de maduración previamente elaborada, así como la verificación por color con un colorímetro usando coordenadas del sistema CIEL*a*b*, además se registraron los sólidos solubles expresados en grados brix para 50 frutos en cada estado de maduración. En los tratamientos el café fue procesado con beneficio húmedo estandarizado. Los resultados mostraron que la concentración de azúcares en el mucílago es una propiedad determinante para diferenciar los estados de desarrollo en el fruto de café. Para la variedad Caturra no se encontraron diferencias estadísticas de calidad en taza entre los tratamientos, mientras que para variedad Colombia el tratamiento M1 y M3 presentaron igual comportamiento, con diferencias estadísticas significativas respecto a M2 y M4. Finalmente se realizó un modelamiento matemático para cada variedad en el programa Matlab® v.7.0 con la herramienta de lógica difusa, encontrando un R^2 de 0,946 con un error de 1,40 % en la estimación de la calidad en taza para variedad Caturra, y para variedad Colombia un R^2 y error de 0,852 y 1,03%, respectivamente. Se validaron los modelos desarrollados para las dos variedades de café, encontrando resultados promisorios aplicables en la predicción de la calidad en taza.

Palabras clave: Café cereza, Madurez, Taza de café, Propiedades organolépticas, Cafés especiales, Lógica difusa.

Abstract

In this research was evaluated the effect of the composition of the harvested coffee cherries regarding the organoleptic quality of the coffee beverage for Caturra and Colombia varieties with potential for the production of specialty coffees, at two farms located southwest of the department of Antioquia. Previously, the characterization information of the ripening stages was obtained; with this were made four cherry coffee blends, M1, M2, M3 and control M4, which contemplate the states mature (M), overripe (SM), semi-ripe (P) and unripe (V) fruits, with values in different proportions to establish an experimental unit of 10 kg. The experimental design contemplated three passes of picking for middle harvest coffee in 2015. The classification of the stages of ripening was performed using a scale maturation previously developed, as well as verification for color by means of the coordinate system CIEL*a*b* using a colorimeter, besides the soluble solids expressed in degrees brix for 50 fruits in each state of maturation were recorded. In the treatments, the coffee fruits were processed with standardized wet process. The results showed that the concentration of sugars in the mucilage is a determining property to differentiate the state of growth of coffee fruits. For the variety Caturra were not found statistical differences in cup quality between treatments, while for variety Colombia, the treatment M1 and M3 showed similar behavior, with statistically significant differences regarding M2 and M4. Finally mathematical modeling was done in the program Matlab v.7.0 using the fuzzy logic tool, finding a determination coefficient R^2 of 0.946 with an error of 1.40% in the estimate for variety Caturra, and R^2 of 0.852 with an error of 1.03% in the estimation for variety Colombia. The models for the two varieties of coffee were validated, finding promising results in predicting of the drink quality.

Keywords: Coffee cherry, Ripeness, Coffee cup, Organoleptic properties, Specialty coffees, Fuzzy logic.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas.....	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVII
Introducción	1
Hipótesis.....	4
Objetivos.....	5
Capítulo 1. Revisión de literatura	6
1.1 Cultivo de café en Colombia	6
1.1.1 Cafés especiales	7
1.1.2 Desarrollo del Mercado de cafés especiales en Colombia	7
1.2 Desarrollo y caracterización del fruto de café.....	8
1.2.1 Desarrollo fisiológico	8
1.2.2 Propiedades ópticas, químicas y mecánicas para los frutos de café....	10
1.3 La cosecha de café	14
1.3.1 Recolección Manual	14
1.4 Manejo de poscosecha de café	15
1.4.1 Beneficio Húmedo	16
1.4.2 Secado.....	19
1.4.2.1 Secado solar	19
1.4.2.2 Secado mecánico	20
1.5 Calidad del café.....	20
1.5.1 Análisis sensorial de cafés especiales.....	25
1.5.2 Influencia de las variedades y los diferentes estados de maduración de los frutos de café en el proceso de beneficio y su calidad en taza.....	27
1.6 Modelo Matemático	32
1.6.1 Lógica difusa.....	32
Capítulo 2. Materiales y métodos	39
2.1 Localización	39
2.2 Materiales y equipos.....	40
2.3 Metodología	41

2.3.1	Variables	41
2.3.2	Procedimiento para la caracterización de los estados de maduración de los frutos de café	42
2.3.3	Definición de los tratamientos de café cereza	46
2.3.4	Diseño del experimento.....	48
2.3.5	Procedimiento de beneficio húmedo y secado de las muestras de café.....	49
2.3.6	Almacenamiento, análisis físico y sensorial	51
2.3.6.1	Preparación de la muestra y catación.....	52
2.3.7	Análisis de la información.....	54
2.3.7.1	Desarrollo del modelo matemático.....	54
Capítulo 3.	Resultados y discusión	57
3.1	Caracterización de los estados de maduración de los frutos de café	57
3.2	Verificación del color y grados brix en los tratamientos de café cereza	61
3.3	Proceso de beneficio húmedo.....	66
3.4	Análisis de calidad física y sensorial.....	68
3.5	Resultados del modelo matemático	72
3.5.1	Resultados del modelamiento con lógica difusa.....	74
4.	Conclusiones y recomendaciones	87
4.1	Conclusiones	87
4.2	Recomendaciones.....	88
A.	Anexo: Formato para registro de análisis sensorial de café adaptado de la SCAA (2014).....	91
B.	Anexo: Gráficas del software SpectraMagic NX producto de la verificación de color en frutos de café	92
C.	Anexo: Registro fotográfico de los tratamientos de café elaborados en cada pase de cosecha	99
D.	Anexo: Análisis de varianza (ANOVA) para la variable de respuesta calidad en taza.....	102

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Partes del Fruto de Café	8
Figura 2. Crecimiento del Fruto del Café.	9
Figura 3. Escala de Maduración Para El Fruto de Café Variedad Colombia.	10
Figura 4. Características típicas por color de frutos de café variedad Colombia en 9 estados de desarrollo.	12
Figura 5. Masa de café heterogénea causa daño mecánico en el despulpado.	17
Figura 6. a. Cono truncado diseñado para aplicar el método fermaestro. b. Ubicación del dispositivo dentro de la masa de café en proceso de fermentación.	18
Figura 7. Café pergamino seco y almendra.	21
Figura 8. Defectos de café almendra que afectan la calidad de la bebida. a. Brocado. b. Vinagre. c. Decolorado. d. Negro. e. Mohoso.	22
Figura 9. Perfil sensorial del café C. arábica variedad Colombia, proveniente de cerezas de café en diferentes estados de maduración.	29
Figura 10. Calidad de la bebida de café variedad Colombia procesado por fermentación natural, según el estado de desarrollo del fruto.	31
Figura 11. Escala hedónica como variable de salida para evaluar con Lógica difusa la bebida de piña.	37
Figura 12. Lote de café: a. Variedad Caturra. b. Variedad Colombia.	39
Figura 13. Medición: a. Fuerza desprendimiento (N); b. concentración de azúcares (°brix).	44
Figura 14. a. Entrenamiento de los operarios. b. Verificación de color.	45
Figura 15. Verificación de color en los frutos de café clasificados por estado de maduración.	46
Figura 16. Distribución de los estados de maduración más comunes en porcentaje para 50 fincas cafeteras del departamento de Antioquia.	47
Figura 17. Diseño experimental para evaluar la composición de la masa cosechada de café y su calidad en taza.	49
Figura 18. Proceso estandarizado de beneficio para la obtención de café pergamino seco (CPS) en los tratamientos evaluados.	50
Figura 20. Secador mecánico de café para muestras, con gas propano como combustible utilizando IC.	51
Figura 19. a. Despulpado y clasificación de café en baba en zaranda cilíndrica b. Fermentación en recipiente plástico con fermaestro, medición de pH y temperatura.	51

Figura 21. Clasificación de frutos utilizando la escala de maduración.....	62
Figura 22. Verificación con el colorímetro de estados de desarrollo en frutos de café v. Caturra para la elaboración de los tratamientos en segundo pase de cosecha.	64
Figura 23. Verificación con el colorímetro de estados de desarrollo en frutos de café v. Colombia para la elaboración de las mezclas en tercer pase de cosecha.	65
Figura 24. Concentración de azúcares en frutos de café variedad Caturra con diferente estado de desarrollo.	66
Figura 25. Concentración de azúcares en frutos de café variedad Colombia en diferentes estados de desarrollo.	66
Figura 26. Funciones de pertenencia para la variable de entrada porcentaje de fruto "Maduro".	75
Figura 27. Funciones de pertenencia para la variable de entrada porcentaje de fruto "Sobremaduro".	75
Figura 28. Funciones de pertenencia para la variables de entrada de porcentaje de fruto "Pintón".	75
Figura 29. Funciones de pertenencia para la variable de entrada porcentaje de fruto "Verde".	76
Figura 30. Funciones de pertenencia para la variable de salida calidad en taza "Taza".	77
Figura 31. Superficie de respuesta en la interacción de frutos maduros y verdes en variedad Caturra.	77
Figura 32. Superficie de respuesta en la interacción de frutos maduros y pintones en variedad Caturra.	78
Figura 33. Comportamiento de los valores promedio estimados para los tratamientos de mezclas de frutos de café variedad Caturra, respecto a los datos experimentales.....	80
Figura 34. Comportamiento del error de los valores estimados respecto a los experimentales de calidad en taza para variedad Caturra.	80
Figura 35. Comportamiento de los valores promedio estimados para los tratamientos de mezclas de frutos de café variedad Colombia, respecto a los datos experimentales.	81
Figura 36. Comportamiento del error de los valores estimados respecto a los experimentales de calidad en taza para variedad Colombia.	81
Figura 37. Comportamiento de la validación del modelo a partir de información en 13 fincas con variedad Caturra.....	83
Figura 38. Comportamiento del error en la validación del modelo, para variedad Caturra.	84
Figura 39. Comportamiento de la validación del modelo a partir de información en 19 fincas con variedad Colombia.	84
Figura 40. Comportamiento del error en la validación del modelo, para variedad Colombia.	85

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Porcentaje de °brix de frutos de café con mayor peso formado (maduros) para dos variedades de café con tres sistemas de producción.	11
Tabla 2. Fuerza de desprendimiento para cosechar frutos de café variedad Colombia en diferentes estados de maduración.	13
Tabla 3. Valores promedios de características mecánicas del sistema fruto – pedúnculo para Variedad Colombia.	14
Tabla 4. Escala de puntos de niveles de calidad por atributo evaluado	26
Tabla 5. Clasificación de cafés especiales de acuerdo a la puntuación total en la evaluación sensorial	26
Tabla 6. Análisis sensorial de variedades de café cultivadas en Colombia.	30
Tabla 7. Operaciones en lógica difusa	33
Tabla 8. Funciones de pertenencia de un conjunto difuso	34
Tabla 9. Tipos de masa cosechada de diferentes mezclas de frutos de café con diferentes estados de maduración	48
Tabla 10. Fuerza de desprendimiento y °brix para diferentes estados de maduración de café variedad Caturra	57
Tabla 11. Fuerza de desprendimiento y °brix para diferentes estados de maduración de café variedad Colombia	57
Tabla 12. Coordenadas CIEL *a*b* para diferentes estados de maduración de café variedad Caturra	58
Tabla 13. Coordenadas CIEL *a*b* para diferentes estados de maduración de café variedad Colombia	58
Tabla 14. Escala de maduración para frutos de café Variedad Caturra	59
Tabla 15. Escala de maduración para frutos de café Variedad Colombia.	60
Tabla 16. Valores ajustados de las coordenadas CIEL *a*b* en los patrones para diferentes estados de maduración de café variedad Caturra	61
Tabla 17. Valores ajustados de las coordenadas CIEL *a*b* en los patrones para diferentes estados de maduración de café variedad Colombia.....	61
Tabla 18. Porcentaje de los frutos en diferentes estados de maduración aprobados en la verificación con el colorímetro para V. Caturra.	63

Tabla 19. Porcentaje de los frutos en diferentes estados de maduración aprobados en la verificación con el colorímetro para V. Colombia.....	63
Tabla 20. Composición de la masa cosechada para el tratamiento testigo M4 en las 2 variedades evaluadas en cada pase de cosecha.....	67
Tabla 21. Variables mediadas en el proceso de beneficio húmedo de café variedad Caturra	67
Tabla 22. Variables mediadas en el proceso de beneficio húmedo de café variedad Colombia.....	68
Tabla 23. Resultados de las principales variables de análisis físico para variedad Caturra	69
Tabla 24. Resultados de calidad en taza y atributos para los 3 pases de cosecha en variedad Caturra	69
Tabla 25. Resultados de las principales variables de análisis físico para variedad Colombia.....	70
Tabla 26. Resultados de calidad en taza y atributos para los 3 pases de cosecha en variedad Colombia.....	70
Tabla 27. Resultados de calidad en taza para variedad Caturra utilizados para el desarrollo del modelo matemático.	73
Tabla 28. Resultados de calidad en taza para variedad Colombia utilizados para el desarrollo del modelo matemático.....	73
Tabla 29. Valores del nivel lingüístico en cada función de pertenencia trapezoidal.....	74
Tabla 30. Valores estimados obtenidos en el modelo con información de caracterización de los estados de desarrollo en frutos de café variedad Caturra	78
Tabla 31. Valores estimados obtenidos en el modelo con información de caracterización de los estados de desarrollo en frutos de café variedad Colombia.....	79
Tabla 32. Resumen de información obtenida en muestreos en el Proyecto AOCE para validar el modelo construido para café variedad Caturra	82
Tabla 33. Resumen de información obtenida en muestreos en el Proyecto AOCE para validar el modelo construido para café variedad Colombia	82

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad	Definición
a, b, c	Valor que define función de pertenencia	1	Tabla 8
C	Conjunto difuso con intervalo $[z_1 z_2]$	1	Ec. 1.7
IC*	Índice de color	1	Ec. 2.5
F	Fuerza de desprendimiento fruto café a tracción	N	Sección 3.1
M	Peso de fruto de café maduro	g	Ec. 2.1
P	Peso fruto de café pintón	g	Ec. 2.2
P_T	Peso total muestra café cereza	g	Sección 2.3.1.1
pH_1	pH de la masa de café en el despulpado	1	Sección 3.2
pH_2	pH de la masa de café en el punto de lavado	1	Sección 3.2
SM	Peso fruto de café sobremaduro	g	Ec. 2.3
SST	Sólidos solubles totales	° brix	Sección 3.1
T_1	Temperatura masa de café despulpado	°C	Sección 3.2
T_2	Temperatura masa de café Punto lavado	°C	Sección 3.2
t	Tiempo	h	Sección 3.2
V	Peso fruto de café verde	g	Ec. 2.4
x	Valor de entrada en el conjunto difuso	%	Tabla 8
x_1	Porcentaje de M	%	Sección 2.3.7.1
x_2	Porcentaje de SM	%	Sección 2.3.7.1
x_3	Porcentaje de P	%	Sección 2.3.7.1
x_4	Porcentaje de V	%	Sección 2.3.7.1
z_1, z_2	Intervalos de conjunto difuso	1	Ec.1.7
Z	Escalar de defusificación	1	Ec.1.7
\cap	Intersección de conjunto difuso	1	Tabla 7
\cup	Unión de conjunto difuso	1	Tabla 7

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad	Definición
$\mu_{(x)}$	Función de pertenencia en conjunto difuso	1	Sección 1.6.1
ΔE	Diferencia de color en el sistema CIEL*a*b*	1	Ec. 2.6

Símbolo	Término	Unidad	Definición
$\mu_{(x)}$	Función de pertenencia en conjunto difuso	1	Sección 1.6.1

Abreviaturas

Abreviatura	Término
a*	Coordenada cromática (color rojo (+a*) o color verde (-a*))
AOCE	Antioquia Origen de Cafés Especiales
b*	Coordenada cromática (Color amarillo (+b*) o color azul (-b*))
CC	Café Cereza
CIEL *a*b*	Modelo de color uniforme
cm	Centímetro
CPS	Café pergamino seco
CV	Coeficiente de variación medido en porcentaje (%)
DDA	Días después de la antesis
DDF	Días después de la floración
g	Gramo
h	Hora
IC	Intercambiador de calor
kg	Kilogramo
L*	Coordenada acromática (luminosidad)
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
Matlab®	Software para desarrollo de métodos numéricos
mm	Milímetro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
N	Newton (kg.m/s ²)
R ²	Coeficiente múltiple de determinación
SCAA	Sigla en inglés de Sociedad Americana de Cafés Especiales
Ton	Tonelada
%	Porcentaje
° C	Grados centígrados
° Brix	Grados brix

Introducción

Tradicionalmente el café ha representado un alto aporte al producto interno bruto de Colombia y un generador importante de empleo y desarrollo rural, según el DANE el crecimiento del cultivo fue de 10 % en el año 2014, aportando el 46 por ciento de toda la rama agropecuaria, la cual tuvo una expansión de 2,3 % (El Tiempo, 2015), por esta condición cualquier variación que afecte de manera negativa el mercado, genera un impacto social a consecuencia de la incidencia en la competitividad de las 563.000 familias cafeteras.

Según Moll (2012) de la firma consultora CABI (Central American Business Intelligence), el mercado mundial de café ha estado sometido a gran inestabilidad durante las últimas dos décadas, entre las razones de ello se encuentra la crisis económica de los países de la Unión Europea, Estados Unidos y Japón, principales clientes del café suave lavado tipo arábica que produce Colombia; a lo anterior se suma la gran oferta de volúmenes de café tipo Robustas provenientes de países como Vietnam e Indonesia, que desplazaron a Colombia al cuarto lugar en producción mundial del grano en el año 2012. A pesar de este panorama en el periodo abril 2014 – marzo 2015 las exportaciones de café Colombiano registraron un aumento del 5% superando los 10,9 millones de sacos, 539.000 sacos adicionales puestos en mercados internacionales, de los cuales cerca del 35% corresponde a cafés especiales (Dinero, 2015).

El término Cafés Especiales se ha convertido en una forma de diferenciar el café de alta calidad de los demás cafés catalogados como corrientes. Estos cafés permiten obtener una prima superior, fruto de los sobrepagos pagados por los compradores y transferidos al caficultor para el mejoramiento de su bienestar y calidad de vida, el de su familia y comunidad. De ahí que el reciente informe de la Misión Cafetera en su primera recomendación menciona *“El café sigue representando una opción de vida. La demanda mundial de la bebida está creciendo, y el nivel de sofisticación de los cafés especiales ofrece nuevas posibilidades”* (Portafolio, 2015), lo anterior es un argumento válido que

justifica la innovación en este segmento de mercado.

Los conocimientos científicos sobre el cultivo, procesamiento, aprovechamiento y uso del café han avanzado en los últimos 25 años, sin embargo la explicación de las características fundamentales como aroma y sabor de la taza del café sigue siendo un misterio. El aroma y sabor (características sensoriales) son la razón principal de su alta aceptabilidad y disfrute, además de brindarle el reconocimiento como producto de alta calidad como café especial (Universidad Nacional de Colombia, 2013).

Las condiciones intrínsecas de la calidad del café adquiridas desde el momento de la selección de la variedad a sembrar, manejo del cultivo, el entorno de clima y suelo, la posición geográfica y altitud, hacen que las plantas desarrollen frutos en diferentes estados de maduración debido a las numerosas floraciones en el año, que conllevan a varios pases en la recolección de la cosecha. Esta condición requiere de una labor dispendiosa selectiva de desprender solo frutos maduros, lo que implica una recolección manual por la variabilidad de maduración y las condiciones de altas pendientes en los cultivos (Roa *et al.*, 1999 y Álvarez *et al.*, 1999).

El tipo de fruto recolectado influye directamente en la calidad final del producto, lo cual se ha observado al evaluar la relación entre el estado de madurez del fruto de café con el rendimiento en beneficio y la calidad en taza, encontrando diferencias en calidad respecto de los frutos verdes con tazas defectuosas; y los pintones, maduros y sobremaduros con tazas de buena calidad (Marín *et al.*, 2003).

El presente trabajo se enfoca en el potencial que posee el departamento de Antioquia, que ocupa el segundo lugar de producción nacional de café y con el 99% de la caficultura tecnificada, para desarrollar herramientas científicas en la perfilación de la calidad sensorial de la bebida que le permita generar un nicho propio de mercado, y a su vez posibilite dar valor diferenciado a su producto. Se consideraron particularmente en el manejo de poscosecha, operaciones de caracterización de la masa cosechada de café cereza, las buenas prácticas en el proceso de beneficio y secado del grano, que al someterlo a tostión y molienda para análisis sensorial, se obtiene una bebida de taza limpia calificada de alta calidad.

La presente investigación tuvo como objetivo la evaluación de la masa cosechada de café como materia prima, para las variedades Caturra y Colombia, en su composición de frutos maduros, sobremaduros, pintones y verdes, que a través de un proceso agroindustrial de beneficio húmedo estandarizado transformó los frutos en granos de café pergamino seco; y con un panel de catadores expertos se midió e interpretó la calidad física del grano y organoléptica de la bebida representada por el puntaje total en taza.

Finalmente con los resultados obtenidos se desarrolló un modelo matemático aplicando lógica difusa como herramienta para estimar la calidad sensorial de la bebida, respecto a las proporciones de frutos en diferente estado de desarrollo planteados en cuatro tratamientos de diferentes mezclas de los estados de maduración de los frutos. Al verificar y validar el modelo para las dos variedades de café estudiadas, se obtuvo una alta precisión con posibilidades futuras de aplicaciones sectorizadas en zonas con potencial de producción de cafés especiales debidamente identificadas, con el propósito de mantener trazabilidad ante la exigencia del mercado diferenciado.

Hipótesis

La calidad de la bebida de café en la variedad Caturra y Colombia, cultivada en el suroeste del departamento de Antioquia, está altamente correlacionada con la composición de la masa cosechada de 60% de frutos maduros, 26% sobremaduros, 12% pintones y 2% de verdes para obtener tazas clasificadas como café especial.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto de la composición de la masa del café recolectado en la calidad sensorial de la bebida, para las variedades Caturra y Colombia en dos fincas con potencial de producción de café especial en el suroeste del departamento de Antioquia.

Objetivos específicos

- Caracterizar el estado de maduración del café cereza recolectado en 2 fincas del suroeste del departamento de Antioquia.
- Evaluar el efecto de diferentes proporciones de frutos de café maduro, pintón, sobremaduro y verde en las propiedades organolépticas de la bebida de café.
- Obtener un modelo matemático que relacione las características de madurez del café recolectado de las variedades Caturra y Colombia, con las propiedades organolépticas de la bebida de café.

Capítulo 1. Revisión de literatura

1.1 Cultivo de café en Colombia

El café (*Coffea arábica L.*) es un arbusto que se encuentra en las regiones tropicales del mundo, pertenece a la familia de las Rubiáceas y existen aproximadamente 500 géneros y 8.000 especies. Dentro de las plantas cultivadas por el hombre existen 10 especies comerciales y 50 especies silvestres, además en cada especie se tienen diferentes variedades de las cuales las principales en Colombia son: Típica, Borbón, Maragogipe, Tabi, Caturra, Colombia y Castillo (Federacafé, 2010).

En Colombia se cultivan actualmente 921.068 hectáreas en 588 Municipios, el tamaño promedio de las fincas no superan las 1,6 hectáreas correspondientes al 96% de las familias cafeteras; esta reducida dimensión de sus cultivos ha permitido que la actividad cafetera se desarrolle en un ambiente básicamente familiar. El departamento con mayor superficie cultivada es Antioquia con 131.167 hectáreas dedicadas a la producción cafetera, seguido por Huila con 129.153 hectáreas y Tolima con 109.857 hectáreas. Sobre estas cifras Antioquia es el segundo departamento con mayor número de productores después de Cauca y supera a departamentos como Huila, Tolima y Caldas. (Muñoz *et al.*, 2011).

Las cifras de producción cafetera en Colombia muestran que el año 2012 fue la más baja de las últimas tres décadas con 7,74 millones de sacos de 60 kg; para el año 2013 la situación mejoró aumentando la producción en un 35% para un total de 9,7 millones de sacos, esto como resultado de los programas de renovación de cultivos y la estabilidad climática (Portafolio, 2014).

1.1.1 Cafés especiales

Para la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, los cafés especiales son aquellos valorados por los consumidores por sus atributos consistentes verificables y sostenibles y por los cuales están dispuestos a pagar precios superiores y que redunden en un mayor bienestar de los productores. Además estima que el mercado de especiales representa aproximadamente el 13% del consumo mundial (7% certificado y 6% gourmet y de alta calidad) y que este mercado ha mostrado un crecimiento importante (Ruiz *et al.*, 2009).

En Colombia los cafés especiales se han clasificado de la siguiente manera (Ruiz *et al.*, 2009):

Cafés Especiales de Origen: cafés de alta calidad que se venden con un sobreprecio, por el sitio donde se producen. Proviene de una región o finca con cualidades únicas.

Cafés de Preparación: cafés con atributos específicos sensoriales y de calidad que se preparan según un protocolo que envía el cliente.

Cafés Sostenibles: Cafés cultivados por comunidades que tienen un serio compromiso con la protección del ambiente a través de la producción limpia y la conservación de la biodiversidad de sus zonas. Los clientes los prefieren porque cuidan la naturaleza y promueven el comercio justo con los países en vía de desarrollo.

1.1.2 Desarrollo del Mercado de cafés especiales en Colombia

La comercialización de cafés sostenibles a nivel mundial ha mostrado una tasa de crecimiento de 34% anual promedio entre 2004 y 2009. En efecto, mientras en 2004 se producían aproximadamente 4,2 millones de sacos de 60 kilogramos de café sostenible, en el 2009 se produjeron 21 millones de sacos. De los cuales, sólo el 42% fue comercializado internacionalmente (Ruiz *et al.*, 2009).

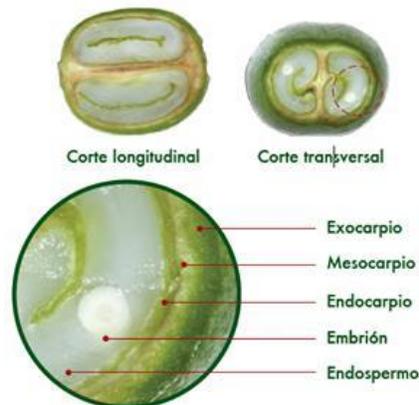
Las exportaciones de cafés especiales colombianos presentaron una tasa de crecimiento anual promedio del 20% entre 2002 y 2008, al pasar de 209.385 sacos de 60 kg en 2002

a 1'048.600 en 2008. En este período, las exportaciones de cafés especiales además de crecer notablemente, cambiaron su composición, pues los cafés de origen y de preparación han reducido su participación en el total, mientras que los cafés sostenibles se han incrementado notablemente (Ruiz *et al.*, 2009).

1.2 Desarrollo y caracterización del fruto de café

Según Marín *et al.*, (2003), el fruto de café es una drupa ovalada que normalmente contiene dos semillas, tiene una longitud que varía entre 10 y 15 mm. Está constituida por el exocarpio el cual es la capa externa del fruto (pulpa) y representa el 43,2% del fruto en base húmeda. El color del exocarpio o epidermis varía desde verde antes de la maduración hasta púrpura. Recubierto por la epidermis se encuentra el mesocarpio (mucílago), el cual está localizado entre el exocarpio y el endocarpio (pergamino). Los componentes del fruto de café se observan en la figura 1.

Figura 1. Partes del Fruto de Café



Fuente: Flórez *et al.*, (2013).

1.2.1 Desarrollo fisiológico

Según Salazar *et al.*, (1993), desde el momento de la floración hasta la maduración del fruto transcurren 32 semanas en promedio, los autores las dividieron en tres etapas según el incremento en peso fresco y cambios en su apariencia interna y externa, a continuación se describe cada una de ellas.

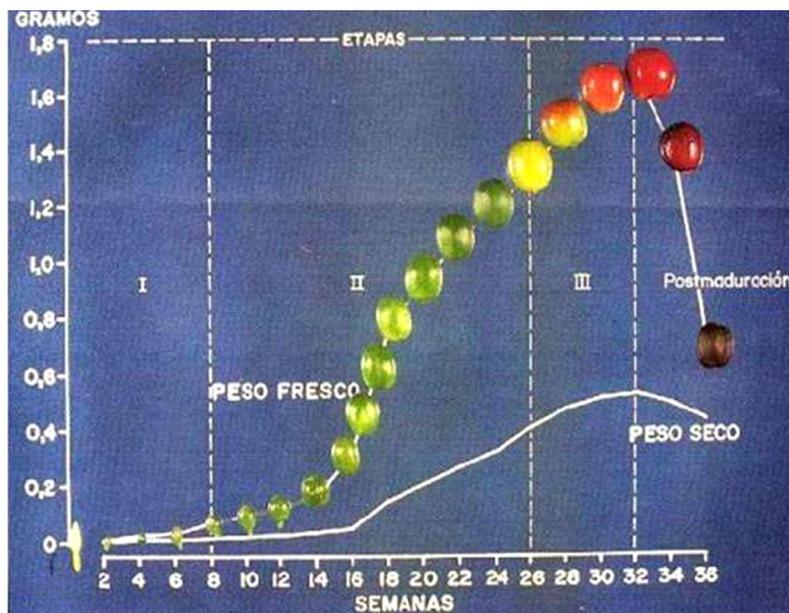
Etapa I: Este periodo transcurre desde la floración hasta la octava semana, el crecimiento del fruto es imperceptible y tiene el aspecto de un fósforo. En su interior los frutos son de consistencia acuosa y todavía no hay formación de semilla.

Etapa II: Comprende desde la novena hasta la vigésima sexta semana, se caracteriza por un notorio crecimiento de los frutos tanto en sus dimensiones como en su peso fresco. A partir de la semana 17 (120 días aproximadamente después de la floración) el fruto empieza a perder agua y ocurre la transformación de la semilla la cual pasa de poseer consistencia gelatinosa a endurecerse y ganar peso.

Etapa III: Comprende desde la vigésima sexta hasta la trigésima segunda semana. Durante esta fase el fruto cambia de color verde a rojo o amarillo y adquiere su madurez fisiológica, quedando listo para la cosecha.

Después de la semana 32 el fruto se sobremadura (postmaduración) tornándose de color violeta oscuro, perdiendo peso al llegar a la senescencia. En la figura 2 se observan los cambios en tamaño y color para las tres etapas.

Figura 2. Crecimiento del Fruto del Café.



Fuente: Salazar *et al.*, (1993).

1.2.2 Propiedades ópticas, químicas y mecánicas para los frutos de café

Marín *et al.*, (2003), identificaron 8 estados de maduración para el fruto de café Variedad Colombia, según la edad (días después de la floración, (ddf)) y la coloración dominante para el 50% de los frutos. Estos estados comprenden desde el verde inmaduro (182 ddf), pasando por el rojo maduro (217 ddf) hasta el estado seco (231 ddf), como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Escala de Maduración Para El Fruto de Café Variedad Colombia.

Estado	Edad del Fruto (ddf)	(% Escala de Color Pantone *				Escala de Color Visual
		Cian (C)	Magenta (M)	Amarillo (Y)	Negro (K)	
 VERDE 1	182	35	0	100	40	Color verde oscuro
 VERDE 2	186	35	0	100	20	Color verde oscuro
 VERDE 3	189	40	20	100	15	Coloración verde oscura brillante
 VERDE AMARILLO	203	20	0	100	40	Coloración verde con tonalidades amarillas
 PINTON	210	20 10	0 75	100 80	40 0	Coloreado predominantemente. Alguna tonalidad de verde cerca al pedicúculo
 MADURO	217	0 10	100 80	90 70	10 15	Color rojo brillante a rojo opaco
 SOBREMADURO	224	10 0	100 35	50 0	30 100	Color morado brillante a morado oscuro opaco
 SECO	231	0 0	0 0	35 25	100 80	Color café oscuro, la cereza se encuentra arrugada, hasta frutos completamente secas (pulpa adherida a la almendra)

*Pantone Process Color Guide (75)

Fuente: Marín *et al.*, (2003)

También encontraron que la propiedad química que mejor describe la maduración es el contenido de sólidos solubles expresados en grados brix, que aumenta en la medida que se desarrolla el fruto; con valores 2,69 °brix para el fruto verde 1; 8,63 °brix para el verde amarillo; 17,53 para el fruto maduro; y un valor superior a 23,83 °brix para los sobremaduros.

Jaramillo (2012) midió los grados brix promedio en frutos de café de mayor peso formado (maduros), en lotes caracterizados en tres sistemas de producción de la variedad caturra localizados en el Municipio de Ciudad Bolívar, y variedad Castillo Rosario localizados en el Municipio de Venecia en el departamento de Antioquia respectivamente; los resultados se muestran en la tabla 1. Respecto a las dos variedades para todos los sistemas de producción, el que presentó valores mayores fue la variedad Castillo Rosario.

Tabla 1. Porcentaje de °brix de frutos de café con mayor peso formado (maduros) para dos variedades de café con tres sistemas de producción.

Sistema de Producción	Variedad	°Brix
Cerca de bosque	Caturra	8,3 ± 0,23
	Castillo Rosario	14 ± 0,21
Sombra	Caturra	8,3 ± 0,31
	Castillo Rosario	13 ± 0,26
Libre exposición	Caturra	10 ± 0,16
	Castillo Rosario	14 ± 0,21

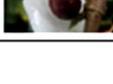
Fuente: Jaramillo (2012).

Carvajal *et al.*, (2011) evaluaron las coordenadas cromáticas de color en la epidermis de los frutos de café variedad Colombia durante la maduración; encontrando diferencias en la luminosidad (coordenada acromática L) de los frutos, según los días después de la anthesis (DDA). Los autores encontraron que para los frutos verdes entre 182 DDA (verde oscuro) y 217 DDA (verde amarillo), su luminosidad promedio de la epidermis estuvo entre 43,18 y 49,8; luego disminuye a valores de 37,88 para frutos pintones, y hasta 30,5 en los frutos sobremaduros.

Respecto a la coordenada cromática *a* que es una medida del contenido de rojo o verde, si *a* > 0 indica tonalidad roja, mientras que siendo *a* < 0 el color tendrá cierta cantidad de verde; los mismos autores encontraron que esta variable presentó valores para los frutos

con 182 y 189 días de desarrollo, entre $-7,9 \leq a \leq -7,73$; luego valores de $-7,34 \leq a \leq -7,18$ para frutos de 196, 203 y 210 DDA; los frutos verde amarillo presentaron un promedio de $a = -1,37$ (217 DDA); los pintones un valor promedio de $a = 16,79$; los maduros con mayor contenido de rojo con $a = 17,9$, y los sobremaduros con promedio de $a = 9,7$; inferior al valor de los frutos maduros por disminución de la tonalidad rojiza. La coordenada cromática a , presentó un comportamiento creciente de frutos verdes a maduros, y luego su valor disminuyó en los sobremaduros, y estadísticamente mostró diferencias entre los estados de 217, 224, 231 y 238 DDA (figura 4).

Figura 4. Características típicas por color de frutos de café variedad Colombia en 9 estados de desarrollo.

DDA	Muestreo	Fruto	Color medio
182			
189			
196			
203			
210			
217			
224			
231			
238			

Fuente: Carvajal *et al.*, (2011)

En la coordenada cromática b que indica el contenido de amarillo o de azul sobre el espécimen, donde $b > 0$ indica contenido de amarillo y si $b < 0$ indica contenido de azul, Carvajal *et al.*, (2011) encontraron para los frutos verdes de 189, 196 y 203 DDA valores altos con un rango de $24,96 \leq b \leq 25,38$; para los frutos verde brillante (210 DDA) y verde

amarillo (217 DDA) valores entre $24,18 \leq b \leq 24,50$; los pintones y maduros (224 y 231 DDA) valores entre $11,70 \leq b \leq 11,80$, y los sobremaduros (238 DDA) con valores reducidos de amarillo con promedio $b = 2,76$. Los autores concluyeron que b decrece para los estados pintones, maduros y sobremaduros.

En la coordenada cromática croma C, los autores determinaron que no es relevante para diferenciar los estados de maduración; mientras que el tono angular h como color básico de un objeto disminuyó para los frutos en la medida que cambia el color de los estados de maduración, encontrando valores de 108,84 para frutos verdes; con diferencia estadística para amarillo, pintón, maduro hasta sobremaduro con valor de 15,74 (Carvajal *et al.*, 2011).

De la misma forma evaluaron la fuerza de desprendimiento (tracción) de los frutos, encontrando diferencias entre los verdes (203 – 210 DDA) y los maduros 231 DDA, según se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Fuerza de desprendimiento para cosechar frutos de café variedad Colombia en diferentes estados de maduración.

DDA	Estado	Tonalidad	Ft (N)
182	Inmaduro	Verde	10,55 b
189	Inmaduro	Verde	11,27 bc
196	Inmaduro	Verde	12,00 cd
203	Inmaduro	Verde	12,62 de
210	Inmaduro	Verde	13,45 e
217	Inmaduro	Verde-amarillo	13,07 e
224	Pintón	verde-amarillo-naranja-rojiza	10,48 b
231	Maduro	Rojo	10,77 b
238	Sobremaduro	Rojo-violeta	6,33 a

Fuente: Carvajal *et al.*, (2012).

Marín *et al.*, (2003) encontraron que la fuerza de tracción promedia para frutos en estado verde 3 es 26,1% superior a la obtenida para frutos maduros. Álvarez *et al.*, (1999) determinaron algunas propiedades mecánicas del sistema fruto - pedúnculo (SFP) para árboles de café variedad Colombia, cuyos principales resultados se muestran en la tabla

3. Los autores concluyeron que las fuerzas de tracción y el momento torsor son las propiedades físico - mecánicas más importantes para lograr selectividad en la cosecha de café.

Tabla 3. Valores promedios de características mecánicas del sistema fruto – pedúnculo para variedad Colombia.

Variable	Estado del fruto	
	Maduro	Verde
Fuerza de Tracción (N)	9,12	11,03
Momento Flector (N*cm)	1,44	1,78
Momento Torsor (N*cm)	1,75	2,4
Rigidez EI (N*m ² *10 ⁻⁵)	2,2	1,0
Momento de Inercia (kg*m ² *10 ⁻⁸)		
Inercia eje X (Ix)	4,07	2,84
Inercia eje Y (Iy)	4,73	3,16
Inercia eje Z (Iz)	3,73	2,42

Fuente: Álvarez *et al.*, (1999).

1.3 La cosecha de café

Las condiciones climáticas de las regiones cafeteras de Colombia son las causantes de la presencia de todos los estados de maduración del fruto al momento de la cosecha (Jaramillo, 2005 citado por Puerta, 2013). La cosecha es una de las labores imprescindibles para mantener la calidad del café colombiano; es la actividad dentro de la estructura de los costos de producción más representativa debido a la demanda de mano de obra para realizar la recolección manual de frutos maduros (Martínez, 2006).

1.3.1 Recolección Manual

La recolección manual es un proceso de desprendimiento selectivo de frutos maduros de café en momentos que la planta ofrece frutos en diferentes estados, lo anterior le ha permitido a Colombia contar con gran prestigio internacional por su alta calidad de la bebida, debido a la cosecha selectiva que garantiza una mayor cantidad de frutos maduros en la masa cosechada (Martínez, 2006).

Según Álvarez *et al.*, (1999) la recolección del café se hace periódicamente teniendo en cuenta la coloración externa del fruto, que es un indicador de su madurez. La operación está íntimamente relacionada con el flujo anual de la cosecha y no debe anticiparse ni aplazarse pues corre el riesgo de una mala recolección, afectando la calidad del producto y originando pérdidas económicas para el caficultor.

Puerta (2000), afirma que cosechar y beneficiar frutos inmaduros genera granos vinagres y negros, que ocasionan en la bebida sabor y aroma a fermento y acre. Concluye además que para contenidos superiores al 2,5% en peso de fruto inmaduro en la cosecha, ya sea por desmucilaginado mecánico o por fermentación natural se deteriora la calidad y el rendimiento del café, recomendando realizar recolecciones selectivas de solo frutos maduros, lo que implica varios pases, incrementando los costos de producción.

Para Norris *et al.*, (1995) citado por Martínez (2006), la cosecha de café se debe dirigir hacia recobrar la máxima proporción del cultivo, con lo que se busca el retorno máximo del producto. Igualmente afirma que típicamente una persona debe trabajar de 7 a 10 días cosechando manualmente café para producir 60 kg de café pergamino seco; valores que en Colombia pueden variar dependiendo de las condiciones agronómicas del cultivo y las restricciones topográficas donde se concentra la producción.

Según el IICA (2010) en su guía técnica para el beneficiado de café, recomienda realizar el registro en cada lote de café cosechado, identificando el lugar y finca de procedencia. También es relevante desarrollar jornadas de capacitación dirigidas a los recolectores, sobre la importancia de la cosecha selectiva y el transporte de los frutos hacia el recibo en el beneficiadero.

1.4 Manejo de poscosecha de café

Cuando se termina la actividad de la cosecha en el lote, se debe realizar un adecuado manejo de los frutos recolectados por que se inicia el proceso de fermentación debido a su alto contenido de azúcares, con su actividad biológica propia. La fermentación del fruto es un proceso que da inicio de manera automática cuando estos son desprendidos del árbol. Con esta condición de producto perecedero, recomiendan evitar el contacto de

la masa cosechada con cualquier producto como lodo o agentes contaminantes; de la misma manera evitar radiación solar directa, ubicando los costales que contienen los frutos en la sombra; y en general todo lo que permita mantener baja la temperatura para evitar acelerar el proceso de fermentación en el fruto (IICA, 2010).

El transporte del café cosechado hacia el beneficiadero debe hacerse el mismo día de la recolección, procurando evitar el deterioro transportándolo en vehículos limpios, libre de olores extraños y sustancias contaminantes.

1.4.1 Beneficio Húmedo

Según Roa *et al.*, (1999) el beneficio de café por vía húmeda es un proceso que consta de varias etapas. Para transformar el café cereza (CC) en café pergamino seco (CPS), es necesario tener la capacidad adecuada para disponer del producto en cada uno de sus estados y subproductos generados en el proceso.

La clasificación de los frutos cosechados debe efectuarse antes de realizar el despulpado, separando frutos defectuosos e incluso uniformizando el tamaño. Entre los defectuosos se encuentran los frutos inmaduros (verdes), sobremaduros, secos o afectados por enfermedades y/o insectos. Cuando se separan los frutos pequeños, en los procesos de despulpado y secado se favorecerá la uniformidad del tamaño de los granos. Los frutos defectuosos en el despulpado deterioran la calidad por el daño mecánico, tal es el caso de la carencia de mucílago en frutos verdes y secos (IICA, 2010). Por este motivo la presencia de mucílago en los frutos es necesaria para efectuar un buen despulpado, debido a que este funciona como lubricante en el momento que las piezas del cilindro y pechero de la despulpadora ejercen esfuerzos de tensión y cizallamiento para liberar los granos de su envoltura exterior (Roa *et al.*, 1999).

El daño mecánico se genera cuando se despulpa una masa de café con frutos en diferentes estados de madurez y sanidad, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Masa de café heterogénea causa daño mecánico en el despulpado.



Fuente: IICA (2010).

Luego del despulpado es necesario clasificar el café en baba (CB) en zarandas para retirarle la pulpa, elementos extraños y frutos que no se despulparon, estas pasillas separadas se repasan en otras máquinas para extraer los granos buenos (IICA, 2010).

Cuando los granos se almacenan recién despulpados inicia el proceso de fermentación del mucílago en el cual ocurren diferentes procesos bioquímicos, las enzimas producidas por las levaduras y bacterias presentes fermentan y degradan sus azúcares, lípidos, proteínas y ácidos, convirtiéndolos en alcoholes, ácidos, ésteres y cetonas. La incidencia de estas sustancias cambian las características del mucílago en olor, color, pH y composición del mismo, así como en los granos de café (Puerta, 2015).

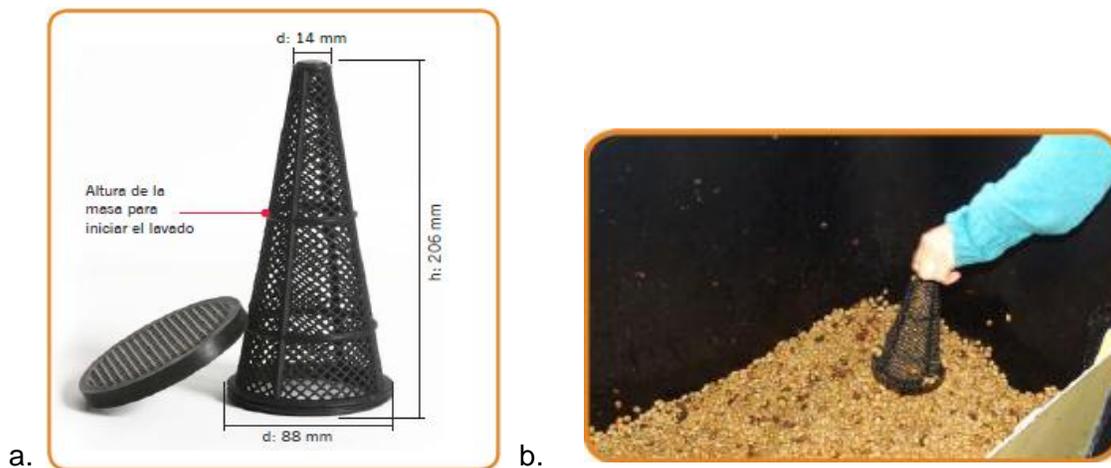
La clase de productos generados, así como la velocidad del proceso dependen de factores que afectan el metabolismo de los microorganismos como la temperatura externa, el tipo de sistema de fermentación, tiempo de proceso, la calidad del café en baba, la acidez del sustrato, la disponibilidad del oxígeno y la higiene (Puerta, 2015). El proceso de fermentación convencional es uno de los procesos más críticos durante el beneficio húmedo, porque se incrementa el riesgo en la conservación de la calidad del grano; donde se recomienda controlar el tiempo del proceso para evitar la sobrefermentación que generan aromas y sabores desagradables en el análisis sensorial de la bebida (Roa *et al.*, 1999).

Peñuela *et al.*, (2013) en Cenicafé definieron un método donde se utiliza un dispositivo sencillo en el que se determina de manera confiable el punto de lavado, partiendo de los

cambios de densidad aparente entre el café despulpado y el lavado, generados por la capa de mucílago que cubre los granos y que es diluida en el proceso de fermentación. El método denominado “fermaestro” consta de un cono truncado con tapa fabricado en lámina plástica, con perforaciones menores a 6 mm en toda el área de contacto con los granos; esto permite la salida del mucílago que se degrada, manteniendo los granos al interior (figura 6).

El cono se llena de café despulpado sobre la base mayor, luego de tapado se ubica dentro de la masa de café en el tanque de fermentación; al final del proceso de fermentación se revisa el dispositivo dejándolo caer sobre la base mayor desde una altura de 3 cm para desplazar el mucílago diluido y que los granos se acomoden sobre las paredes y la base del cono, cuando el espacio en la parte superior hasta la primera marca horizontal es de 85 mm, el mucílago se ha removido en un 96% y la masa de café puede ser lavada (Peñuela *et al.*, 2013).

Figura 6. a. Cono truncado diseñado para aplicar el método fermaestro. b. Ubicación del dispositivo dentro de la masa de café en proceso de fermentación.



Fuente: Peñuela *et al.*, (2013).

En el proceso de lavado Cenicafé recomienda cuatro enjuagues para la remoción del mucílago fermentado, donde en el primero se remueve el 66% y en el segundo el 24% de la carga orgánica del mucílago; realizando esta actividad por agitación manual en un tanque tina, utilizando consumos de agua promedio de 4,5 litros de agua por kilogramo de CPS (Roa *et al.*, 1999).

1.4.2 Secado

Debido al alto contenido de humedad del fruto de café (200% en base seca), procesos bioquímicos se inician después de la cosecha debido a la intensa actividad fisiológica, esto le genera pérdida de peso seco y deterioro de la calidad después de 24 horas de cosechado. Luego de retirar la pulpa y el mucílago en el proceso de beneficio húmedo, se obtiene café pergamino húmedo con un contenido de humedad del 50 a 52% en base húmeda; el cual se debe reducir entre el 10 y 12% como atributo de calidad física en las normas vigentes de comercialización de café pergamino seco. Este rango de humedad se estableció por las relaciones de presión de vapor en la superficie del grano y el aire que lo rodea, con el propósito de realizar almacenamiento del grano a condiciones ambientales sin deteriorarse (Roa *et al.*, 1999).

El valor de la humedad en el 12% corresponde a una actividad de agua (a_w) de 0,67, el cual es un valor seguro para prevenir el deterioro por el crecimiento de muchos hongos, como el *Aspergillus ochraceus* que producen micotoxinas, perjudiciales para la salud de los consumidores (Puerta, 2006).

1.4.2.1 Secado solar

En el secado solar se aprovecha la radiación solar incidente y la energía propia del aire para retirarle humedad al grano de café, generando intercambios de energía y humedad en la superficie de los granos de la parte superior de la capa; por tanto es necesario revolver la masa tres o cuatro veces al día, para que los granos que no están expuestos reciban la energía térmica necesaria para la evaporación de agua. Debido a que son numerosas las variables que influyen en el secado solar; el valor de la radiación solar día a día, la temperatura, la velocidad del aire, el tipo de piso sobre el que se deposita la capa de grano, el comportamiento de la humedad del producto que puede rehumedecer en horas de la noche; los tiempos de secado pueden llevar desde 3 a 7 días con un promedio de brillo solar de 5 h.día^{-1} con 13 kg de café lavado/m²; hasta 15 días en secadores solares parabólicos con piso de concreto (Roa *et al.*, 1999, Oliveros *et al.*, 2013).

Entre las estructuras más comunes en la zona cafetera colombiana para secado solar están la casa elba, patio, y la marquesina que consta de una cubierta parabólica de

plástico con piso en cemento, madera o bandejas en malla perforada para depositar el café. Para un caficultor que produzca 3,75 Toneladas de CPS al año debe disponer 100 m² para secar el café al sol, equivalente a 27 m² por tonelada de CPS/año (Roa *et al.*, 1999).

1.4.2.2 Secado mecánico

La incidencia de las lluvias en época de cosecha, limita el uso del secado solar para fincas con producciones superiores a 12,5 Ton CPS/año. Como alternativa para retirar la humedad de los granos en menor tiempo, se hace pasar un flujo de aire caliente impulsado por un ventilador, entre el espacio inter granular correspondiente al 45% del volumen total aproximadamente; permitiendo aprovechar las propiedades físicas de los granos con una gran área superficial de 780 m² por metro cúbico de CPS. En el secado mecánico los granos ceden humedad al aire caliente que pasa entre ellos, y a medida que pierde agua en la superficie del grano se inicia una migración de humedad desde la parte interna para suplir este déficit, esta dinámica se denomina difusión (Oliveros *et al.*, 2013).

En capa fija los contenidos de humedad difieren respecto al espesor entre 12 – 40 cm según el modelo y la capacidad del equipo de secado, y a la dinámica del proceso que requiere inversiones de flujo de aire en intervalos de 6 a 12 horas, teniendo en cuenta que la temperatura de secado no supere los 50°C y que el caudal recomendado es de 100 m³/min-Ton de CPS (Oliveros *et al.*, 2013).

1.5 Calidad del café

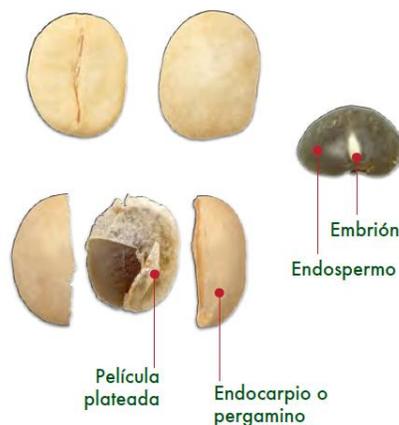
Según Roa *et al.*, (1999) para algunos productos como el café, las características sensoriales son más importantes que su valor nutritivo como parámetro de calidad. La apariencia, el color y el olor del grano de café pergamino, almendra y tostado, así como las cualidades organolépticas de la bebida, permiten que el café colombiano sea reconocido dentro de los cafés arábigos, en su condición de suaves lavados. La calidad está determinada por aspectos genéticos e influenciada por muchos factores como las condiciones de cultivo, el clima, el suelo, los cuidados fitosanitarios y las prácticas agronómicas en general, así como por la recolección selectiva en mayor proporción de

frutos maduros, el tipo y control durante el proceso de beneficio, la trilla, la torrefacción y la preparación de la bebida.

La cantidad de fotoasimilables disponibles están relacionados con la calidad del café durante el llenado del grano en la fase de crecimiento del fruto, en el caso de los azúcares existe un aumento significativo de sacarosa en la medida que el fruto se desarrolla a partir de la semana 20 hasta la 40 (Clifford, 1985 y Rogers *et al.*, 1999 citados por Binotto *et al.*, 2011).

Luego de terminado el proceso de secado se obtiene grano pergamino de apariencia homogénea con olor fresco característico a café, color amarillo claro y una humedad entre el 10 y 12%. El café almendra de buena calidad presenta color verde azulado con apariencia homogénea y sana; su tamaño es heterogéneo según la variedad y se mide en mallas de 12/64 a 18/64 de pulgada (Puerta, 2013). En el proceso de trilla y limpieza del grano se retira el pergamino y la película plateada (figura 7), la cual representa la merma, junto a las impurezas del grano, quienes representan un porcentaje que varía del 17 al 20%, la cual depende de la humedad del grano y la variedad de café. Como estrategia de comercialización en Colombia a través de las Cooperativas se bonifica a los productores que vendan café con 75% de almendra sana (Federacafé, 2013; citado por Puerta, 2013).

Figura 7. Café pergamino seco y almendra.



Fuente: Flórez *et al.*, (2013).

En el periodo del cultivo y los procesos de beneficio, almacenamiento y transporte del grano de café, por prácticas inadecuadas se pueden generar varios defectos que se detectan por su apariencia física y en la calidad de la bebida. Los defectos del grano de café almendra según Federacafé (2013) citado por Puerta (2013) establecidos en dos categorías son los siguientes:

Defectos del primer grupo: Negros llenos, parciales o secos, vinagres enteros o parciales, reposados amarillos o carmelitas y ámbar o mantequilla.

Defectos del segundo grupo: Flojo, cardenillo, decolorado (veteado y blanqueado), mordido o cortado, picado por insectos, sobre-secados o quemados, partido, malformado o deformado, inmaduro, aplastado flotador o balsudo y averanado o arrugado.

En la figura 8 se observan los defectos de grano de café que afectan notablemente la calidad de la bebida.

Figura 8. Defectos de café almendra que afectan la calidad de la bebida. a. Brocado. b. Vinagre. c. Decolorado. d. Negro. e. Mohoso.



Fuente: Puerta, (2013).

Las características organolépticas de la bebida de café que se evalúan, son las siguientes:

Fragancia y aroma: Los compuestos aromáticos que se incluyen en la fragancia percibida por el olor sobre el café tostado y molido, luego de preparar la infusión en agua caliente se denomina aroma de la bebida. Se evalúan en tres etapas distintas del proceso de catación: (1) olfatear la molienda colocada en la taza antes de verter el agua caliente sobre el café, (2) percibir los aromas liberados mientras que rompe la costra formada por el café molido en la superficie del agua; y (3) olfatear los aromas liberados en la infusión de café. La puntuación dada al final debe reflejar la preferencia de los tres aspectos de una muestra en fragancia / Aroma (SCAA, 2014). Las intensidades y tipos de aromas indican la calidad y frescura del café, en caso particular para el café de Colombia tiene aromas intensos y agradables que están compuestos por numerosas sustancias volátiles, las cuales se juntan y producen las diferentes descripciones y categorías de este atributo tales como: tostado, dulce, caramelo, chocolate, herbal, floral, leguminoso, cereal y especias (Puerta, 2013).

Sabor: representa la naturaleza principal del café, las notas de "gama media", entre las primeras impresiones dadas por el aroma y acidez del café para su sabor residual final. Es una impresión combinada de todas las sensaciones gustativas (papilas gustativas) y aromas retro-nasales que van desde la boca hasta la nariz. La puntuación dada por el sabor debe tener en cuenta la intensidad, la calidad y la complejidad de su sabor y aroma combinado, experimentado cuando el café es aspirado en la boca vigorosamente con el fin de involucrar a toda la boca en la evaluación (SCAA, 2014).

Sabor residual: Corresponde a la sensación en la duración de sabor auténtico (sabor y aroma), cualidades derivadas de la parte posterior del paladar y que quedan después de que la porción de la bebida se expulsa o se traga (SCAA, 2014); así puede perdurar una sensación limpia y agradable con sabores dulces o frutales que le darían puntuaciones altas o también sucia, pesada, desagradable, agria, áspera, picante, a las que se califica una puntuación baja (Puerta, 2013).

Acidez: Contribuye a la vitalidad, la dulzura, y el carácter de la fruta dulce de un café y es casi inmediatamente experimentado y evaluado cuando el café se aspira inicialmente en la boca; es a menudo descrita como "el brillo" cuando es favorable o "amargo" cuando es desagradable, debido a que es demasiado intensa o dominante (SCAA, 2014). Esta sensación es característica del café arábica que es procesado por vía húmeda, la

intensidad de la acidez se puede modificar mediante la fermentación y la tostación, y se torna indeseable cuando es agria, picante, acre, astringente, producto de prácticas inadecuadas de cosecha y en el beneficio del grano (Puerta, 2013).

Cuerpo: La calidad del cuerpo se basa en la sensación táctil del líquido en la boca, como una mayor o menor concentración, en lo que se percibe entre la lengua y el paladar; la mayoría de las muestras con cuerpo pesado también pueden recibir una puntuación más alta en términos de calidad, debido a la presencia en la infusión de coloides y sacarosa. Algunas muestras con cuerpo ligero también pueden tener una agradable sensación en la boca (SCAA, 2014). Los solubles del café dependen de la composición química del grano debido a la especie, el tipo de beneficio, el grado de tostación y tamaño de la molienda, de la preparación de la bebida, así como el tiempo de contacto entre el café y el agua, la temperatura, calidad del agua y el tipo de preparación (Puerta, 2013).

Balance: El complemento o contraste entre sí de los atributos de sabor, el sabor residual, acidez y cuerpo del café se denomina balance; al carecer la muestra de aspectos como el aroma o sabor o si alguno de estos son muy fuertes, la calificación se reduce notablemente (SCAA, 2014).

Dulzor: Hace referencia a la plenitud de sabor agradable en la bebida de café, su percepción es el resultado de la presencia de azúcares; el contraste al dulzor es agria, astringente o sabores “verdes”. En la calificación sobre 5 tazas por muestra; 2 puntos se valoran por taza que exprese este atributo para una puntuación máxima de 10 puntos (SCAA, 2014). Esta es una característica de los cafés arábica que le provee suavidad, mientras que los cafés robustas son menos dulces (Puerta, 2013).

Taza limpia: Contempla la ausencia de impresiones negativas en el primer sorbo y percepción del sabor residual final, define una “transparencia de la taza”; al evaluar este atributo se parte de la experiencia sobre el sabor y el tiempo desde la toma inicial hasta la deglución final o escupido de la bebida. Cualquier aroma o sabores no característicos del café permiten descalificar por taza individual. Por cada taza que demuestre el atributo de taza limpia se califican 2 puntos favorables (SCAA, 2014).

Uniformidad: Es la consistencia de las diferentes tazas de la muestra catada; al encontrar un sabor diferente, la calificación es afectada. 2 puntos se califican favorables por cada taza en la que se percibe este atributo, con un máximo de 10 puntos si las 5 tazas son idénticas (SCAA, 2014).

Global (Puntaje del catador): Esta puntuación “Global” refleja la calificación propia integrada de la muestra según la percepción individual del panelista. Un café con varios aspectos muy agradables pero no precisos, recibe una puntuación inferior; por el contrario al cumplir las expectativas de carácter y refleja cualidades de sabor original, es causal de una alta calificación (SCAA, 2014).

Defectos: Son sabores desagradables que le restan calidad al café; clasificados de dos maneras, Un mal sabor o “mancha” que se perciba, pero no muy fuerte se le asigna un valor 2 en intensidad. Un mal sabor encontrado ya sea pronunciado o que genere un sabor desagradable en toda la muestras se califica con una intensidad de 4. Al realizar la clasificación de “mancha o fallo” se describe literalmente como: agria, de caucho, fermento, fenólico; las tazas en las que se encuentra se califica la intensidad del defecto, multiplicando por el número de tazas y restando a la sumatoria de los atributos, según el formato utilizado (SCAA, 2014).

1.5.1 Análisis sensorial de cafés especiales

La catación es el método para medir los principales atributos del café, descritos anteriormente; los catadores son personas que mediante los sentidos de la vista, el olfato y el gusto, sienten, perciben, identifican, analizan, describen, comparan y valoran la calidad del café; el análisis que lleva a las evaluaciones sensoriales pueden identificar los defectos presentes en la bebida de café, así como conocer la intensidad de la acidez y el dulzor, reconocer y calificar el sabor y el aroma (Puerta, 2013).

La Sociedad Americana de Cafés Especiales (SCAA por su sigla en Inglés) (2014), define un protocolo que es el más representativo por su uso en los concursos de taza de excelencia y comercialización de cafés de alta calidad en todo el mundo, incluido Colombia. El propósito del protocolo es la percepción y descripción de la calidad, determinada por el catador; analizando los atributos específicos y luego con la

experiencia previa, las muestras son calificadas en una escala numérica, comparando las puntuaciones entre muestras.

El formato de catación es el medio de registro de los atributos de sabor para el café (ver Anexo A.): Fragancia/Aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, uniformidad, taza limpia, dulzor, defectos, y puntaje del catador. Los atributos específicos corresponden a las puntuaciones positivas de calidad que reflejan una calificación juzgada del catador con valores que van de 0 hasta 10. Los defectos son puntuaciones negativas y denotan sensaciones a sabores desagradables; la escala de calidad por atributo se aprecia en la tabla 4, donde se muestran los incrementos de un cuarto de punto entre los valores numéricos de 6 a 9,75 (SCAA, 2014).

Tabla 4. Escala de puntos de niveles de calidad por atributo evaluado.

Escala de calidad			
6,00 - buena	7,00 – Muy buena	8,00 - Excelente	9,00 - Sobresaliente
6,25	7,25	8,25	9,25
6,50	7,50	8,50	9,50
6,75	7,75	8,75	9,75

Fuente: Specialty Coffee Association of America (SCAA) (2014).

Finalmente, la suma de los atributos y la resta de los valores negativos de los defectos generan una calificación en una escala de 0 hasta 100 puntos; para los resultados finales se clasifica la calidad del café como se describe en la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de cafés especiales de acuerdo a la puntuación total en la evaluación sensorial.

Puntaje total	Categoría	Clasificación
90 – 100	Sobresaliente	Especial
85 -89,99	Excelente	
80 – 84,99	Muy bueno	
< 80	Por debajo de calidad especial	No Especial

Fuente: Specialty Coffee Association of America (SCAA) (2014).

1.5.2 Influencia de las variedades y los diferentes estados de maduración de los frutos de café en el proceso de beneficio y su calidad en taza

En la maduración del fruto de café se produce la translocación de compuestos fenólicos de la semilla a las capas superficiales, entre ellos se encuentra la migración de ácidos clorogénicos, que tienen una influencia directa en la calidad de la bebida. Una de las razones para el aumento de la calidad del grano con el mayor tiempo de desarrollo es debido a los cambios bioquímicos que involucran al ácido clorogénico, donde al final de la maduración del fruto este se transloca a la periferia de la semilla (Ohiokpehai *et al.*, 1982 y Dentan, 1985 citado por Binotto *et al.*, 2011).

En el momento de la translocación estos ácidos se descomponen temporalmente en isómeros, que son generalmente, ácido cafeoilquinico, ácidos dicafeoilquinico, ácido cafeico (QCA) y ácidos feruloilquinico o ferálico (AFQ). Estos isómeros se reúnen de nuevo cuando alcanzan la superficie del grano. Los factores que afectan el tiempo de maduración, como las altas temperaturas que afectan el equilibrio entre la reunión de isómeros que modifican el color de la pulpa del fruto de café, donde las características sensoriales son fuertemente influenciadas por los isómeros fraccionados, constituyen un fruto más astringente, metálico o duro (Ohiokpehai *et al.*, 1982 y Menezes, 1990 citados por Binotto *et al.*, 2011).

El tiempo de maduración es un factor que afecta el metabolismo de este ácido y por lo tanto puede influir directamente en la calidad final. Así como lo señala Rogers *et al.*, (1999) citado por Binotto *et al.*, 2011 quienes encontraron la relación en la disminución de ácido quinico con el desarrollo del grano, el cual está relacionada con el metabolismo de contenido de ácido clorogénico, como precursor de la síntesis, influyendo directamente en la calidad de la bebida. De esta manera el tipo de manejo de cultivo con sombrío, que permita una maduración más lenta del fruto contribuye a aumentar la calidad de la bebida.

Puerta (2000) evaluó la calidad del café preparado con mezclas de café cereza maduro e inmaduro, en porcentajes desde 0,5 a 15% de café inmaduro, realizando beneficio húmedo con despulpado sin agua, 14 horas de fermentación natural o desmucilaginado mecánico según el tratamiento empleado, lavado y secado al sol. Los resultados indicaron que a partir de 2,5% de café verde se rechazaron desde el 30% de las tazas por defectos como sucios, fermento, stinker, tierra y sabores desagradables y se disminuye en 7% el rendimiento del pergamino en relación con el maduro.

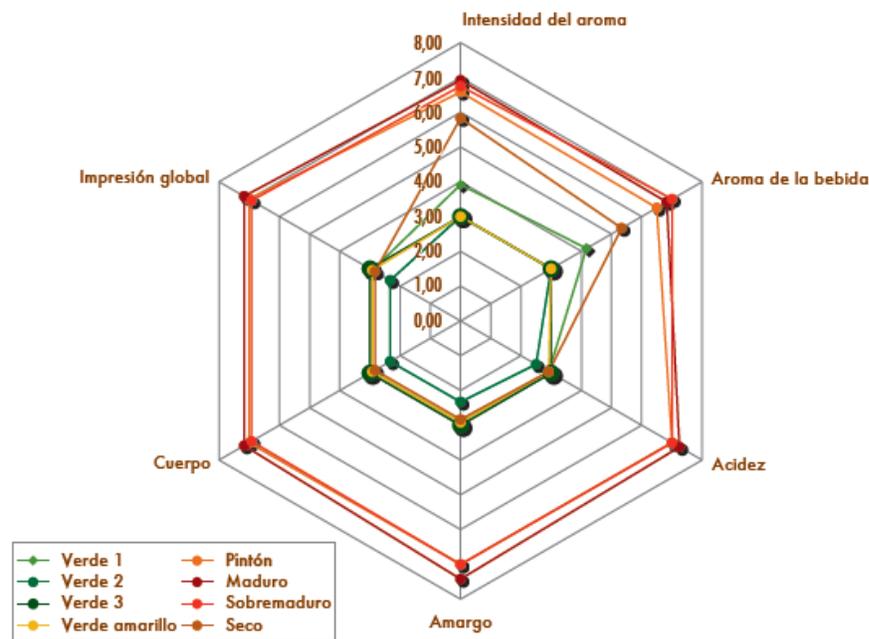
El grano verde inmaduro no despulpa completamente, al secarse y trillarse se obtiene grano vinagre y negro que afecta la calidad física y organoléptica. La autora comprobó además que a mayor porcentaje de café maduro en una muestra de café, aunque presente daño parcial por broca en el grano, se obtiene mayor número de tazas de café de buena calidad. Recomienda además que los productores deben asegurar la calidad antes y en la cosecha con buen manejo cultural, recolección oportuna, beneficio inmediato y buenas prácticas en el proceso poscosecha. Marín *et al.*, (2003) evaluaron el efecto de los diferentes estados de desarrollo del fruto de café variedad Colombia encontrando que las tazas mejor calificadas fueron preparadas en su totalidad con frutos maduros despulpados y con desmucilaginado mecánico (DESLIM), según se aprecia en la figura 10. También verificaron los resultados obtenidos por Puerta (2000), donde adicionalmente los frutos inmaduros inducen sabores y aromas a fermentos; los frutos secos cosechados que entran al proceso de beneficio generan defectos en la bebida denominada “dura” o imbebible. Las tazas de café procedentes del beneficio húmedo de frutos pintones presentaron calificaciones intermedias, donde una proporción alta de estos frutos dentro de la masa de café a procesar, causaría defectos en taza.

Con la referencia de estas dos investigaciones mencionadas, el último reseña al primero concluyendo que las cerezas óptimas para la recolección son las pintonas (210 ddf), las maduras (217 ddf) y las sobremaduras (224 ddf), por haber mostrado las calificaciones mejores de intensidad del aroma del café molido, aroma de la bebida, acidez, amargo e impresión global (figura 9).

Para diferentes zonas cafeteras de Colombia, Puerta (1998) evaluó en las variedades de café Típica, Caturra, Borbón, Colombia frutos rojos y amarillos, en el panel de catación de Cenicafé las propiedades sensoriales: intensidad del aroma del café tostado y molido,

aroma de la bebida, acidez, amargor, cuerpo e impresión global, calificándolas con la escala descriptiva con valores de: 9,8,7 muy buena, equilibrada, balanceada, 6 buena, 5 verde, astringente, insípida, aroma pronunciado, 4 baja, 3 cereal, reposo, quemado, muy amargo, 2 fermento, extraño, metálico, sucio, 1 fenol carbonoso, tierra, picante, contaminado. La autora identificó que el aroma, el amargor y el cuerpo de la bebida son similares para las variedades en las procedencias, según se observa en la tabla 6. Para la intensidad del aroma del café molido se presentaron diferencias estadísticas significativas entre la variedad Típica y las variedades Colombia (Santander) y la variedad Caturra. La acidez fue resaltada como una cualidad muy apreciada por los consumidores en los cafés procesados por vía húmeda donde los valores se consideran bien calificados a excepción de la variedad Típica. En la impresión global muestran diferencias las variedades Colombia y la variedad Típica. La autora concluye que las variedades evaluadas cuando se procesa café maduro por medio de beneficio controlado, no presentaron diferencias marcadas en el análisis sensorial.

Figura 9. Perfil sensorial del café C. arábica variedad Colombia, proveniente de cerezas de café en diferentes estados de maduración.



Fuente: Marín *et al.*, (2003).

Vidal (2014), evaluó el contenido de sólidos solubles totales respecto a la calidad sensorial de la bebida para las variedades de café Catimor y Catuai en el estrato

altitudinal alto a 1500 msnm, medio a 1250 msnm y bajo a 1000 msnm; con recolecciones de frutos en diferentes intervalos de tiempo al iniciar estos el proceso de maduración, encontrando la mejor taza con el “rango ideal” de 16 a 19 °brix en el estrato alto, entre 17,5 a 20,5 °brix en el estrato medio y 18,5 a 21,5 °brix en el estrato altitudinal bajo.

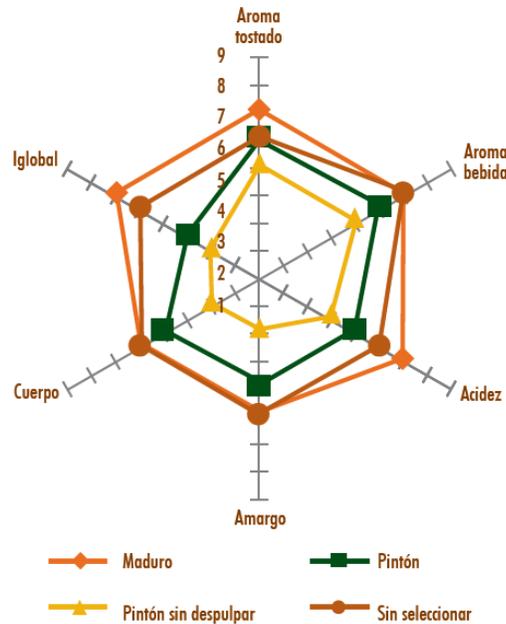
Tabla 6. Análisis sensorial de variedades de café cultivadas en Colombia.

Variedad	Intensidad aroma café molido	Intensidad aroma bebida	Acidez	Amargor	Cuerpo	Impresión global
Caturra	7,378a*	7,422a	7,533ac	6,933a	7,322a	7,311ab
Colombia (Rojo)	7,321a	7,320a	7,566ac	6,739a	7,387a	7,396a
Caturra (Santander)	7,290ab	7,258a	7,129bc	6,968a	7,194a	7,129ab
Colombia(Amarillo)	7,243ab	7,207a	7,451ac	6,928a	7,171a	7,270ab
Típica	6,9718b	7,189a	6,956b	6,678a	7,0a	6,967b
Borbón	7,215ab	7,187a	7,346ac	7,252a	7,262a	7,252ab
Colombia (Santander)	7,489a	7,162a	7,0b	6,541a	6,892a	7,0ab

Fuente: Puerta (1998).

Puerta (2010) evaluó varios tipos de enzimas pectolíticas para la remoción de mucílago en frutos de café variedad Colombia rojo en estado maduros, pintones y sin seleccionar, estos últimos caracterizados en 3% frutos verdes, 22,1% pintón, 44,3% maduro, 21,1% sobremaduro y 12,6% de frutos secos, utilizando fermentación natural sin agua como testigo para comparar el efecto de las enzimas con la evaluación de la calidad de la bebida; no obtuvo diferencias significativas entre los tratamientos con las enzimas y el testigo. El aroma del café sin seleccionar alcanzó la mayor calificación respecto a los otros grados de maduración, de la misma forma las mayores calificaciones de la acidez en la bebida se obtuvieron con los frutos maduros y no seleccionados en el proceso de fermentación natural, que desarrolla una acidez característica, equilibrada y estimada de la bebida; al igual para el cuerpo que se calificó como parejo, equilibrado y la impresión global también presentó la mejor calidad para estos dos tipos de masa cosechada. En el caso del café pintón la calidad de la impresión global fue rechazada (figura 10). Finalmente concluye que la calidad del café Arábica está influenciada significativamente por el estado de desarrollo del fruto de café beneficiado.

Figura 10. Calidad de la bebida de café variedad Colombia procesado por fermentación natural, según el estado de desarrollo del fruto.



Fuente: Puerta (2013).

Borges *et al.*, (2002) evaluó café arábica variedad Catuai separadamente en cultivos de 12 y 3 años de edad, donde de los frutos cosechados elaboró seis lotes o tratamientos con la siguiente composición: 100% de cereza, 60% de cereza y 40% de fruto verde, 80% de cereza y 20% de verde, 60% de cereza y 40% de seco, 80% de cereza y 20% de frutos secos y el lote testigo con la composición obtenida en cosecha. Realizando beneficio seco de los frutos colocándolos en patio de cemento durante 15 días a temperaturas máximas de secado de 34°C. Para el análisis sensorial se preparó la bebida con una concentración de 9g/100 ml conforme a términos medios de gusto Brasileiro, y la catación la realizaron 31 personas no entrenadas seleccionadas entre consumidores con criterios de consumo de café sin azúcar, los cuales calificaron conforme a una escala de 1 (Muy desagradable) hasta 9 (muy agradable). La evaluación no mostró diferencia estadística significativa entre los lotes de café en cuanto a preferencia de los consumidores, y realizando la técnica de mapa de preferencia que mostró segmentación entre los consumidores que agrupan mayor aceptación de la bebida en los lotes: 80% de cereza y 20% de seco, 60% de cereza y 40% de seco y el testigo para el cultivo con 3 años de edad.

1.6 Modelo Matemático

Un modelo consiste en reproducir la realidad de la forma más cercana posible, tratando de entender cómo se comportan fenómenos físicos y obteniendo las respuestas que pueden esperarse de determinadas acciones. Su selección es una etapa crucial para obtener una solución satisfactoria a un problema real. Las estructuras matemáticas asociadas no son arbitrarias, sino una consecuencia de la realidad misma (Chaillou, 2008).

La generación de un modelo matemático involucra dos etapas fundamentales, la de conceptualización y la de formulación. En la primera se debe caracterizar el contexto del problema real, definir claramente el propósito y los límites del modelo, identificar y establecer relaciones entre las variables; en la segunda etapa se deben determinar las funciones asociadas al modelo y seleccionar y estimar los parámetros del mismo. El objetivo es aplicarlo para obtener alguna información del problema o fenómeno que se estudia. Al desarrollarlo se modifica y algunas veces es descartado, y aunque contenga errores, puede poner en evidencia componentes esenciales de una realidad compleja (Chaillou, 2008).

1.6.1 Lógica difusa

Esta herramienta matemática utiliza la experiencia del ser humano para generar un razonamiento que permite la toma de decisiones basada en la lógica multivaluada comprendida entre el 0 (falso) y 1 (verdadero) de la lógica binaria clásica. La lógica multivaluada permite asignar diferentes grados de certeza. Zadeh (1965) aplicó este principio matemático a la teoría de conjuntos, estableciendo la posibilidad de que los elementos pudieran tener diferentes grados de pertenencia a un conjunto (Rodríguez, 2011).

Según la lógica clásica un elemento pertenece o no pertenece al conjunto, mientras que en la lógica difusa le asigna un grado de pertenencia al conjunto, las operaciones entre conjuntos se plantean en forma de operaciones difusas. El grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso para cada valor que pueda tomar la variable x , la función característica $\mu_{A(x)}$ proporciona el grado de pertenencia al conjunto difuso A . Las operaciones con conjuntos pueden ser

extrapoladas sobre dos conjuntos difusos A y B con funciones de membresía μ_A y μ_B , como se indica en la tabla 7 (Rodríguez, 2011).

Tabla 7. Operaciones en lógica difusa.

Unión	Intersección	Complemento
$\mu_A \cup_B = \mu_{A(x)} \cup \mu_{B(x)} = \max(\mu_{A(x)}, \mu_{B(x)})$	$\mu_A \cap_B = \mu_{A(x)} \cap \mu_{B(x)} = \min(\mu_{A(x)}, \mu_{B(x)})$	$\mu_{\bar{A}(x)} = 1 - \mu_{A(x)}$

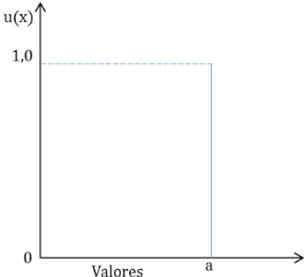
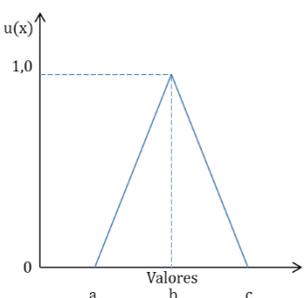
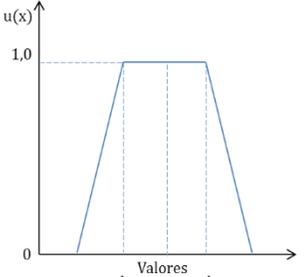
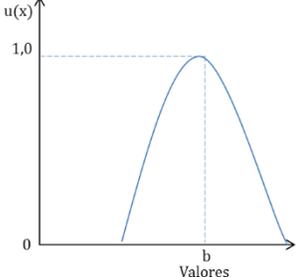
Fuente: Rodríguez (2011).

1.6.1.1 Fusificación de entradas

La Fusificación de una entrada es el proceso por el cual se toma el valor numérico de la entrada y se le asigna un grado de pertenencia respecto a un conjunto difuso o función de membresía previamente definida, generando un valor difuso. El universo de los valores de la entrada es dividido en zonas utilizando los conjuntos difusos a los cuales se les asigna una etiqueta lingüística.

Al trabajar con conjuntos difusos se establecen funciones de membresía (pertenencia) de los elementos a los diferentes conjuntos, lo cual permite asignar a un elemento x , un grado de pertenencia $\mu(x)$ al conjunto, siendo este un valor real normalizado entre 0 (no pertenece en absoluto) y 1 (pertenece al 100%). El grado de pertenencia es la seguridad o certidumbre de que un elemento del universo pertenezca a un conjunto difuso (Rodríguez, 2011). Existen varios métodos para elaborar las funciones de membresía, uno de ellos emplea la experiencia de un experto y suelen ser de forma: única, triangular, trapezoidal y gaussiana, como las más utilizadas que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Funciones de pertenencia de un conjunto difuso.

Ecuación	Tipo	Gráfica
$\mu_{A(x)} = \{1, x_{entrada} = a\} \quad (1.1)$	Única	
$\mu_{A(x)} = \begin{cases} 1, x_{entrada} = b \\ \frac{x_{entrada} - a}{b - a}, \text{ si } a \leq x_{entrada} < b \\ \frac{x_{entrada} - c}{b - c}, \text{ si } b \leq x_{entrada} \leq c \\ 0, \text{ en otro caso} \end{cases} \quad (1.2)$	Triangular	
$\mu_{A(x)} = \begin{cases} 1, \text{ si } b \geq x_{entrada} \leq c \\ \frac{x_{entrada} - a}{b - a}, \text{ si } a \leq x_{entrada} < b \\ \frac{x_{entrada} - d}{c - d}, \text{ si } c \leq x_{entrada} \leq d \\ 0, \text{ en otro caso} \end{cases} \quad (1.3)$	Trapezoidal	
$\mu_{A(x)} = e^{-\frac{x_{entrada} - b^2}{2\sigma^2}} \quad (1.4)$	Gaussiana	

Fuente: Rodríguez (2011).

1.6.1.2 Reglas de inferencia

El proceso de inferencia es una toma de decisión que determina las salidas difusas correspondientes a las entradas fusificadas. Esta toma de decisiones está basada en un grupo de sentencias de la forma Si (antecedente) Entonces (consecuente) que integran

la base de reglas del modelo difuso. Básicamente el proceso de inferencia involucra dos conceptos, la implicación difusa y la regla composicional de inferencia (Rodríguez, 2011).

Una forma simple en una regla es:

Si x es A entonces y es B

Donde A y B son valores lingüísticos definidos por conjuntos difusos en los rangos (universos del discurso) X y Y , respectivamente. La parte *Si* de la regla " x es A " se llama el antecedente o premisa, mientras que la parte *Entonces* de la regla " y es B " se llama la consecuente o conclusión (User's guide Matlab, 2015).

Para la resolución de las reglas de inferencia existen diversos métodos de implicación difusa, entre los más importantes son el método del mínimo o mandani y el método del producto o de Larsen planteado por Herrera (2002) citado por Rodríguez (2011). Una regla como la siguiente es resuelta por ambos métodos de la siguiente forma:

Regla: Si $[(x_1 \text{ es } A) \text{ y } (x_2 \text{ es } B)]$ entonces y es D

a) El método del mínimo o de Mandani: se almacena en una relación difusa R donde se elige el grado de pertenencia mínima:

$$\mu_{R(x_1, x_2)} = \min[(\mu_{A(x_1)}, \mu_{B(x_2)})] \quad (1.5)$$

b) El método del producto o de Larsen. Se almacena en una relación difusa R que realiza el producto de los grados de pertenencia respectivos:

$$\mu_{R(x_1, x_2)} = [(\mu_{A(x_1)}, \mu_{B(x_2)})] \quad (1.6)$$

1.6.1.3 Defusificación de salidas

La defusificación de las salidas consiste en obtener un valor numérico convencional para cada una de las salidas del modelo a partir de los conjuntos difusos a los que pertenecen. La interfaz de defusificación será la encargada de generar el escalar que es

el valor de la salida luego de la resolución de las reglas de inferencia formuladas (Rodríguez, 2011).

Los métodos de defusificación centro de área o centroide son los más usados, fundamentados en el área bajo la gráfica de la función de membresía del conjunto difuso de salida. En general, dado un conjunto difuso C definido en el intervalo $[z_1, z_2]$ la Defusificación Z^* por centro de gravedad, está dada por la ecuación 1.7 (Rodríguez, 2011), donde Z es el valor real ya defusificado.

$$Z = \frac{\int_{z_1}^{z_2} Z * UC(Z) dz}{\int_{z_1}^{z_2} UC(Z) dz} \quad (1.7)$$

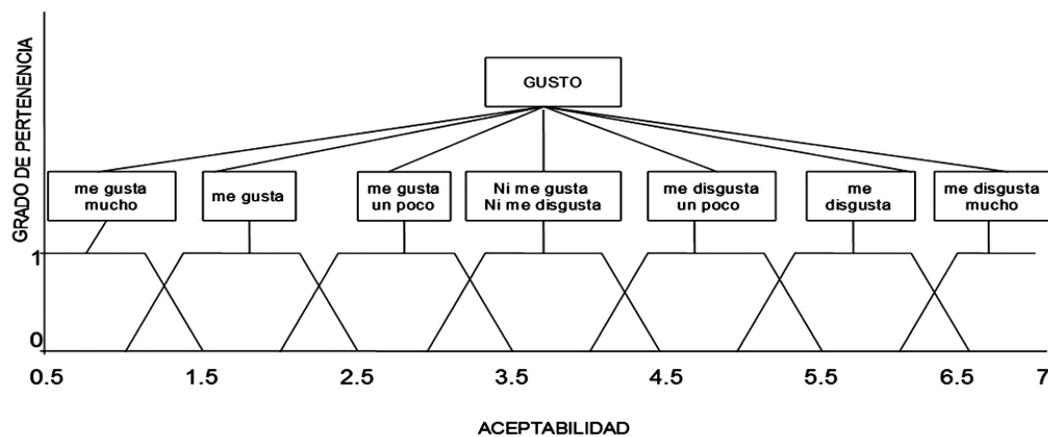
1.6.1.4 Aplicaciones de lógica difusa en análisis sensorial

La lógica difusa ha sido empleada para representar la semántica del lenguaje humano en la evaluación de atributos sensoriales. En el caso del café se realizó una evaluación sensorial con 30 jueces evaluadores, en bebidas preparadas para tres marcas comerciales de café, los términos lingüísticos de los conjuntos difusos permitieron una mejor interpretación de las percepciones de los evaluadores y aproximarse mejor a la preferencia de los consumidores (Perrot *et al.*, 2006, Lazim *et al.*, 2009 citados por Ávila *et al.*, 2011).

Tominaga *et al.*, (2002) diseñaron una red Neuronal difusa (Fuzzy Neural Network – FNN) con el fin de estimar las puntuaciones de evaluación sensorial para el café, a partir de mezcla de grano proveniente de Colombia, Brasil e Indonesia. Emplearon un panel de 5 catadores expertos, midiendo con una escala de 0 a 100 los atributos: Sabor amargo, sabor ácido, tostión, suavidad, dureza, neutro, astringencia, sensación en la boca y cuerpo, evaluadas teniendo en cuenta las categorías de sabor, aromáticos, sensación en la boca e impresión global de la bebida. Encontraron que la FNN entrenada con 16 datos de aprendizaje era suficientemente precisa para ser puesta en práctica en la estimación de las puntuaciones de evaluación sensorial de los 10 atributos examinados; comparada con los modelos de ecuaciones lineales y polinomiales en métodos de superficies de respuesta y análisis de regresión múltiple, los cuales fueron imprecisos.

Ávila *et al.*, (2011) aplicaron lógica difusa en la evaluación sensorial de una bebida a base de piña con un panel entrenado de 32 integrantes, para determinar con ayuda de pruebas afectivas y datos instrumentales, la aceptación o rechazo de la bebida por el consumidor, la preparación de la bebida tuvo como parámetros los valores de ° brix, pH y viscosidad como variables de entrada, el gusto y la consistencia como variable de salida medidas en una escala hedónica como se aprecia en la figura 11.

Figura 11. Escala hedónica como variable de salida para evaluar con Lógica difusa la bebida de piña.



Fuente: Ávila *et al.*, (2011).

Ávila *et al.*, (2011) elaboraron un programa donde a partir de los resultados de la evaluación reportado por el panel, definieron intervalos de ponderación de la escala con base en la preparación de la bebida con las variables instrumentales °brix, pH y viscosidad, y cuando estos intervalos se ubicaban en el óptimo indicaban una calificación de “bebida ideal” y en los casos en los cuales al menos una variable de entrada estuviera fuera del intervalo óptimo, se consideró “Bebida no aceptada”. Con funciones de pertenencia triangular (variables entrada) y gaussiana (variable salida), definieron las reglas heurísticas basados en los resultados experimentales; al validar el programa encontraron exactitud al calificar la muestra como “bebida ideal” o “no aceptada” coincidiendo la respuesta del programa con los datos de la evaluación sensorial (Ávila *et al.*, 2011).

Capítulo 2. Materiales y métodos

2.1 Localización

La investigación se desarrolló en el Municipio de Ciudad Bolívar al suroeste del departamento de Antioquia cerca del Centro Poblado Alfonso López, en dos fincas con potencial de producción de cafés especiales: en la finca Montenegro Vuelta Bonita, ubicada en la Vereda Remolino Arriba con coordenadas $5^{\circ} 53' 49,5''$ Latitud Norte y $75^{\circ} 57' 56,3''$ Longitud Oeste, en un lote experimental de café variedad Caturra con sistema de siembra a libre exposición solar, de 6,5 años de edad a una altitud de 2020 m.s.n.m (figura 12a). El segundo lugar de trabajo fue la finca Lorica localizada en la vereda Hondura con coordenadas $5^{\circ} 53' 22,7''$ Latitud Norte y $75^{\circ} 57' 07,7''$ Longitud Oeste, a una altitud de 1480 m.s.n.m, en un lote de café variedad Colombia de 2 años de edad con sistema de siembra bajo sombra (figura 12b). La información climática promedio del último año de la zona corresponde a una temperatura ambiente de 19°C , humedad relativa 79% y precipitación media anual de 1477 mm.

Figura 12. Lote de café: a. Variedad Caturra. b. Variedad Colombia.



2.2 Materiales y equipos

En el desarrollo de la investigación se utilizaron los siguientes materiales:

- Café cereza, variedades Caturra y Colombia
- Tabla de estados de maduración de frutos de café
- Bolsas plásticas Ziploc de 38x25 cm
- Dispositivo fermaestro (cono truncado de plástico)
- Recipientes plásticos para fermentación de muestras de café en baba
- Agua destilada y soluciones buffer

De la misma forma los siguientes equipos:

- Colorímetro digital portátil marca Konica Minolta® modelo CR - 400 con software para adquisición y análisis de datos SpectraMagic NX.
- Refractómetro digital marca Hanna Instruments® modelo HI96801 (Precisión $\pm 0,2$ % brix).
- Dinamómetro digital marca Extech® modelo 475040 (Precisión $\pm 0,4\%$).
- pHmetro digital Marca Hanna Instruments® (Precisión $\pm 0,1$ pH).
- Termómetro digital para alimentos (Precisión $\pm 1^\circ$ C).
- Balanza digital (capacidad 100kg) (Precisión $\pm 0,1$ kg).
- Kit gravimet (Balanza digital capacidad 5000g precisión 1g, canasta plástica y formatos).
- Medidor de humedad para grano de café marca Cofeepro Moiusture Grain Plus®, con rango de medición de humedad entre 7 hasta 44 %; y temperatura del grano entre 4 y 43° C.
- Secador mecánico con intercambiador de calor (IC) con combustible gas, de capa fija con bandejas de acero inoxidable para secado de muestras.
- Equipo de beneficio húmedo de café (despulpadora, zaranda clasificadora).
- PC portátil para registro y análisis de datos.

Adicionalmente se utilizó el software MATLAB® para el desarrollo del modelo matemático y panel sensorial de expertos en café Q Grader de 5 integrantes.

2.3 Metodología

En las dos fincas se realizó la caracterización y clasificación del café recolectado en 3 pases de cosecha teniendo en cuenta el porcentaje (%) en la masa cosechada de frutos maduros, sobremaduros, pintones y verdes. Luego se realizó la elaboración de 3 composiciones de estados de maduración más comunes, definidas a partir de información obtenida en los muestreos realizados en la cosecha del año 2014 en el marco del Proyecto AOCE (Antioquia: Origen de Cafés Especiales), y un testigo correspondiente a la masa cosechada que llegó del lote a la tolva de recibo, a los cuales se les efectuó un beneficio húmedo bajo un proceso estandarizado haciendo uso de las buenas prácticas de manufactura. Para la valoración sensorial se tomó de cada mezcla procesada un (1 kg de café pergamino seco (CPS), donde el análisis organoléptico de la bebida se realizó por un panel entrenado de catación, con base en el protocolo de la SCAA (2014).

El desarrollo metodológico presenta actividades previas a la ejecución experimental en las fincas seleccionadas, como la elaboración de una escala de maduración y la definición de las mezclas de café a partir de la información del Proyecto AOCE.

2.3.1 Variables

2.3.1.1 Variables independientes

Las variables que relacionan la composición de la masa cosechada del café fueron:

- Porcentaje de frutos Maduros (% M), calculado mediante la expresión:

$$\%M = \frac{M}{P_T} * 100 \quad (2.1)$$

Donde M : Peso en gramos (g) de frutos maduros.

P_T : Peso total de la muestra en g.

- Porcentaje de frutos Pintones (% P), calculado mediante la expresión:

$$\%P = \frac{P}{P_T} * 100 \quad (2.2)$$

Donde P : Peso en gramos (g) de frutos pintones.

- Porcentaje de frutos Sobremaduros (% SM), calculado mediante la expresión:

$$\%SM = \frac{SM}{P_T} * 100 \quad (2.3)$$

Donde SM : Peso en gramos (g) de frutos sobremaduros.

- Porcentaje de frutos Verdes (% V), calculado mediante la expresión:

$$\%V = \frac{V}{P_T} * 100 \quad (2.4)$$

Donde V : Peso en gramos (g) de frutos verdes.

2.3.1.2 Variable dependiente

La calidad sensorial en taza y el análisis físico fueron evaluados a través de un panel entrenado de 5 catadores expertos con certificación Q grader, las cuales fueron: Fragancia, aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, uniformidad, taza limpia, dulzor, defectos, e impresión global. Adicionalmente notas específicas de atributos en la escala de la SCAA (2014) y el puntaje total para los atributos con valores que van desde 0 hasta 100 puntos. En el análisis físico se evaluó el contenido de humedad en base húmeda fue determinado con el equipo Grain Moisture Tester® PM - 410, los defectos físicos, merma en trilla y almendra sana fueron analizados según las normas NTC 3314 y NTC 3633.

La temperatura y pH de la masa de café despulpado al inicio y a final del proceso de fermentación natural del mucílago en cada tratamiento, se midieron como covariables importantes en el proceso de beneficio húmedo del café.

2.3.2 Procedimiento para la caracterización de los estados de maduración de los frutos de café

La población objeto de estudio corresponde a los frutos de café cereza recolectados en diferentes estados de maduración en las dos fincas donde se desarrolló el experimento.

Para identificar los estados de desarrollo: maduro, sobremaduro, pintón y verde, previamente para cada variedad, fueron tomados 100 frutos de cada estado a los cuales se les determinaron las coordenadas en el sistema de color CIEL*a*b* acromática L*, y cromáticas a* y b*, mediante un colorímetro portátil marca Konica Minolta® modelo CR - 400 con iluminante estándar D65, ángulo de observador de 2° y calibración previa con placa plana (color blanco, coordenadas Y= 87,1, x= 0,3184, y=0,3357), y el software SpectraMagic NX para descarga y analizar los datos. Por cada fruto sobre la superficie del epicarpio se registraron las coordenadas tres veces en el área ecuatorial en diferentes posiciones en 360° utilizando la metodología desarrollada por Carvajal *et al.*, (2011), en cada uno se registró el valor promedio en el sistema de color CIEL*a*b* que fue utilizado para estimar la diferencia de color (ΔE) para cada estado de maduración, utilizando la ecuación 2.5 reportada por Vignoni *et al.*, (2006). Luego se realizó el análisis de estadística descriptiva, con los valores promedio y desviación estándar se definió el límite superior como patrón inicial para el desarrollo del trabajo.

$$\Delta E_i = \sqrt{(L_0 - L_i)^2 + (a_0 - a_i)^2 + (b_0 - b_i)^2} \quad (2.5)$$

Dónde:

ΔE_i : diferencia de color del fruto *i* en cada estado de maduración.

L_0 : El valor de la coordenada acromática *L* patrón para el estado de maduración del fruto.

L_i : El valor de la coordenada acromática para el fruto a comparar con el patrón.

a_0 : Valor de la coordenada cromática a* patrón para el estado de maduración del fruto.

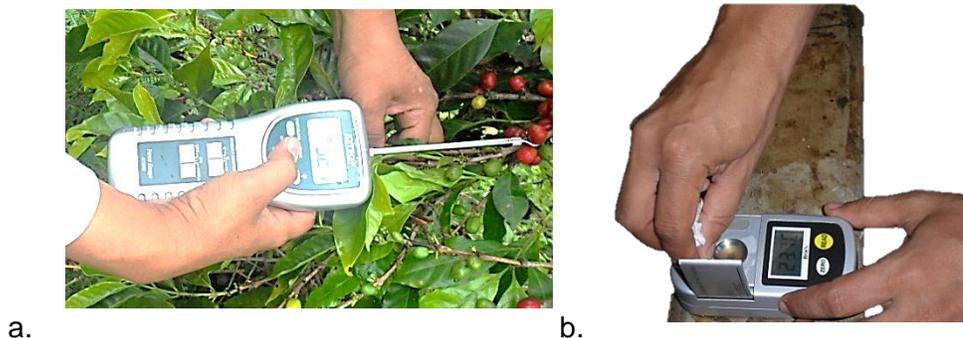
a_i : Valor de la coordenada cromática a* para el fruto a comparar.

b_0 : Valor de la coordenada cromática b* patrón para el estado de maduración del fruto.

b_i : Valor de la coordenada cromática b* para el fruto a comparar.

De igual manera a 100 frutos se les midió la fuerza de desprendimiento (figura 13a) con un dinamómetro digital marca Extech modelo 475040 (capacidad de 50N), esta se midió con el fin de ratificar estudios similares y dar confiabilidad de los estados de maduración seleccionados. Adicionalmente se registró para 100 frutos en tres estados de maduración (maduro, sobremaduro y pintón), la concentración de azúcares del mucilago (°brix) como se muestra en la figura 13b al momento del despulpado manual de los frutos, extrayendo una gota y ubicándola en un refractómetro digital marca Hanna Instruments® modelo HI86801 con resolución 0,1° brix. Para el estado verde no se pudo realizar la medición de °brix debido a la dificultad de extracción de mucilago en los frutos.

Figura 13. Medición: a. Fuerza desprendimiento (N); b. concentración de azúcares (°brix).



Aplicando estadística descriptiva a esta información, se calcularon los valores medios, coeficientes de variación (CV) e intervalos de confianza LSD para las variables de color, °brix y fuerza de desprendimiento (N) con los cuales se construyó una escala de maduración que acompañada de imágenes fotográficas, se empleó como herramienta para clasificar los frutos en los cuatro estados de maduración durante los ensayos.

En las dos fincas seleccionadas, se realizó una actividad de entrenamiento a 4 operarios quienes realizaron la clasificación manual de los frutos y los posteriores tratamientos de café (figura 14a), tomando como referencia la escala de maduración construida. Con esta información se ajustaron a nuevos valores de patrón en las coordenadas del sistema de color CIEL*a*b* y un valor máximo de diferencia de color ΔE para cada uno de los 4 estados de desarrollo del fruto. Para confirmar la clasificación de los frutos por parte de los operarios en el entrenamiento, se realizó un muestreo al azar de 100 frutos por cada

estado maduro, sobremaduro, pintón, y verde; midiendo en el colorímetro las coordenadas L^* , a^* y b^* (figura 14b); luego se realizó el análisis estadístico con los valores promedio y desviación estándar, estimando intervalos en diferencias totales de color (ΔE), procedimiento similar al realizado con el patrón inicial para obtener la escala de maduración.

El patrón definitivo alcanzado en la actividad de entrenamiento fue un parámetro para cotejar en el momento que se caracterizaron los estados de maduración en el desarrollo de la investigación (ver figura 15).

Figura 14. a. Entrenamiento de los operarios. b. Verificación de color.



El software SpectraMagic NX del Colorímetro permitió realizar la comparación automática utilizando la ecuación 2.5. Dicho software evaluó el estado de maduración respecto al patrón introducido, identificando y señalando los que están dentro del ΔE previamente establecido con el ajuste realizado en la actividad de entrenamiento. De la misma forma en 50 frutos para los estados de desarrollo maduro, sobremaduro y pintón, se midieron los grados $^{\circ}$ brix, para analizar valores y diferencias con los establecidos previamente en la escala de maduración.

Figura 15. Verificación de color en los frutos de café clasificados por estado de maduración.



El Índice de Color (IC^*) se calculó con el fin de relacionar las tres coordenadas del sistema CIEL a^*b^* de la siguiente manera (Vignoni *et al.*, 2006):

$$IC^* = \frac{a^* \cdot 1000}{b^* \cdot L^*} \quad (2.6)$$

Donde:

- a) Si IC^* es negativo (-40 a -20), su valor relaciona los colores que van desde el azul-violeta al verde profundo.
- b) Si IC^* es negativo (-20 a -2), su valor relaciona los colores que van del verde profundo al verde amarillento.
- c) Si IC^* está entre -2 a +2, representa el amarillo verdoso.
- d) Si IC^* es positivo (+2 a +20), se relaciona con los colores que van desde el amarillo pálido al naranja intenso.
- e) Si IC^* es positivo (+20 a +40), se relaciona con los colores que van desde el naranja intenso al rojo profundo.

2.3.3 Definición de los tratamientos de café cereza

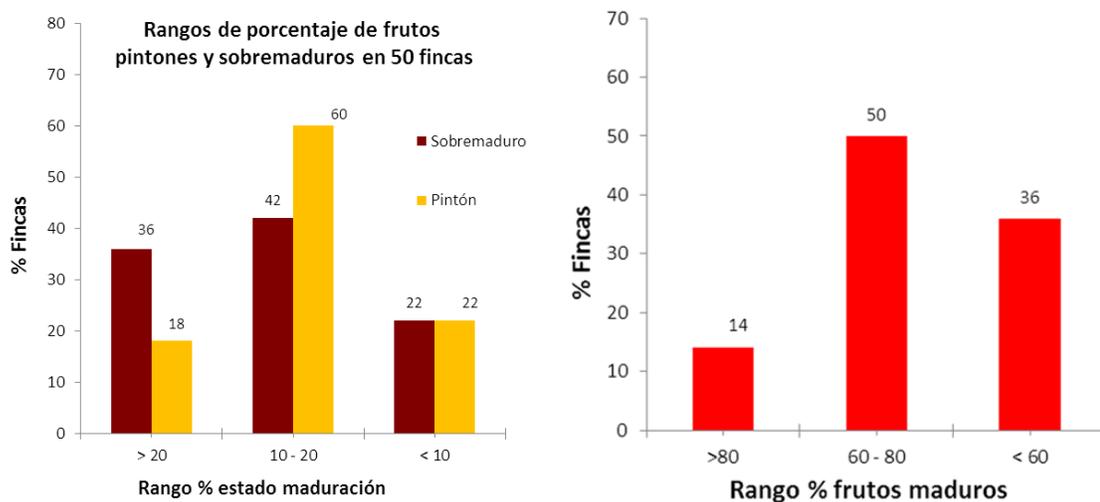
A partir de información de los muestreos de un pase de la cosecha principal en el año 2014, en 50 fincas cafeteras del departamento de Antioquia, que hicieron parte del

Proyecto AOCE, se realizaron análisis de los estados de maduración más comunes, para definir 2 de las 4 composiciones o mezclas que se plantearon para el desarrollo del presente trabajo.

En la Figura 16 se muestra la distribución de los estados de maduración más comunes, se observa que el 50% de fincas presentaron un intervalo de frutos maduros en el café cereza cosechado entre el 60 y el 80%, el 36% de fincas presentaron valores de frutos sobremaduros mayor al 20%, y el 60% de las fincas presentaron frutos pintones entre el 10 y 20%.

A partir de esta información y considerando lo recomendado por Puerta (2015) se definieron los tratamientos (composiciones o mezclas) M1, M2 y M3 de estados de maduración de café, indicadas en la tabla 9.

Figura 16. Distribución de los estados de maduración más comunes en porcentaje para 50 fincas cafeteras del departamento de Antioquia.



Fuente: Proyecto AOCE (2015).

Tabla 9. Tratamientos con diferentes estados de maduración de frutos de café.

Tipo de mezcla	Estados de maduración (%)			
	M	SM	P	V
M1	100	0	0	0
M2	80	13	7	0
M3	60	26	12	2
M4	Testigo	Testigo	Testigo	Testigo

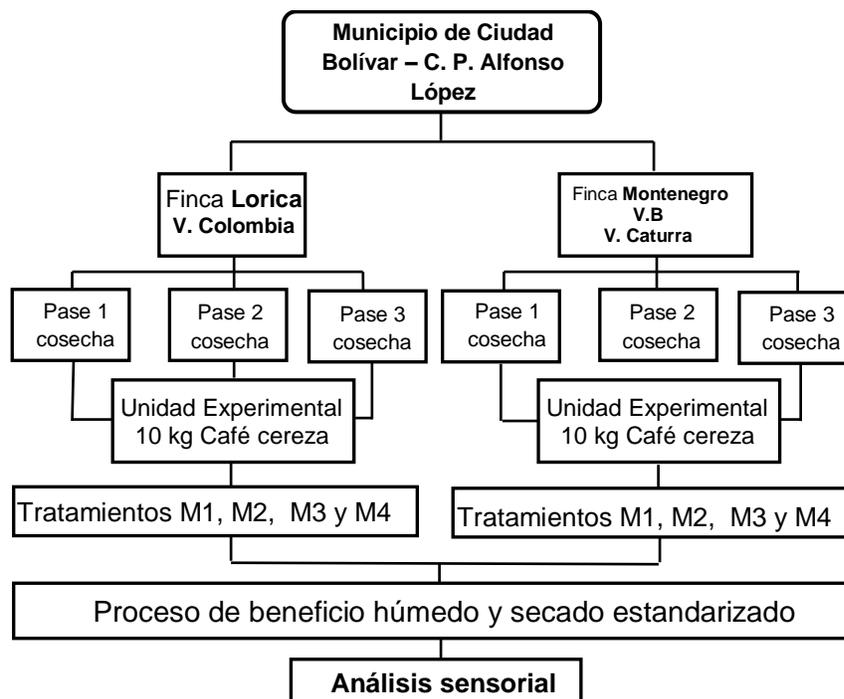
M4 es el tratamiento testigo que correspondió a la proporción de frutos por cada estado de maduración como llegaba el café cosechado a la tolva de recibo en la finca, para ello fueron tomadas 5 muestras de café de 500 g cada una, a las cuales se les realizó una clasificación por flotes y posteriormente fueron separadas en los diferentes estados de desarrollo del fruto.

Considerando que el 90% de las fincas presentó valores inferiores al 2% de frutos verdes en el café cosechado, el 4% con valores mayores al 5% y el restante 6% de las fincas con frutos verdes entre 2 y 5 %, para M3 se definió un valor de 2% de frutos inmaduros, que se ajusta al límite de 2,5% para que no presenten defectos (astringencia) en taza (Puerta, 2000).

2.3.4 Diseño del experimento

Se definieron bloques para cada uno de los 3 pases de cosecha en cada finca, donde se recolectaron mínimo 80 kg de café cereza para hacer la clasificación de los frutos por estados de maduración y configurar una unidad experimental de 10 kg de café cosechado, donde se aplicaron los tratamientos de las 4 mezclas, para obtener un total de 12 ensayos por finca (figura 17).

Figura 17. Diseño experimental para evaluar la composición de la masa cosechada de café y su calidad en taza.



2.3.5 Procedimiento de beneficio húmedo y secado de las muestras de café

Los cuatro tratamientos M1, M2 M3 y M4 se beneficiaron con un proceso que involucró clasificación manual de flotes, despulpado sin agua, clasificación de café en baba, fermentación controlada con el método fermaestro (Peñuela *et al.*, 2013), clasificación del café lavado y secado mecánico a una temperatura máxima de 40°C. Después de la obtención de las muestras, estas se codificaron y almacenaron entre 45 y 60 días para finalmente realizarles el análisis físico y sensorial (Protocolo manejo muestras CPS Proyecto AOCE, 2014).

En el proceso estandarizado de beneficio que se aprecia en la figura 18, se prepararon en forma manual los 10 kg de café cereza en cada tratamiento, se utilizó la despulpadora disponible en cada finca, se retiró la pulpa sin adicionar agua al proceso, se usó zaranda cilíndrica para la clasificación del café en baba (figura 19a); luego el grano se depositó en recipientes plásticos donde se ubicó el dispositivo fermaestro. Al inicio del proceso de

fermentación, se midió el pH en 3 puntos distribuidos sobre la superficie de la masa de café, y de la misma manera se midió la temperatura de la masa de café (figura 19b).

Cuando el fermaestro indicó el punto de lavado, se registró el tiempo total del proceso de fermentación del mucílago, y nuevamente se midió el pH y temperatura. Seguidamente se lavó el café con cuatro enjuagues en un recipiente plástico de mayor tamaño, realizando clasificación de granos defectuosos (flotes) con una vasija perforada, e inmediatamente la muestra de café fue llevada al secado mecánico a una temperatura máxima de 40°C en un equipo para muestras, con quemador indirecto de gas propano e intercambiador de calor (IC) como se muestra en la figura 20. La humedad final del café pergamino seco se determinó con el método Gravimet (Oliveros *et al.*, 2009) teniendo en cuenta su uso en capa delgada para este experimento.

Figura 18. Proceso estandarizado de beneficio para la obtención de café pergamino seco (CPS) en los tratamientos evaluados.

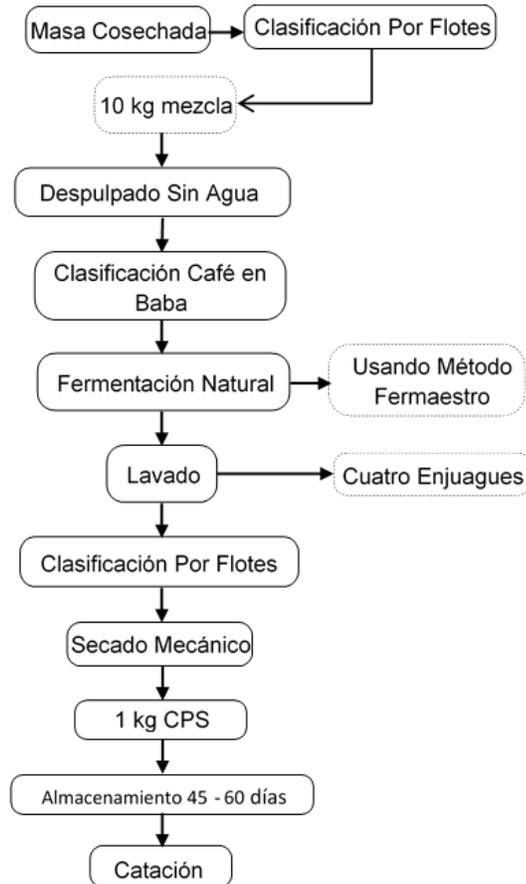


Figura 19. a. Despulpado y clasificación de café en baba en zaranda cilíndrica b. Fermentación en recipiente plástico con fermaestro, medición de pH y temperatura.



Figura 20. Secador mecánico de café para muestras, con gas propano como combustible utilizando IC.



2.3.6 Almacenamiento, análisis físico y sensorial

Siguiendo el Protocolo de Análisis sensorial en el Proyecto AOCE (2014), las 24 muestras de CPS se almacenaron con el fin de cumplir el proceso de estabilización para afirmar atributos, entre 45 y 60 días en la Estación Agraria Piedras Blancas de la Universidad Nacional localizada en la Vereda Piedras Blancas del Municipio de Medellín; en

condiciones de temperatura y humedad relativa entre 8 y 15 °C y de 65% a 70%, respectivamente, con ventilación adecuada, baja luminosidad y ubicadas sobre estantería de madera. Antes de llevar las muestras a almacenamiento se midió la humedad en base húmeda con el equipo Cofeepro Moisture Grain Plus®.

Luego de transcurrido el tiempo de almacenamiento se empacaron 500 g de CPS en bolsas Ziploc y se codificaron para la entrega al panel de catación robusto integrado por 5 catadores Q grader, los cuales fueron responsables de recibir las muestras, garantizar su correcto alistamiento, y hacer el análisis físico del grano y sensorial de la bebida.

Luego de la operación de trilla de cada muestra de CPS proveniente de los diferentes tratamientos aplicados, para el análisis físico se determinó nuevamente el contenido de humedad en base húmeda con el equipo Grain Moisture Tester PM - 410®, los defectos físicos, almendra sana y merma en trilla según las normas NTC 3314 y NTC 3633.

2.3.6.1 Preparación de la muestra y catación

Para la preparación de la muestra se tuvo en cuenta la Norma Técnica Colombiana (NTC) 3566.

- Tostado de la muestra. La tostión fue con un tueste claro a claro-medio, medido según lo referido por la SCAA (2014) en la escala del M-Basic (Gourmet) Agrtron que aproximadamente equivale entre 55 y 65. El tueste se completó entre 8 y 12 minutos; y el almacenamiento de las muestras tostadas previas a su evaluación, no excedió las 24 horas, siendo inferior a 8 horas previas a su evaluación.

Para la dosificación del café tostado, la proporción de agua/café utilizada fue el 5,5% de café sobre la capacidad de volumen de agua en mililitros de las tazas utilizadas, tomando como referencia el criterio utilizado por la SCAA (2014) de 8,25 g (+/- 0,25 g) de café para 150 ml de agua.

- Molienda. El tamaño de partícula molida fue el 70% a 75% de las partículas que pasan a través de un tamiz de malla de tamaño 20 (molienda media). Se alistaron 5 tazas de cada muestra para evaluar la uniformidad.

- Adición de agua caliente. Se utilizó agua limpia y sin olores, a una temperatura aproximadamente de 200° F (93°C) al momento de verterla sobre el café molido, asegurándose de mojar todos los granos. Los granos se dejaron en infusión durante un período de 3 a 5 minutos antes de la evaluación.

- Procedimiento de evaluación de la bebida. En la evaluación sensorial del café se valoraron los atributos de Fragancia/Aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, uniformidad, taza limpia, dulzor y puntaje del catador; los cuales fueron registrados en el formato del anexo A y posteriormente reportado por el panel de catación para cada uno de los evaluadores, todas las muestras valoradas en cada uno de los atributos fueron sumadas y el resultado se presentó en la escala de 0 a 100 puntos. Previo a la evaluación, las muestras fueron inspeccionadas visualmente para establecer el color del tostado. La secuencia de la calificación de cada atributo se basó en la percepción de los cambios del sabor causados por la disminución de la temperatura de la bebida cuando estaba en proceso de enfriamiento:

Paso No. 1. Fragancia / Aroma: 15 minutos después de molida la primera muestra y servida, se evaluó la fragancia en seco. Después de que el agua se vertió directamente sobre el café hasta el borde de la taza, se permitió la formación de la costra en la superficie, ésta se dejó intacta de 3 a 5 minutos. Rompiendo la costra removiendo tres veces, adhiriéndose a la parte trasera de la cuchara mientras se huele suavemente. La calificación de la fragancia/aroma se marcó en base a su evaluación en seco y luego de adicionar agua.

Paso No. 2. Sabor, sabor residual, acidez, cuerpo y balance: Cuando la muestra contó con una temperatura de 160° F (71° C), a unos 8-10 minutos de la infusión, se inició la evaluación aspirando la bebida en la boca. Debido a que los vapores retro nasales están en su intensidad máxima a estas temperaturas elevadas, el sabor y el sabor residual son evaluados en este punto. Cuando el café continuó enfriándose la acidez, el cuerpo y el balance se valoraron; el balance se determinó por el catador cuando el sabor, sabor residual, acidez y cuerpo se combinaron sinérgicamente.

Paso No. 3. Dulzor, uniformidad, y Limpieza: Cuando la bebida llegó a la temperatura ambiente (por debajo de 100 ° F) el dulzor, la uniformidad y la taza limpia fueron

evaluadas. Para estos atributos, el catador realizó un juicio sobre cada taza individual, la adjudicación de 2 puntos por cada taza por atributo (10 puntos de puntuación máxima). La evaluación de la infusión se detuvo cuando la muestra llega a 70° F (21° C) y la puntuación global fue determinada por el catador y dado a la muestra como "Puntaje del catador" basados en todos los atributos combinados.

2.3.7 Análisis de la información

Se calculó el promedio y el coeficiente de variación en cada una de las propiedades de color en el sistema CIEL*a*b*, concentración de azúcares (°brix) y fuerza de desprendimiento (N) en la elaboración de la escala de maduración de frutos de café para la variedad Caturra y Colombia, y a los valores ajustados de las propiedades de color de igual manera se aplicó estadística descriptiva. Se realizó análisis de varianza y la prueba de Duncan con un nivel de confianza del 95%, ejecutando comparaciones múltiples para las variables mencionadas, y a la variable dependiente calidad en taza junto a los atributos: aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, puntaje del catador; a las variables intermedias (covariables) pH, temperatura de la masa de café, y a los valores de porcentaje de defectos en grano y almendra sana.

2.3.7.1 Desarrollo del modelo matemático

Con el propósito de explicar el comportamiento de la variable de respuesta calidad en taza a partir de un conjunto de datos de las variables independientes, que permita estimar dicha variable, se utilizaron dos técnicas de modelamiento; una de regresión multivariada por mínimos cuadrados con un modelo polinomial de segundo orden que se muestra en la ecuación 2.7 y otra usando lógica difusa.

$$y = b_1 + b_2x_1 + b_3x_2 + b_4x_3 + b_5x_4 + b_6x_1x_2 + b_7x_1x_3 + b_8x_1x_4 + b_9x_2x_3 + b_{10}x_2x_4 + b_{11}x_3x_4 + b_{12}x_1^2 + b_{13}x_2^2 + b_{14}x_3^2 + b_{15}x_4^2 \quad (2.7)$$

Donde:

x_1 : Porcentaje de fruto Maduro (% M)

x_2 : Porcentaje de fruto Sobremaduro (% SM)

x_3 : Porcentaje de fruto Pintón (% P)

x_4 : Porcentaje de fruto Verde (% V)

y: Calidad en taza

Los valores de b_1 hasta b_{15} son los coeficientes que genera el modelo para estimar la variable de respuesta “calidad en taza”.

El modelo con lógica difusa fue implementado en el software MATLAB® v. 7.0 a través de su herramienta *Fuzzy Logic*, mediante la siguiente secuencia:

- a) El sistema de inferencia difusa se definió a partir de conjuntos difusos con funciones de pertenencia de tipo trapezoidal, debido a que no se tiene un valor experimental único de referencia, sobre la variación de la calidad en taza respecto a los diferentes porcentajes de maduración en la masa cosechada de café (ver ecuación 1.3, de la tabla 8).
- b) Se estableció la escala y el rango de medición de las variables de entrada (porcentaje de frutos M, SM, P y V) con lenguaje lingüístico en 5 niveles: Muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.
- c) Se definió la variable de salida “calidad en taza” con el lenguaje lingüístico en 5 niveles. En la defusificación de las salidas se utilizó el método de centro de área o centroide (ecuación 1.7).
- d) Establecimiento de las reglas heurísticas que integraron el sistema de inferencia. Se definieron un total de 625 reglas realizando todas las posibles combinaciones de los 5 niveles lingüísticos en las variables de entrada y de salida. Para la resolución de las reglas de inferencia se utilizó el método de implicación difusa del mínimo o mandani (ecuación 1.5).
- e) El error del modelo se verificó introduciendo valores de porcentajes de diferentes estados de maduración de las mezclas elaboradas y el tratamiento testigo, con el fin de analizar la aproximación del modelo a los valores obtenidos experimentalmente de calidad en taza.

- f) Se validó el modelo a partir de datos procedentes del proyecto AOCE de la cosecha principal en el año 2014 y cosecha de mitaca en el año 2015, en 13 fincas para variedad Caturra y 19 para variedad Colombia con caracterización de los estados de maduración y proceso de beneficio húmedo similar al desarrollado en el experimento.

Capítulo 3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de los estados de maduración de los frutos de café

En la tabla 10 y 11 se presentan para cada estado de maduración los valores promedios y coeficientes de variación de la fuerza de desprendimiento y concentración de azúcares de los frutos de variedad Caturra y Colombia.

Tabla 10. Fuerza de desprendimiento y °brix para diferentes estados de maduración de café variedad Caturra.

Estado Maduración	F (N)	CV (%)	SST (° Brix)	CV (%)
Maduro	10,17 a*	23,62	13,96 a	11,90
Sobremaduro	6,66 b	33,54	17,19 b	10,29
Pintón	13,23 c	20,97	11,63 c	13,87
Verde	15,06 d	19,83	--	--

*En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia estadística significativa según prueba de Duncan al 5%.

Tabla 11. Fuerza de desprendimiento y °brix para diferentes estados de maduración de café variedad Colombia.

Estado Maduración	F (N)	CV (%)	SST (° Brix)	CV (%)
Maduro	8,10 a*	44,48	13,90 a	17,41
Sobremaduro	6,04 b	50,98	16,54 b	13,96
Pintón	9,78 c	38,71	11,23 c	16,66
Verde	10,60c	33,49	--	--

*En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia estadística significativa según prueba de Duncan al 5%.

En la fuerza de desprendimiento se observan valores similares a los encontrados por Carvajal *et al.*, (2012) para variedad Colombia con diferencias estadísticas entre los cuatro estados de maduración en Caturra, mientras que los estados pintón y verde para

variedad Colombia no presentaron diferencia estadística. Para los sólidos solubles totales medidos en grados brix difieren los 3 estados de desarrollo evaluados para las dos variedades, confirmando lo encontrado por Marín *et al.*, (2003) al concluir que esta es una propiedad química importante para identificar estados de maduración en frutos de café.

Las coordenadas CIEL*a*b* mostraron diferencias estadísticas entre los cuatro estados de maduración para ambas variedades (tabla 12 y 13), como lo reportado por Carvajal *et al.*, (2011) con variedad Colombia. Se observó que los valores de L* son cercanos al estudio citado, mientras que las coordenadas cromáticas a* y b* del estudio difieren notablemente de las observadas para las dos variedades evaluadas, atribuido probablemente a que no se hizo un seguimiento riguroso de los frutos desde el momento de la floración hasta la madurez fisiológica. El mayor valor de ΔE calculado y estimado como el límite superior para cada estado de maduración, es coherente con el valor más alto de CV en la coordenada a* para el estado pintón en las dos variedades evaluadas.

Tabla 12. Coordenadas CIEL*a*b* para diferentes estados de maduración de café variedad Caturra.

Estado Maduración	L*	CV (%)	a*	CV (%)	b*	CV (%)	ΔE^1
Maduro	34,66 a*	8,07	29,84 a	14,20	14,74 a	25,57	6,84
Sobremaduro	28,16 b	5,35	19,04 b	21,20	6,53 b	27,82	5,11
Pintón	43,31 c	10,66	13,84 c	66,00	26,65 c	22,66	12,21
Verde	48,58 d	7,64	-12,78 d	-28,30	36,16 d	14,21	7,73

¹ Corresponde al valor del límite superior configurado en las tolerancias de evaluación en el software SpectraMagic NX del colorímetro con el que se realizó el ajuste en los operarios.

*En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia estadística significativa según prueba de Duncan al 5%.

Tabla 13. Coordenadas CIEL*a*b* para diferentes estados de maduración de café variedad Colombia.

Estado Maduración	L*	CV (%)	a*	CV (%)	b*	CV (%)	ΔE^1
Maduro	34,98 a*	9,45	27,68 a	16,07	14,51 a	28,34	7,96
Sobremaduro	28,30 b	6,62	21,19 b	25,27	7,27 b	31,03	6,94
Pintón	51,64 c	11,86	15,74 c	68,72	35,15 c	21,07	16,56
Verde	45,04 d	6,61	-14,16 d	-10,43	30,69 d	12,66	6,19

¹ Corresponde al valor calculado del límite superior configurado en las tolerancias de evaluación en el software SpectraMagic NX del colorímetro con el que se realizó el ajuste en los operarios.

*En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia estadística significativa según prueba de Duncan al 5%.

Con los registros fotográficos, los valores medios y los intervalos LSD de las propiedades evaluadas se construyó la escala de maduración que se muestra en las tablas 14 y 15, las cuales se usaron como guía para el proceso de clasificación de los frutos en los 4 estados de desarrollo para la posterior conformación de los tratamientos de café cereza.

Tabla 14. Escala de maduración para frutos de café Variedad Caturra.

Estado	Patrón de color del fruto en el modelo CIEL*a*b*	Fuerza de desprendimiento (N)	SST (° Brix)
 <p>Verde</p>	<p>L* = 48,58a^x a* = -12,78a b* = 36,16a ΔE* = 4,79</p>	<p>15,05d ± 2,98</p>	<p>-----</p>
 <p>Pintón</p>	<p>L* = 43,31b a* = 13,84b b* = 26,65b ΔE* = 7,89</p>	<p>13,23c ± 2,77</p>	<p>11,63c ± 1,61</p>
 <p>Maduro</p>	<p>L* = 34,66c a* = 29,84c b* = 14,74c ΔE* = 4,44</p>	<p>10,17a ± 2,40</p>	<p>13,96a ± 1,66</p>
 <p>Sobremaduro</p>	<p>L* = 28,16d a* = 19,04d b* = 6,53d ΔE* = 3,15</p>	<p>6,66b ± 2,23</p>	<p>17,19b ± 1,77</p>

^x Promedios con letra diferente presenta diferencia estadística significativa según prueba de Duncan al 5%.

Tabla 15. Escala de maduración para frutos de café Variedad Colombia.

Estado	Patrón de color del fruto en el modelo CIEL*a*b*	Fuerza de desprendimiento (N)	SST (° Brix)
 Verde	L* = 45,04a ^x a* = -14,16a b* = 30,69a ΔE* = 3,74	10,60c ± 3,55	-----
 Pintón	L* = 51,64b a* = 15,74b b* = 35,15b ΔE* = 11,09	9,78c ± 3,79	11,23a ± 1,87
 Maduro	L* = 34,98c a* = 27,68c b* = 14,51c ΔE* = 5,39	8,10a ± 3,60	13,90b ± 2,42
 Sobremaduro	L* = 28,30d a* = 21,19d b* = 7,27d ΔE* = 4,15	6,04b ± 3,08	16,54c ± 2,31

^x Promedios con letra diferente presenta diferencia estadística significativa según prueba de Duncan al 5%.

La fuerza de desprendimiento de los frutos fue una propiedad física que se evaluó con el fin de soportar resultados obtenidos en investigaciones similares en la elaboración de la escala de maduración, lo cual al demostrarse se consideró suficiente para no incluirla en la verificación de los tratamientos (mezclas de café cereza), además en la práctica la medición de la fuerza de desprendimiento, resultó ser dispendiosa y por ser registrada en

los frutos al momento de la cosecha esta variable no se podía luego asociar a los frutos utilizados en la conformación de los tratamientos.

3.2 Verificación del color y grados brix en los tratamientos de café cereza

En las tablas 16 y 17 se aprecian los valores ajustados de los patrones en las coordenadas CIEL*a*b* para las dos variedades de café, los cuales presentan cambios para el fruto pintón y verde debido a la alta variabilidad que muestra el CV para la coordenada a* con relación a los valores de las tablas 12 y 13.

Tabla 16. Valores ajustados de las coordenadas CIEL*a*b* en los patrones para diferentes estados de maduración de café variedad Caturra.

Estado Maduración	L*	a*	b*	IC*	ΔE^2
Maduro	34,15a ^x	26,65a	12,39a	68,21a	9,49
Sobremaduro	28,60b	16,11b	5,96b	98,35b	7,15
Pintón	47,68c	8,69c	29,74c	9,59c	19,20
Verde	48,42c	-11,84d	32,18d	-8,39d	12,95

² Corresponde al valor del límite superior configurado en las tolerancias de evaluación en el software SpectraMagic NX del colorímetro, ajustado con el que se realizó la verificación de los tratamientos.

^x En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia estadística significativa según prueba de Duncan al 5%.

Tabla 17. Valores ajustados de las coordenadas CIEL*a*b* en los patrones para diferentes estados de maduración de café variedad Colombia.

Estado Maduración	L*	a*	b*	IC*	ΔE^2
Maduro	33,22a ^x	28,05a	12,05a	78,83a	8,34
Sobremaduro	28,30b	21,19b	7,27b	104,63b	6,94
Pintón	51,64c	15,74c	35,15c	9,88c	16,56
Verde	50,84c	-15,82d	36,41c	-8,98d	10,30

² Corresponde al valor del límite superior configurado en las tolerancias de evaluación en el software SpectraMagic NX del colorímetro, ajustado con el que se realizó la verificación de los tratamientos.

^x En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia estadística significativa según prueba de Duncan al 5%.

También se observa en las propiedades de color para los estados de maduración estudiados, que los datos ajustados en el entrenamiento de los operarios mantienen diferencias estadísticas con tendencia similar a la escala de maduración, donde la

coordenada a^* es sobresaliente para la identificación del espacio de color que fluctúa entre rojo (+) y verde (-), seguido por b^* que se encuentra entre amarillo (+) y azul (-). Esto es notable al realizar la clasificación visual manual de los frutos por sus tonalidades de color.

En las tablas 16 y 17 también se aprecian los valores calculados de IC^* promedio para cada estado de maduración, los cuales mantienen la diferencia estadística marcada por las tonalidades de color y concuerdan con lo reportado por Vignoni *et al.*, (2006), en sus intervalos y tendencias de color desde los valores negativos para el verde, pasando de 2 a 20 para los colores que van desde el amarillo pálido al naranja intenso para frutos pintones, y >40 que corresponde al rojo intenso para el caso de maduros y sobremaduros.

El anterior análisis lo realizó Garay *et al.*, (2012) con los valores de las coordenadas del sistema CIEL $^*a^*b^*$ e IC^* para Piñón Blanco (*Jatropha curcas* L.). Para esta investigación el objetivo de determinar el estado óptimo del fruto para la recolección, como factor determinante de calidad de la materia prima que entra al proceso de beneficio húmedo, se considera importante para obtener un producto terminado dentro de las exigencias del mercado diferenciado del café.

La escala de maduración para cada variedad de café, se utilizó con los operarios como ayuda visual en la clasificación de los estados de maduración como se observa en la figura 21.

Figura 21. Clasificación de frutos utilizando la escala de maduración.



La verificación de los estados de maduración para la elaboración de los tratamientos con el colorímetro, se realizó aplicando las tolerancias de ΔE y los patrones en el sistema CIEL*a*b* en cada pase de cosecha (gráficas en el anexo B). Las tablas 18 y 19 resumen los aciertos de identificación del estado de maduración de acuerdo con las coordenadas de referencia de color en los frutos para los 4 estados de maduración en las variedades de café Caturra y Colombia en los 3 pases de cosecha respectivamente.

Tabla 18. Porcentaje de los frutos en diferentes estados de maduración aprobados en la verificación con el colorímetro para variedad Caturra.

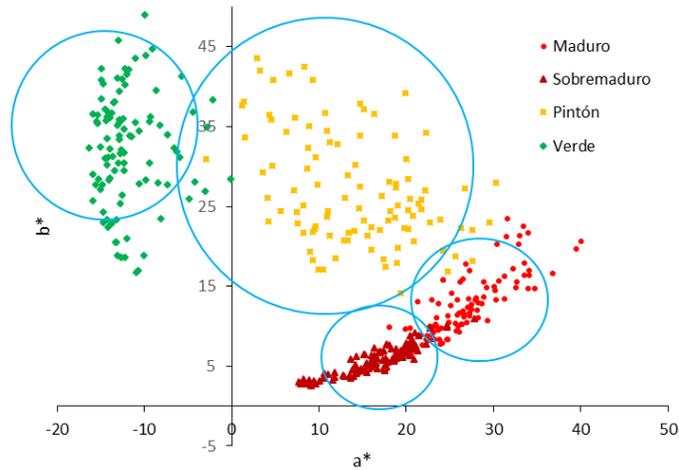
No. Pase cosecha	% M	% SM	% P	% V
P1	74,26	48,51	49,50	68,33
P2	72	87	90	67
P3	93	95	95	85
Promedio	59,80	76,80	78,20	73,40

Tabla 19. Porcentaje de los frutos en diferentes estados de maduración aprobados en la verificación con el colorímetro para variedad Colombia.

No. Pase cosecha	% M	% SM	% P	% V
P1	73	82	92	33
P2	67	24	80	58
P3	74	63	87	76
Promedio	71,30	56,30	86,30	55,70

En la figura 22 se presenta la distribución en las coordenadas del sistema CIEL*a*b* para la verificación de los estados de desarrollo. El tamaño de los círculos corresponde al valor del límite superior de ΔE configurado en las tolerancias de evaluación en el software SpectraMagic NX del colorímetro que se muestran en las tablas 16 y 17, respectivamente, para cada variedad. El círculo encierra los frutos verdes, maduros, sobremaduros y pintones indicando la concentración de aciertos, donde para el grupo de los pintones ΔE se amplió luego del ajuste con los operarios, debido a que el CV se incrementó del 66 al 105,12% en la coordenada a* (tonalidad roja), situación causada por la ambigüedad en la percepción de color por los operarios, en la transición del fruto entre el estado verde a maduro.

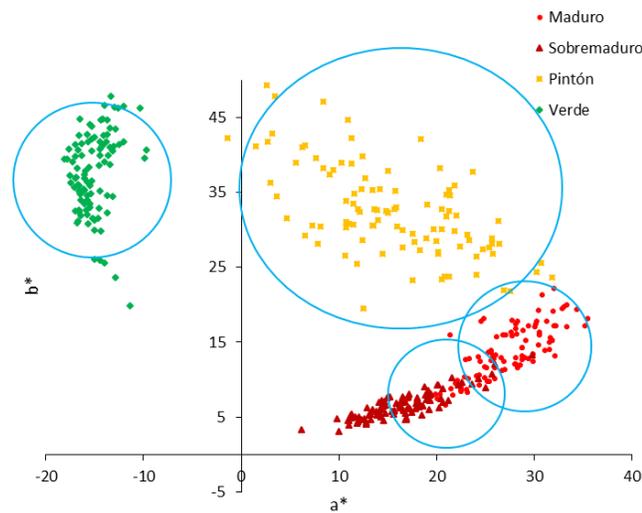
Figura 22. Verificación con el colorímetro de estados de desarrollo en frutos de café v. Caturra para la elaboración de los tratamientos en segundo pase de cosecha.



De igual manera para la variedad Colombia la verificación en el tercer pase de cosecha, muestra que ΔE presenta valores inferiores a los de Caturra (ver figura 23), conservando el comportamiento de alta variabilidad de los frutos pintones y mayor traslape de los círculos entre frutos maduros y sobremaduros con valores de a^* entre 23 y 23,5.

Para las dos variedades de café se pueden observar frutos que están por fuera del ΔE definido para su respectivo estado de maduración y se encuentran dentro del grupo contiguo, a excepción de los frutos verdes en variedad Colombia. Lo anterior evidencia que la práctica de selección en estos 3 estados de desarrollo generó confusión de los operarios posiblemente debido a variación de las condiciones de luz en el sitio donde se desarrolló la labor y fatiga.

Figura 23. Verificación con el colorímetro de estados de desarrollo en frutos de café v. Colombia para la elaboración de las mezclas en tercer pase de cosecha.



Con relación a la concentración de azúcares ($^{\circ}$ brix), se presentaron diferencias estadísticas en los 3 estados de desarrollo para las 2 variedades de café en los 3 pases de cosecha, como se observa en las figuras 24 y 25, con valores ligeramente superiores a los registrados en la escala de maduración de las tablas 14 y 15, a excepción de los frutos pintones en variedad Colombia donde el valor fue inferior. De acuerdo a lo anterior la concentración de azúcares es un criterio decisivo en la diferenciación de estados de desarrollo, como lo reporta Vidal (2014), para las variedades de café Catimor y Catuai a 1500 msnm. El autor encontró que la mejor taza contó con un rango ideal de 16 a 19 $^{\circ}$ brix. Los resultados obtenidos en la presente investigación, de 17,33 y 20,60 $^{\circ}$ brix para maduro y sobremaduro respectivamente en variedad Caturra ubicada a 2020 msnm, y 14,40 y 18,04 $^{\circ}$ brix para variedad Colombia ubicada a 1480 msnm, son cercanos a los reportados y podrían utilizarse como parámetro decisivo al momento de la recolección para obtener tazas de buena calidad.

Al realizar la actividad de verificación objetiva de color se encontró que las propiedades ópticas generan imprecisión al utilizar el ojo humano como herramienta para la selección de los frutos, mientras que la concentración de azúcares permite diferenciar de manera objetiva los frutos de café en diferentes estados de desarrollo.

Figura 24. Concentración de azúcares en frutos de café variedad Caturra con diferente estado de desarrollo.

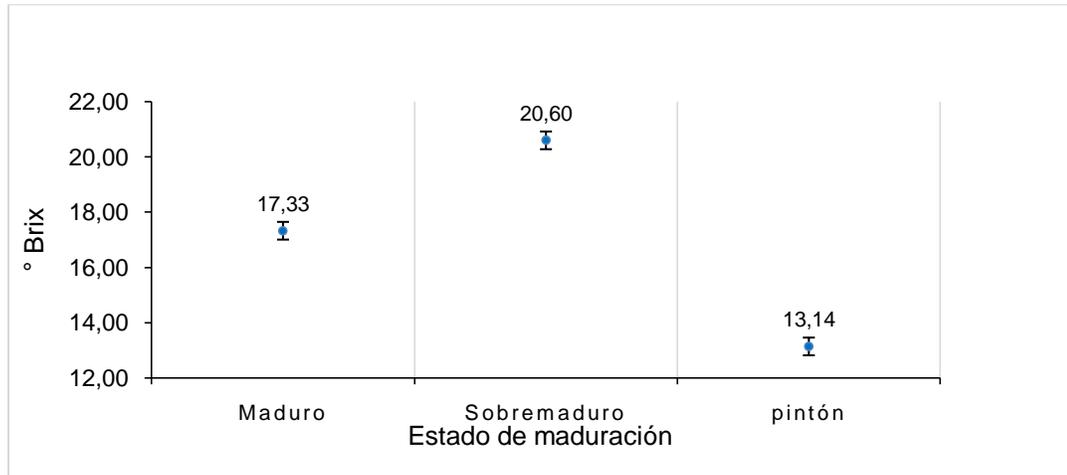
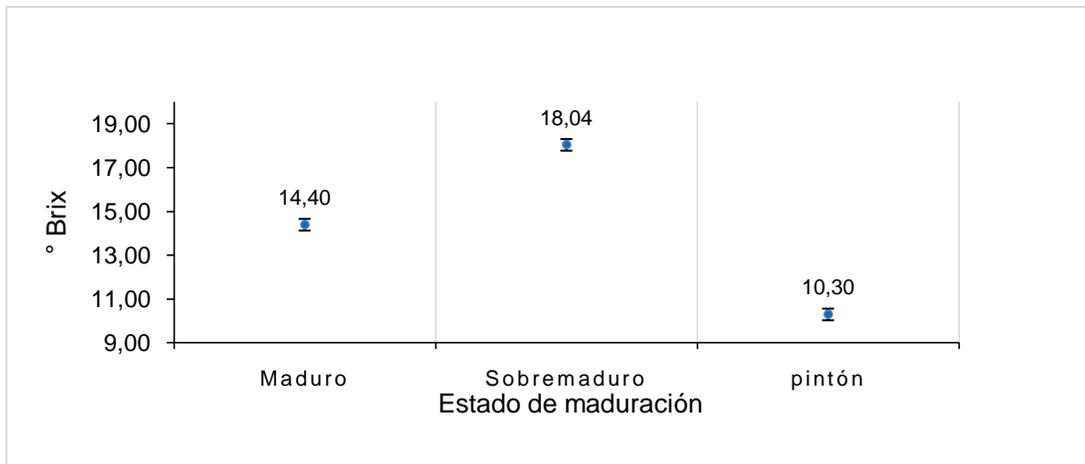


Figura 25. Concentración de azúcares en frutos de café variedad Colombia en diferentes estados de desarrollo.



3.3 Proceso de beneficio húmedo

En el Anexo C se presenta el registro fotográfico de cada una de las composiciones de la masa de café (tratamientos) en cada pase de cosecha. En la tabla 20 se observa la composición del tratamiento M4 en cada pase de cosecha, se presentaron valores altos de frutos sobremaduros para el caso de variedad Caturra; pintones y sobremaduros con valores similares (24,24 y 23,38%) en el primer pase de cosecha en variedad Colombia, mientras que en el tercer pase se presenta un valor alto de frutos pintones, y verdes que supera el límite definido por Puerta (2000) de 2,5%, para que no afecte la calidad en taza.

Tabla 20. Composición de la masa cosechada para el tratamiento testigo M4 en las 2 variedades evaluadas en cada pase de cosecha.

Variedad	Tipo de mezcla	Estados de maduración (%)			
		M	SM	P	V
Caturra	M4 _{P1}	51,92	36,83	10,08	1,17
	M4 _{P2}	48,03	39,19	12,30	0,49
	M4 _{P3}	30,87	54,09	13,68	1,36
Colombia*	M4 _{P1}	52,10	24,24	23,38	0,20
	M4 _{P3}	38,85	14,00	43,74	3,41

*Para esta variedad no se realizó muestreo de M4 en P2 debido a la poca disponibilidad de café cosechado.

En el proceso de beneficio húmedo estandarizado para variedad Caturra no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, en los valores de T₁, pH₁ y pH₂ correspondientes al pH en el momento del despulpado y punto de lavado respectivamente. En la temperatura de la masa de café en baba en el punto de lavado (T₂) se registraron valores medios desde 20,61°C en M1 hasta 22,07 °C en M4 (Tabla 21), encontrando diferencias significativas entre el tratamiento M1 respecto a los demás tratamientos, debido a que esta fue depositada en un recipiente que no drenó lixiviados. El tiempo de fermentación natural promedio para degradar el mucílago no presentó diferencias entre tratamientos 17,03 horas y el testigo M4 (19,08 h), El tiempo del proceso de secado mecánico intermitente tampoco presentó diferencias significativas entre tratamientos, presentando valores desde 30,45 h para M1 hasta 47,67 h en M4 como se aprecia en la tabla 21.

Tabla 21. Variables medidas en el proceso de beneficio húmedo de café variedad Caturra.

Mezcla	pH ₁	T ₁ (°C)	pH ₂	T ₂ (°C)	t. Ferm. (h)	t.Secado (h)
M1	5,68a*	24,61a	4,05a	20,61a	17,03a	30,45a
M2	5,64a	24,97a	3,99a	21,48b	17,03a	31,83a
M3	5,64a	24,52a	3,86a	21,67b	17,03a	33,42a
M4	5,39a	24,61a	3,89a	22,07b	19,08a	47,67a

* En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia estadística significativa según prueba de Duncan al 5%.

Para variedad Colombia se aprecia en la tabla 22 diferencia significativa en pH₁ y pH₂ para M4 con relación a los tratamientos M1 y M2, con el mayor y menor valor respectivamente, debido probablemente a la presencia de más frutos inmaduros (pintones y verdes, ver tabla 20). Para la variedad Colombia ni las temperaturas de la masa de café ni los tiempos de fermentación y secado fueron afectados por la composición de los frutos (tratamientos).

Tabla 22. Variables medidas en el proceso de beneficio húmedo de café variedad Colombia.

Mezcla	pH ₁	T ₁ (°C)	pH ₂	T ₂ (°C)	t. Ferm.(h)	t.Secado (h)
M1	5,52a*	23,10a	4,33a	20,88a	15,81a	40,66a
M2	5,60a	23,02a	4,31a	20,70a	15,89a	42,43a
M3	5,69a	22,78a	4,19ab	20,92a	16,44a	35,04a
M4	5,87b	22,90a	3,84b	21,09a	16,94a	52,97a

* En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia estadística significativa según prueba de Duncan al 5%.

3.4 Análisis de calidad física y sensorial

No se encontraron diferencias significativas para las variables de calidad física del grano y en taza para la variedad Caturra (ver tablas 23 y 24), sin embargo los valores de merma en trilla entre 19,83 y 20,31% están cercanos al promedio en comercialización de café pergamino seco para Colombia de 19,95% (Federacafé, 2010). Los defectos entre 9,63 y 12,33% se encuentran por debajo del máximo permitido del 18% (NTC 3633) y la almendra sana entre 74,76 y 76,13% se encuentran cercanos al valor de 75% utilizado como referencia para fijar el precio de un café de alta calidad a comercializarse en Colombia (Cooperativa de caficultores de Antioquia, 2015). Una mejor conversión de cereza a pergamino se obtiene al utilizar como materia prima frutos maduros de café cosechados en un proceso de beneficio húmedo con despulpadora y sistemas de clasificación de café en baba y lavado calibrados adecuadamente según lo recomendado por Roa *et al.*, (1999).

Tabla 23. Resultados de las principales variables del análisis físico para variedad Caturra.

Mezcla	Humedad (%)	Merma (%)	Defectos (%)	Almendra sana (%)
M1	9,87a	20,31a	12,33a*	74,76a
M2	10,13ab	20,13a	9,63a	76,01a
M3	10,43ab	20,08a	10,87a	75,57a
M4	10,57b	19,83a	10,10a	76,13a

* En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia significativa según prueba de Duncan al 5%.

En la tabla 24 se observa que la puntuación en taza y la puntuación de los atributos no mostraron efecto de los tratamientos y las calificaciones de la taza estuvieron entre 82,48 para el testigo y 83,65 en promedio para el tratamiento M3. Sin embargo es importante resaltar que la puntuación en taza se incrementó en la medida que se realizaban los muestreos por pase de cosecha con valores desde los 79,60 en el primer pase hasta los 86,10 puntos en el tercero en el caso de M4, mostrando la misma tendencia para los demás tratamientos como se observa en la tabla 27.

Tabla 24. Resultados de calidad en taza y atributos para los 3 pases de cosecha en variedad Caturra.

Mezcla	Taza	CV (%)	Aroma	Sabor	Acidez	Cuerpo	Balance	Puntaje Catador
M1	82,98a*	1,35	7,80a	7,73a	7,58a	7,40a	7,52a	7,57a
M2	82,95a	1,42	7,92a	7,68a	7,50a	7,42a	7,45a	7,52a
M3	83,65a	2,05	7,92a	7,72a	7,65a	7,58a	7,58a	7,63a
M4	82,48a	4,92	7,82a	7,68a	7,57a	7,58a	7,57a	7,57a

* En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia significativa según prueba de Duncan al 5%.

Los resultados anteriores muestran que un porcentaje considerable de frutos sobremaduros, como el usado en el tratamiento M3 verificado con el valor de IC* de 98,35 y 20,60 °brix, en promedio, podría potenciar la calidad en taza con el proceso de beneficio realizado en esta investigación para el café variedad Caturra.

La calidad física para variedad Colombia (tabla 25), presentó diferencias significativas en el porcentaje de almendra sana a favor del tratamiento que contenía solo frutos maduros M1 respecto a los tratamientos M2 y M4 con el mayor valor de 77,47%, e igual con M3 que presentó un valor mínimo en porcentaje de frutos verdes que de acuerdo con la

Puerta (2000), no causa defectos en taza. No se presentaron diferencias significativas en la variable merma ni en los defectos, y sus valores presentaron las mismas tendencias analizadas para variedad Caturra.

Tabla 25. Resultados de las principales variables del análisis físico para variedad Colombia.

Mezcla	Humedad (%)	Merma (%)	Defectos (%)	Almendra sana (%)
M1	10,50 a*	20,37 a	5,40 a	77,47a
M2	10,70 a	21,71 a	9,03 a	74,68c
M3	10,73 a	20,36 a	6,73 a	76,95ab
M4	10,10 a	20,47 a	10,10a	75,49bc

* En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia significativa según prueba de Duncan al 5%.

En análisis sensorial de variedad Colombia mostró diferencias significativas a favor de los tratamientos M1 y M3 con los valores mayores como lo muestra la tabla 26, lo que demuestra que para esta variedad una distribución de 60% de frutos maduros, 26% de sobremaduros, 12% de pintones y 2% de verdes y con el proceso de beneficio utilizado en el desarrollo del experimento, permitió obtener resultados similares al procesar solo frutos maduros del tratamiento M1.

Tabla 26. Resultados de calidad en taza y atributos para los 3 pases de cosecha en variedad Colombia.

Mezcla	Taza	CV (%)	Aroma	Sabor	Sabor Residual	Acidez	Cuerpo	Balance	Puntaje Catador
M1	82,07a*	1,31	7,83a	7,58a	7,27ab	7,43a	7,25ab	7,32ac	7,38ac
M2	80,35b	1,54	7,57b	7,22b	7,13ac	7,08b	7,12a	7,10b	7,13b
M3	82,02a	1,07	7,70ab	7,53ac	7,32b	7,38ac	7,30b	7,37a	7,42a
M4	81,05b	1,36	7,67ab	7,42c	7,10c	7,25c	7,17ab	7,22cb	7,23cb

* En una columna promedios con letra diferente presentan diferencia significativa según prueba de Duncan al 5%.

Una adecuada clasificación de los frutos por los operarios permitió analizar, que para los frutos sobremaduros con un porcentaje superior al 26% e inferior al 12% de pintones en la masa de café cereza cosechada, potenció la calidad en taza según la diferencia estadística presentada en variedad Colombia; por el contrario la presencia de un valor >20% de frutos pintones y <25% de sobremaduros, medidos en el tratamiento testigo para los 2 pases evaluados, y superior al 3% de verdes en el P3 (tabla 20), causó

sabores astringente y áspero en el análisis sensorial de la bebida, acorde a lo reportado por Binotto *et al.*, (2011) respecto a la presencia de ácidos clorogénicos en el estado pintón y verde que generan estos sabores desagradables, en consecuencia el panel de catación asignó puntuaciones bajas.

En los tratamientos M1 y M3 que presentaron la mejor calificación en taza, el panel le asignó en su mayoría en el atributo aroma los descriptores caramelo y fruta roja; para el sabor mencionó chocolate y dulce; para el sabor residual resaltó el dulce y para la acidez fue característico el descriptor cítrico. Mientras para los tratamientos M2 y M4 en el sabor residual describen astringente y seco la mayoría del panel, y con la misma tendencia el atributo cuerpo con la valoración de áspero. Este comportamiento podría relacionarse con las proporciones de frutos en los tratamientos con valores fijos (M1, M2 y M3), resaltando los valores altos de proporción de frutos pintones en el tratamiento testigo (M4).

Para ambas variedades Caturra y Colombia el análisis sensorial permitió clasificar el café como café especial – muy bueno (80 – 84,99) según la clasificación de la SCAA (2014) para todos los tratamientos, como se observa en las tablas 24 y 26. Los atributos uniformidad, taza limpia y dulzor presentaron la mayor calificación (10) en todos los tratamientos para las dos variedades de café estudiadas; correspondiente a una calificación cercana a la encontrada por Puerta (2010) realizando beneficio húmedo en masa cosechada de frutos maduros y sin clasificar, donde calificó tazas de buena calidad al describir acidez característica, equilibrada y estimada de la bebida, así como la impresión global con la mejor calificación.

A partir de los resultados obtenidos experimentalmente para las dos variedades evaluadas, no se verifica que la calidad de la bebida este altamente correlacionada con una masa cosechada compuesta por 60% de frutos maduros 26% sobremaduros, 12% pintones y 2% de verdes para obtener tazas clasificadas como café especial. Lo anterior soportado en el análisis de varianza (ANOVA) para la variable calidad en taza para variedad Caturra indicó un $P=0,6012$ ($P>0,005$) aceptando la hipótesis nula (H_0); mientras que para variedad Colombia el ANOVA indicó un $P=0,0001$ ($P<0,005$) donde se rechaza H_0 , sin embargo la prueba de comparación de medias LSD, solo indicó diferencias de M3 con M2 y con M4, y no indicó diferencias respecto a M1 (tratamiento con 100% de frutos maduros), adicionalmente el valor promedio de taza estuvo alrededor

82,4 puntos, el cual es inferior al parámetro comercial de referencia de 85 para ser valorado como café especial.

3.5 Resultados del modelo matemático

Con los valores de calidad en taza que se observan en las tablas 27 y 28 se realizó el modelo de regresión múltiple no lineal por mínimos cuadrados utilizando el software MATLAB® v. 7.0, obteniendo el modelo representado en la ecuación 3.1 para variedad Caturra, con un coeficiente de determinación R^2 de 0,687 y R^2 ajustado de 0,508 el cual es relativamente bajo para estimar con precisión la variable de respuesta.

$$Taza = 82,9980 + 0,5132 * SM - 0,9642 * P - 25,2310 * V + 12,3373 * V^2 \quad (3.1)$$

Donde los valores de P menores a 0,05 ($P < 0,05$) que explican la variable dependiente fueron:

SM: 0,0090

P: 0,0193

V: 0,0074

V^2 : 0,0066

Luego de un análisis de varianza del modelo con un valor de $P=0,0585$ ($P > 0,05$) el cual no es significativo, adicionalmente el valor de P ($P > 0,05$) de falta de ajuste (lack of fit) es 0,9264 lo cual muestra que el modelo no presenta falta de ajuste, sin embargo como este comportamiento no es significativo, su uso no es recomendado para realizar la estimación de la calidad en taza.

En variedad Colombia el mejor ajuste se obtuvo para una regresión lineal representada por la ecuación 3.2 con un R^2 de 0,423, y R^2 ajustado de 0,295 que de igual manera no explica de manera confiable la interacción de las variables independientes respecto a la calidad en taza (Taza).

Para este caso el análisis de varianza del modelo con un valor de $P=0,0840$ ($P > 0,05$) el cual no es significativo, y el valor de P ($P > 0,05$) de falta de ajuste (lack of fit) fue de

0,1922 lo cual muestra que el modelo no presenta falta de ajuste, con un comportamiento similar a lo encontrado en variedad Caturra.

$$Taza = 81,4721 + 0,0718 * P + 0,7859 * V \quad (3.2)$$

Donde los valores de P menores a 0,05 ($P < 0,05$) que explican la variable dependiente, fueron:

P: 0,0357

V: 0,0376

Tabla 27. Resultados de calidad en taza para variedad Caturra utilizados para el desarrollo del modelo matemático.

No. Pase cosecha	Mezcla	M (%)	SM (%)	P (%)	V (%)	Taza
P1	M1	100,00	0,00	0,00	0,00	82,05
P1	M2	80,00	13,00	7,00	0,00	82,65
P1	M3	60,00	26,00	12,00	2,00	82,05
P1	M4	51,92	36,83	10,08	1,17	79,60
P2	M1	100,00	0,00	0,00	0,00	82,75
P2	M2	80,00	13,00	7,00	0,00	82,30
P2	M3	60,00	26,00	12,00	2,00	83,15
P2	M4	48,03	39,19	12,30	0,49	81,75
P3	M1	100,00	0,00	0,00	0,00	84,15
P3	M2	80,00	13,00	7,00	0,00	83,90
P3	M3	60,00	26,00	12,00	2,00	85,75
P3	M4	30,87	54,09	13,68	1,36	86,10

Tabla 28. Resultados de calidad en taza para variedad Colombia utilizados para el desarrollo del modelo matemático.

No. Pase cosecha	Mezcla	M (%)	SM (%)	P (%)	V (%)	Taza
P1	M1	100,00	0,00	0,00	0,00	82,85
P1	M2	80,00	13,00	7,00	0,00	79,50
P1	M3	60,00	26,00	12,00	2,00	81,15
P1	M4	52,10	24,24	23,38	0,20	80,85
P2	M1	100,00	0,00	0,00	0,00	81,70
P2	M2	80,00	13,00	7,00	0,00	80,50
P2	M3	60,00	26,00	12,00	2,00	82,35
P3	M4	38,85	14,00	43,74	3,41	81,75
P3	M1	100,00	0,00	0,00	0,00	81,65

P3	M2	80,00	13,00	7,00	0,00	81,05
P3	M3	60,00	26,00	12,00	2,00	82,55
P3	M4	38,85	14,00	43,74	3,41	80,55

3.5.1 Resultados del modelamiento con lógica difusa

A partir de la información presentada en las tablas 27 y 28 se desarrolló el modelo con las variables de entrada porcentaje de fruto “Maduro”, “Sobremaduro”, “Pintón” y “Verde” y de salida “Taza”, esta última correspondiente a la puntuación de la calidad sensorial de la bebida, con 5 niveles lingüísticos que se observan en la tabla 29 y con las funciones de pertenencia tipo trapezoidal que se aprecian en las figuras 26, 27, 28, 29 y 30.

Tabla 29. Valores para los niveles lingüísticos en cada función de pertenencia trapezoidal.

Variedad	Lenguaje Lingüístico (5 niveles)	Variable de entrada (%) (Rango)				V. Salida Taza (78 - 88)
		M (0 -100)	SM (0 - 60)	P (0 - 15)	V (0 - 3)	
Caturra	Muy Bajo	[0 0 20 30]	[0 0 7,5 12,5]	[0 0 1,5 3]	[0 0 0,25 0,5]	[78 78 79 80]
	Bajo	[20 30 45 55]	[7,5 12,5 20 25]	[1,5 3 4 5,5]	[0,25 0,5 0,75 1]	[79 80 82 83]
	Medio	[45 55 65 75]	[20 25 32,5 37,5]	[4 5,5 7 8,5]	[0,75 1 1,38 1,75]	[82 83 84 85]
	Alto	[65 75 85 90]	[32,5 37,5 45 50]	[7 8,5 10,5 12]	[1,38 1,75 2 2,5]	[84 85 86,4 87]
	Muy Alto	[80 90 100 100]	[45 50 60 60]	[10,5 12 15 15]	[2 2,5 3 3]	[86,4 87 88 88]
Colombia	L.L (5 niveles)	M (0 -100)	SM (0 - 40)	P (0 - 50)	V (0 - 4)	Taza (78 - 84)
	Muy Bajo	[0 0 20 30]	[0 0 5 7]	[0 0 5 7,5]	[0 0 0,5 0,75]	[78 78 78,5 79]
	Bajo	[20 30 45 55]	[5 7 12 15]	[5 7,5 12,5 15]	[0,5 0,75 1,25 1,5]	[78,5 79 80 80,5]
	Medio	[45 55 65 75]	[12 15 20 22]	[12,5 15 22,5 25]	[1,25 1,5 1,75 2]	[80 80,5 81,5 82]
	Alto	[65 75 85 90]	[20 22 30 33]	[22,5 25 35 50]	[1,75 2 2,5 3]	[81,5 82 83 83,5]
Muy Alto	[80 90 100 100]	[30 33 40 40]	[35 50 50 50]	[2,5 3 4 4]	[83 83,5 84 84]	

Los valores para cada conjunto para las 4 variables de entrada se definieron a partir de la información experimental en las dos variedades de café y la experiencia propia de los investigadores. En el caso del porcentaje de frutos maduros se partió de un intervalo de 0 hasta 100%, como lo muestra la figura 26, debido a que fueron los valores extremo mínimo y máximo entre todos los tratamientos. De la misma forma se desarrollaron las demás variables de entrada en las dos variedades con los valores en cada pase de cosecha.

Figura 26. Funciones de pertenencia para la variable de entrada porcentaje de fruto "Maduro".

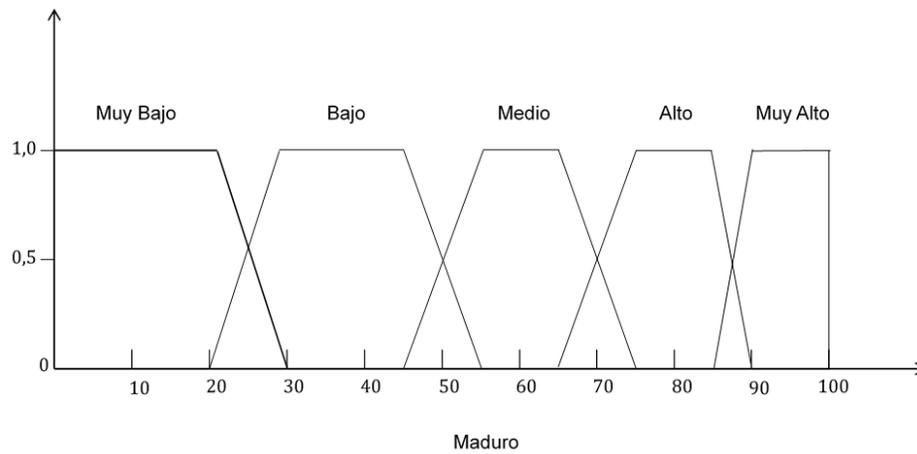
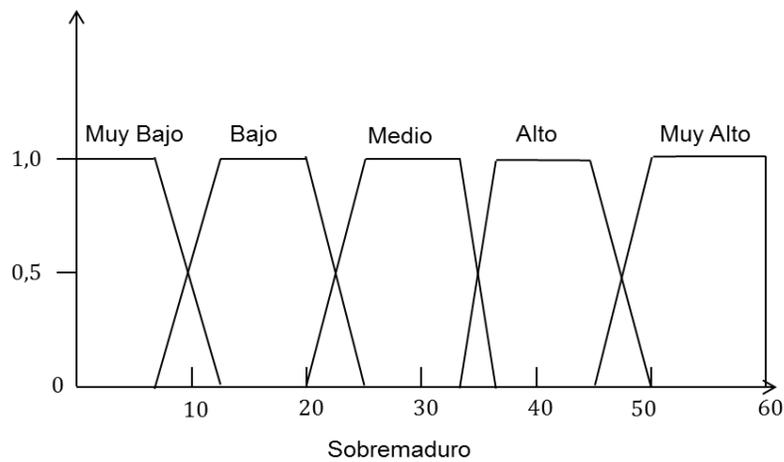


Figura 27. Funciones de pertenencia para la variable de entrada porcentaje de fruto "Sobremaduro".



El tratamiento testigo M4 fue decisivo en la estructuración de las funciones de pertenencia para los estados "Sobremaduro", "Pintón" y "Verde" en las dos variedades. Para la variedad Caturra se observa en las figuras 27, 28 y 29 las funciones de las variables mencionadas. Para la variedad Colombia el rango de frutos maduros paso de 0 - 60% a 0 - 40%; el de frutos pintones se incrementó de 0 - 15% a 0 - 50%; y en los frutos verdes también se modificó de 0 - 3% a un rango entre 0 - 4%.

Figura 28. Funciones de pertenencia para la variables de entrada de porcentaje de fruto "Pintón".

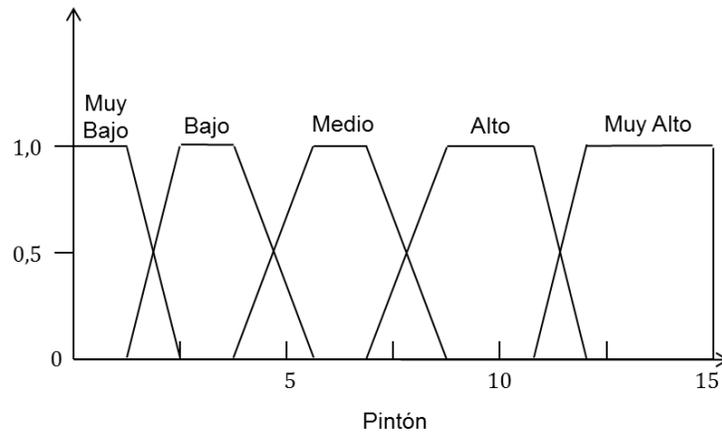
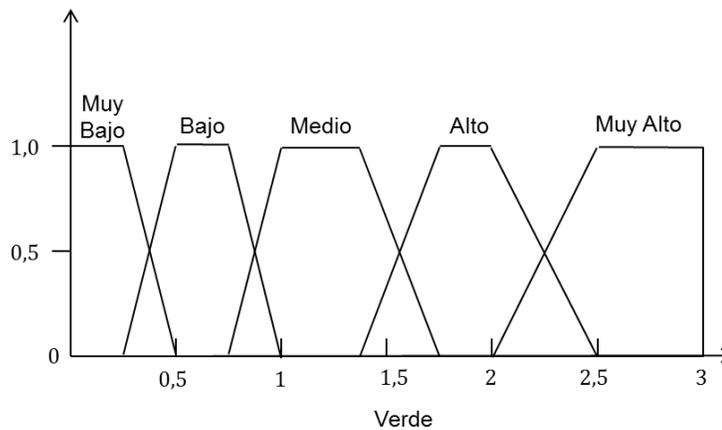
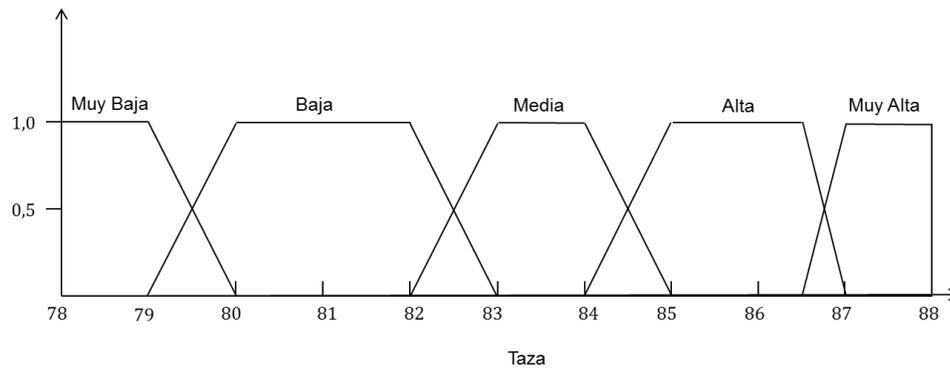


Figura 29. Funciones de pertenencia para la variable de entrada porcentaje de fruto "Verde".



La figura 30 muestra las funciones de pertenencia de la variable de respuesta "Taza" con un rango de 78 a 88 puntos para variedad Caturra, los cuales se proyectaron conforme a los niveles lingüísticos definidos, y a los resultados de calidad en taza obtenidos experimentalmente. Para variedad Colombia al presentar datos experimentales más bajos, el puntaje de taza se disminuyó al rango de 78 – 84 puntos; con los cuales se formularon las funciones de pertenencia que fueron presentadas en la tabla 29.

Figura 30. Funciones de pertenencia para la variable de salida calidad en taza "Taza".



En las figuras 31 y 32 se presentan las superficies de respuesta del modelo con lógica difusa para la variable calidad en taza en las interacciones de frutos maduros y verdes, y maduros y pintones. Se aprecia que para valores superiores al 40% de frutos maduros y valores de fruto verde inferiores al 1%, la calidad en taza supera 84 puntos, y para mantener este puntaje los frutos pintones deben estar por debajo del 5% con intervalos similares en frutos maduros para variedad Caturra.

Figura 31. Superficie de respuesta en la interacción de frutos maduros y verdes en variedad Caturra.

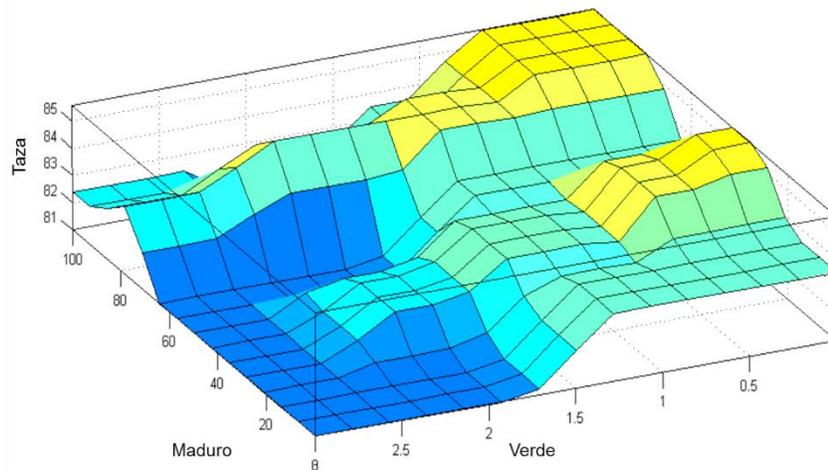
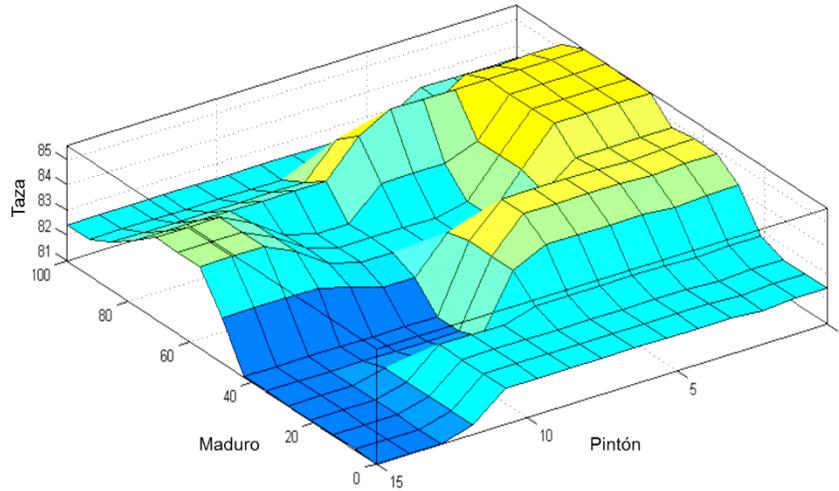


Figura 32. Superficie de respuesta en la interacción de frutos maduros y pintones en variedad Caturra.



Un comportamiento análogo se observó en el modelo para variedad Colombia, teniendo en cuenta que el valor de los frutos pintones y verdes se incrementó en el rango de estimación, así como la reducción en los frutos sobremaduros. Para las dos variedades el incremento de los frutos verdes por encima del 2,5% y en frutos pintones superior al 15% afecta la calidad de la bebida, según las superficies de respuesta del modelo.

En las tablas 30 y 31 se observan los resultados de calidad en taza obtenidos experimentalmente y los simulados con el modelo de lógica difusa.

Tabla 30. Valores estimados obtenidos en el modelo con lógica difusa en variedad Caturra.

No. Pase cosecha	Mezcla	Taza Experimental	Taza Modelo	Error (%)
P1	M1	82,05	83,5	1,77
P2	M1	82,75	83,5	0,91
P3	M1	84,15	83,5	0,77
P1	M2	82,65	83,5	1,03
P2	M2	82,30	83,5	1,46
P3	M2	83,90	83,5	0,48
P1	M3	82,05	85,6	4,33
P2	M3	83,15	85,6	2,95
P3	M3	85,75	85,6	0,17
P1	M4	79,60	81,3	2,14
P2	M4	81,75	81,6	0,18

P3	M4	86,10	85,6	0,58
----	----	-------	------	------

Tabla 31. Valores estimados obtenidos en el modelo con lógica difusa en variedad Colombia.

No. Pase cosecha	Mezcla	Taza Experimental	Taza Modelo	Error (%)
P1	M1	82,85	82,5	0,42
P2	M1	81,70	82,5	0,98
P3	M1	81,65	82,5	1,04
P1	M2	79,50	81,4	2,39
P2	M2	80,50	81,4	1,12
P3	M2	81,05	81,4	0,43
P1	M3	81,15	81,0	0,18
P2	M3	82,35	81,0	1,64
P3	M3	82,55	81,0	1,88
P1	M4	80,85	81,0	0,19
P2	M4	81,75	82,0	0,31
P3	M4	80,55	82,0	1,80

En la figura 33 se aprecia que los valores estimados promedio de calidad en taza son superiores a todos los datos experimentales obtenidos en los 3 pases de cosecha para variedad Caturra. El comportamiento del error en cada pase de cosecha para los tratamientos se muestra en la figura 34 construida con los datos de la tabla 30. Se aprecia un valor máximo de error del 4,33% en el tratamiento M3 del primer pase de cosecha, y un mínimo del 0,17% en el mismo tratamiento para el P3, donde el valor promedio de error fue del 1,40% y un R^2 de 0,946. El error promedio obtenido fluctúa en un límite superior de 2,07% e inferior de 0,72%, el cual puede considerarse como un error bajo y confiable para la estimación de la variable.

Figura 33. Comportamiento de los valores promedio estimados para los tratamientos de mezclas de frutos de café variedad Caturra, respecto a los datos experimentales.

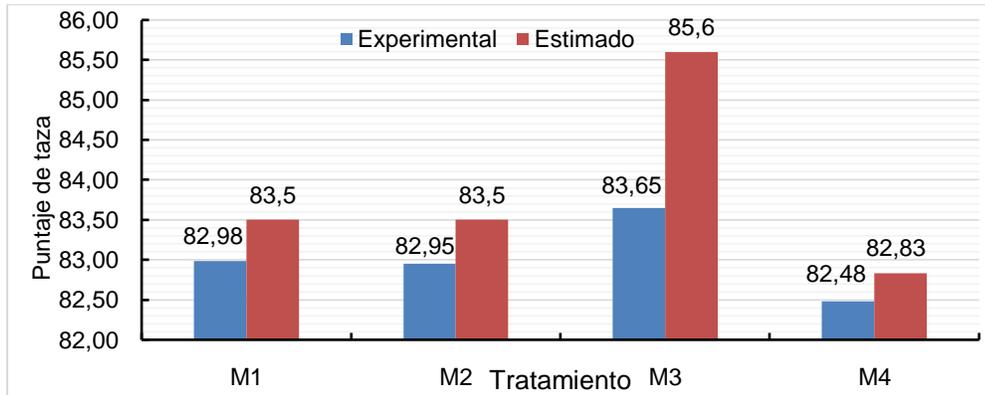
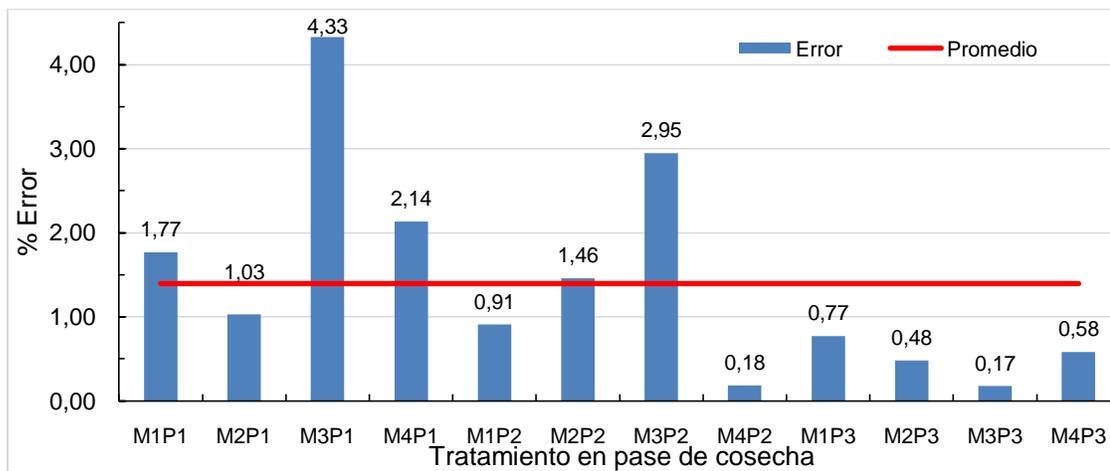


Figura 34. Comportamiento del error de los valores estimados respecto a los experimentales de calidad en taza para variedad Caturra.



En la tabla 31 se observan los valores estimados de taza para variedad Colombia, donde el error promedio fue de 1,03% y R^2 de 0,852 que se aprecia en la figura 36, el cual fluctúa entre el límite superior de 1,44%, e inferior de 0,62%. Errores considerados como bajos que brindan confiabilidad en la estimación de la variable de respuesta.

Se observa en la figura 35 que la mayor diferencia entre el valor estimado respecto al promedio en los tratamientos fue inferior a 1,05 y se presentó en el tratamiento, donde el valor máximo del error el primer pase de cosecha con el 2,39%, y el mínimo fue de

0,18% en el tratamiento M3 en el primer pase de cosecha (P1), tal como se aprecia en la figura 36.

Figura 35. Comportamiento de los valores promedio estimados para los tratamientos de mezclas de frutos de café variedad Colombia, respecto a los datos experimentales.

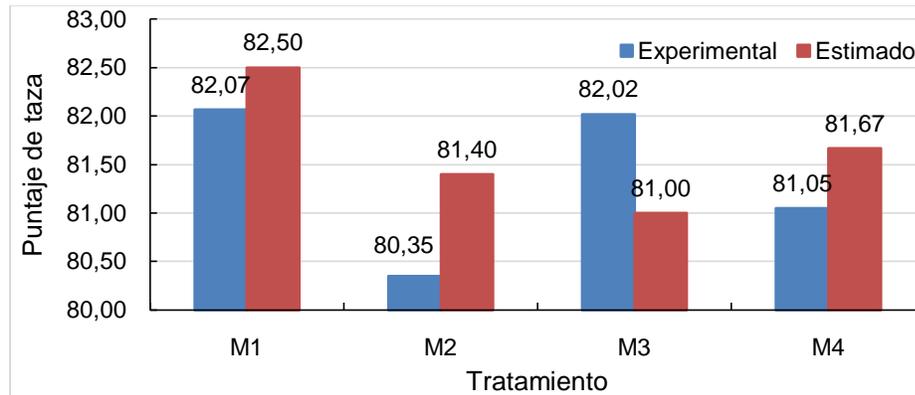
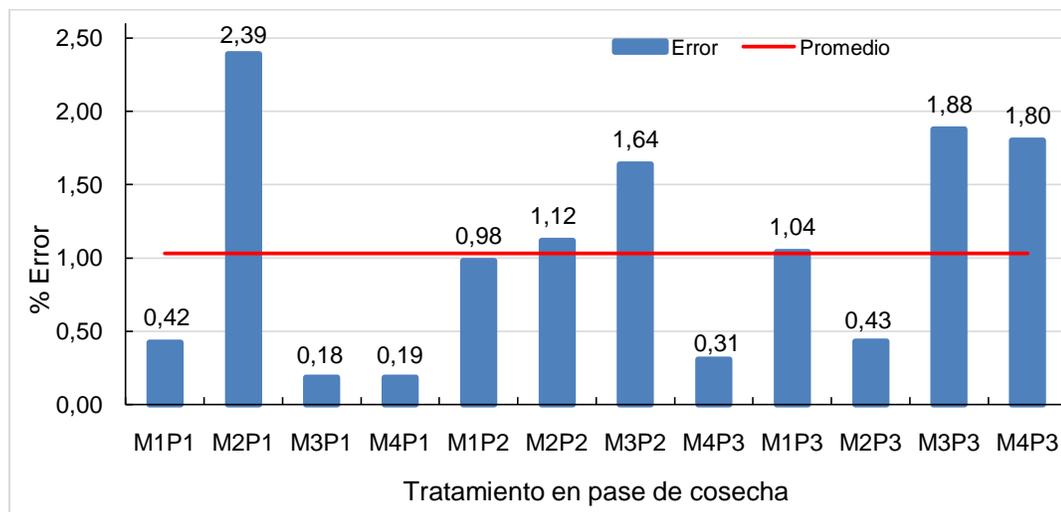


Figura 36. Comportamiento del error de los valores estimados respecto a los experimentales de calidad en taza para variedad Colombia.



Los modelos fueron validados a partir de datos procedentes del proyecto AOCE de la cosecha principal en el año 2014 y cosecha de mitaca en el año 2015, obtenidos en diferentes núcleos cafeteros, como se observa en la tabla 32 y en las figuras 38 y 39 para variedad Caturra; y en la tabla 33 y las figuras 40 y 41 para variedad Colombia.

Tabla 32. Resumen de información obtenida en muestreos en el Proyecto AOCE para validar el modelo construido para café variedad Caturra.

Núcleo	Finca	M (%)	SM (%)	P (%)	V (%)	Taza Experimental	Taza Modelo	Error (%)
Cosecha principal 2014								
Ciudad Bolívar	Vuelta bonita	64,57	22,83	12,59	0,02	82,70	85,60	3,51
Amalfi	La Pastorona	81,33	7,38	10,86	0,00	82,85	85,60	3,32
Urrao	La Falda	81,51	18,49	0,00	0,00	85,25	85,60	0,41
Giraldo	El Chuscal	89,08	3,22	7,70	0,00	83,10	84,00	1,08
La Ceja-El Retiro	La Argentina	82,90	8,51	8,33	0,00	84,80	85,10	0,35
Giraldo	Los duraznos	38,57	55,67	1,95	0,37	84,50	85,50	1,18
Urrao	La Esperanza	80,44	13,15	5,35	0,00	84,70	83,70	1,18
Cosecha mitaca 2015								
Ciudad Bolívar	Vuelta bonita	94,15	5,35	0,50	0,00	82,90	83,50	0,72
Amalfi	La Pastorona	55,88	32,25	11,87	0,00	82,95	85,40	2,95
Urrao	La Falda	77,54	21,70	0,77	0,00	85,50	85,60	0,12
Giraldo	El Chuscal	63,95	31,04	4,89	0,00	85,55	84,40	1,34
Giraldo	Los duraznos	54,26	29,47	16,27	0,00	83,00	85,40	2,89
Urrao	La Esperanza	94,85	3,48	1,67	0,00	84,30	83,50	0,95

En la última columna de la tabla 32 se obtiene el error en la estimación de la calidad en taza. La figura 37 permite inferir que los valores obtenidos con el modelo para variedad Caturra, en 10 de las 13 fincas se encuentran por encima de los datos experimentales, y la figura 38 muestra que el error tuvo valores máximos y mínimos de 3,51% y 0,12%, respectivamente; y en promedio fue de 1,54% con un límite superior de 2,19% e inferior de 0,89%. Valores considerados como bajos teniendo en cuenta las diferentes condiciones climáticas, edáficas y de ubicación en altitud que presentaron las fincas empleadas para la validación.

Tabla 33. Resumen de información obtenida en muestreos en el Proyecto AOCE para validar el modelo construido para café variedad Colombia.

Núcleo	Finca	M (%)	SM (%)	P (%)	V (%)	Taza Experimental	Taza Modelo	Error (%)
Cosecha 2014								
Ciudad Bolívar	El Porvenir	76,30	21,00	4,52	0,00	83,95	82,50	1,73
Amalfi	Los Alpes	50,16	27,88	21,66	0,00	83,75	81,00	3,28
La Ceja-El Retiro	El Diamante	89,58	9,92	0,50	0,00	82,95	81,10	2,23
Amalfi	La Frijolera	61,38	30,90	7,24	0,00	81,8	82,50	0,86
La Ceja-El Retiro	La Mansión	89,27	7,15	3,35	0,00	83,6	81,20	2,87
Amalfi	Guayacanes	59,41	28,87	11,47	0,00	82,35	82,50	0,18

Amalfi	La Bamba	54,90	38,57	6,54	0,00	85,5	82,50	3,51
La Ceja-El Retiro	Buenos Aires	97,95	1,70	0,34	0,01	84,05	82,50	1,84
Amalfi	La Brisalda	75,35	15,45	9,10	0,00	84,2	81,00	3,80
Urrao	El Cadillal	87,17	8,78	4,06	0,00	82,6	81,80	0,97
Giraldo	La sunga	88,22	8,73	3,05	0,00	81,85	81,50	0,43
Mitaca 2015								
Amalfi	La Bamba	56,69	40,66	2,65	0,00	82,30	82,50	0,24
Amalfi	Guayacanes	67,16	25,14	7,70	0,00	80,25	82,50	2,80
Amalfi	La Frijolera	83,00	7,47	9,53	0,00	83,05	81,00	2,47
Giraldo	La Sunga	48,57	34,28	16,88	0,00	79,90	82,50	3,25
Ciudad Bolívar	El Porvenir	56,65	38,85	4,42	0,08	82,15	82,50	0,43
La Ceja-El Retiro	La Mansión	82,96	10,95	6,09	0,00	84,45	81,80	3,14
La Ceja-El Retiro	Buenos Aires	77,28	21,54	1,14	0,00	85,85	82,50	3,90
La Ceja-El Retiro	Filo Bonito	69,10	30,90	0,00	0,00	81,65	82,50	1,04

Figura 37. Comportamiento de la validación del modelo a partir de información en 13 fincas con variedad Caturra.

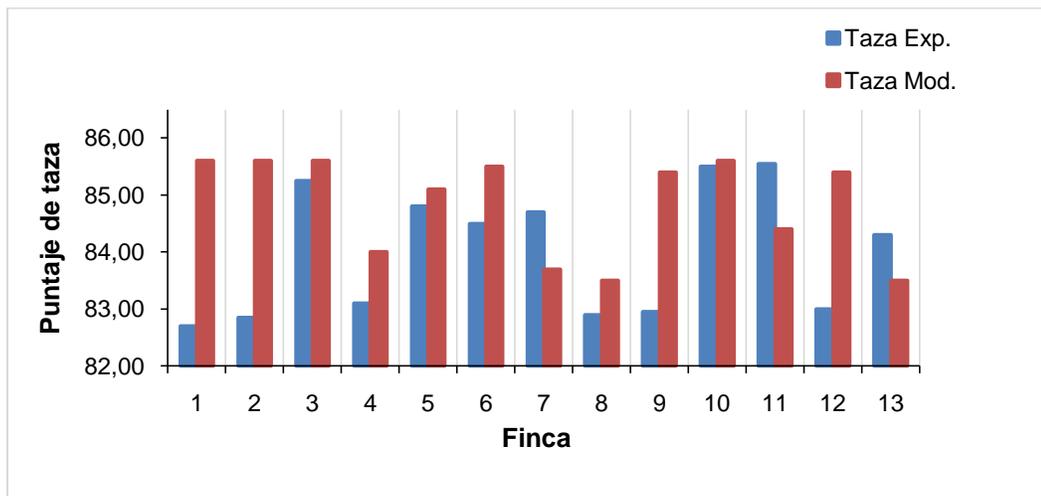
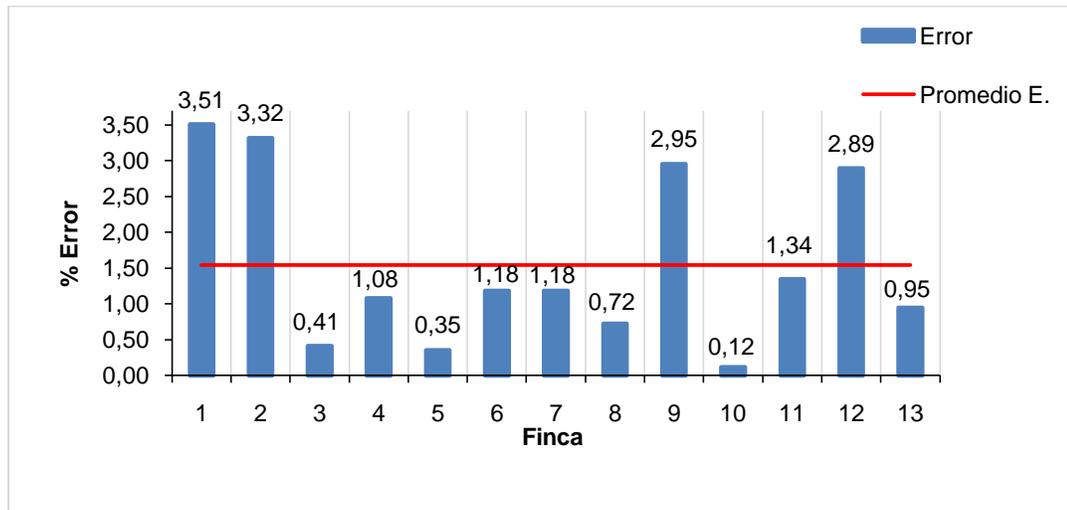
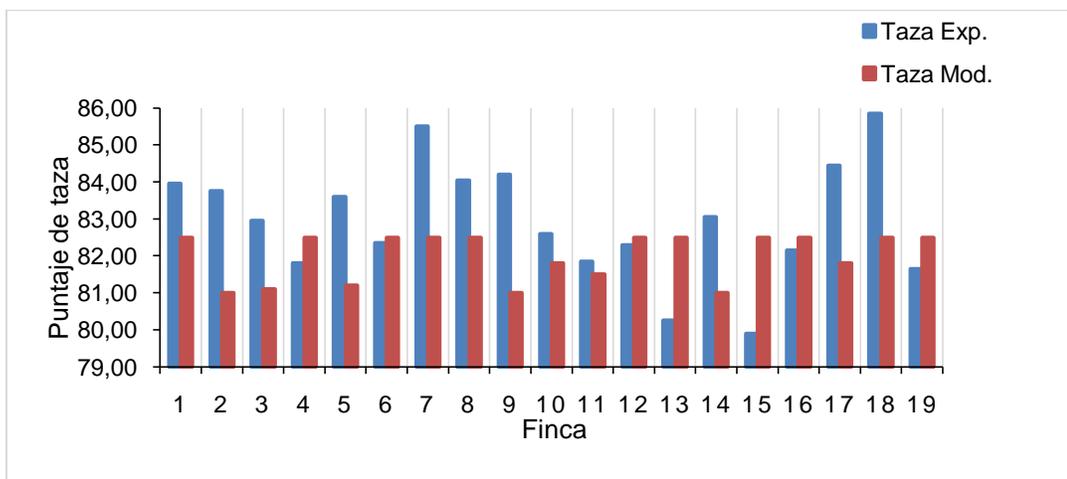


Figura 38. Comportamiento del error en la validación del modelo, para variedad Caturra.

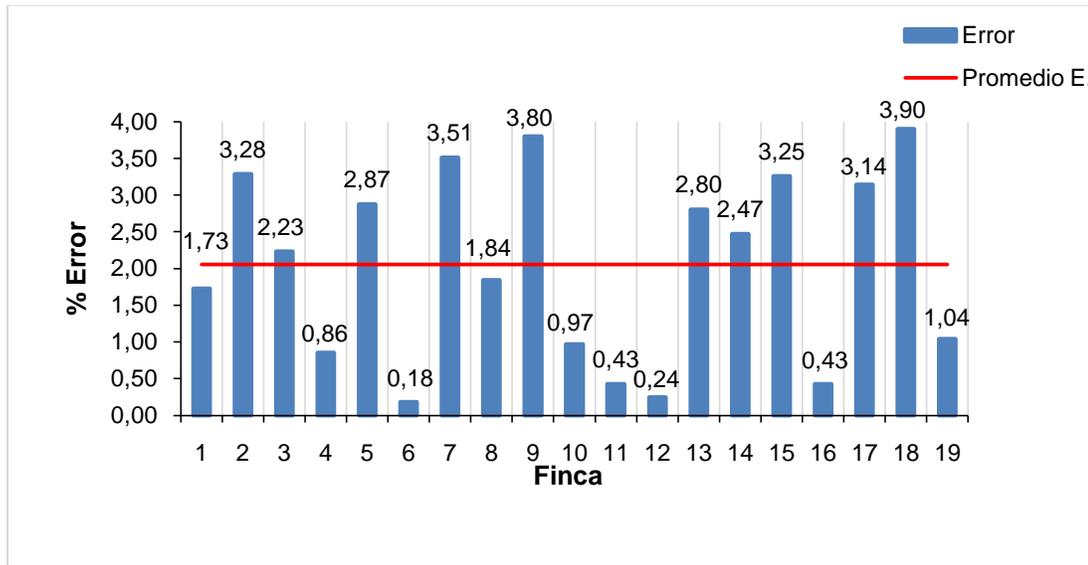
La validación realizada para variedad Colombia a partir de la información de 19 fincas presenta 11 datos simulados por debajo de los datos experimentales, como lo muestra la figura 39; y un el error que presentó valor máximo de 3,90 % y mínimo de 0,18%, con un promedio de 2,05% que se aprecia en la figura 40, oscilando entre el límite superior de 2,63% e inferior de 1,47%. Valores pueden ser considerados como bajos y aceptables en la estimación si se tienen en cuenta las diferentes condiciones climáticas, edáficas y de ubicación que presentaron las fincas empleadas para la validación.

Figura 39. Comportamiento de la validación del modelo a partir de información en 19 fincas con variedad Colombia.

Con estos resultados se consideran los modelo promisorio, con una alta capacidad predictiva, manteniendo las condiciones de proceso de beneficio húmedo y secado

estandarizado, resultados cercanos a los obtenidos por Ávila *et al.*, (2011) en una metodología semejante para evaluar bebidas a base de fruta.

Figura 40. Comportamiento del error en la validación del modelo, para variedad Colombia.



4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- La construcción de la escala de maduración para variedad Caturra y Colombia con las propiedades ópticas, contribuyó como herramienta para que los operarios diferenciaran con un acierto del 60 a 71% los frutos maduros, 56 a 77% los sobre maduros, 78 a 86% los pintones y 56 a 73% los frutos verdes.
- El índice de color (IC*) obtenido a partir de los valores de las coordenadas CIEL*a*b*, permitió establecer un parámetro que puede diferenciar los 4 estados de desarrollo en los frutos de café evaluados en ambas variedades.
- La concentración de azúcares (° brix) del mucílago es un criterio decisivo en la diferenciación de estados de desarrollo de los frutos de café, por el contrario las propiedades ópticas en el sistema CIEL*a*b* requieren de periódicos ajustes debido a la variabilidad en la interpretación visual por parte de los operarios encargados de la selección de los frutos por color.
- El proceso de beneficio húmedo estandarizado utilizado en la presente investigación no afectó la calidad física ni sensorial de las dos variedades de café estudiadas.
- En la variedad Caturra la composición del café cosechado no tuvo efecto significativo en la calidad de la taza permitiendo obtener un café especial – muy bueno según la clasificación de la SCAA (2014).

- En la variedad Colombia el café cosechado con 100% de frutos maduros y el café con 60% de maduros, 26% de sobre maduros, 12% de pintones y 2% de verdes tuvo efecto significativo en la calidad de la taza permitiendo obtener un café especial – muy bueno.
- Para las variedades Caturra y Colombia la proporción de frutos verdes de 2,5% no afectó de manera significativa la calidad sensorial de la taza.
- Para los modelos desarrollados con lógica difusa se encontró un promedio de error menor al 2% en la estimación de la calidad en taza respecto a los datos experimentales, con una alta capacidad predictiva en la validación del mismo para las dos variedades de café estudiadas.

4.2 Recomendaciones

- El desarrollo de futuras investigaciones con café cereza de la variedad Caturra, podrían utilizar la escala de maduración elaborada en este trabajo.
- Como parámetro de verificación en masa de café cosechado, se recomienda luego de caracterizar e identificar los porcentajes con relación al peso de los frutos en diferente estado de desarrollo, utilizando las escalas de maduración elaboradas en la presente investigación; que se realice un muestreo representativo al azar de los frutos que componen la mezcla, para extraer el mucilago y medir la concentración de azúcares de los frutos en su conjunto.
- Por la tendencia de los frutos sobremaduros a potenciar la calidad sensorial de la bebida, es importante planificar experimentos que permitan evaluar una mayor proporción de estos frutos en la masa cosechada con el valor de IC* en 98,35 y 104,63 para Variedad Caturra y Colombia respectivamente, de la misma forma la concentración de azúcares de 20,60 y 18,04 ° brix medidos en la presente investigación, y que a su vez permitan mejorar el modelo matemático desarrollado.
- El desarrollo del modelo matemático a partir de lógica difusa se puede mejorar a partir de información en la caracterización de los estados de desarrollo en frutos de

café, para diferentes zonas cafeteras del departamento de Antioquia y de Colombia; incluso adicionando otras variables que intervienen en el proceso de beneficio húmedo.

- Por su bajo error en la estimación y por lo tanto su alta capacidad predictiva para la calidad sensorial de la bebida de café en fincas cafeteras que tengan un perfil de taza definido, el ejercicio con el modelo utilizando lógica difusa, podría impulsarse como una herramienta dirigida a mercados diferenciados exigentes donde la consistencia y continuidad de la calidad del café deben conservarse para ser competitivos.

A. Anexo: Formato para registro de análisis sensorial de café adaptado de la SCAA (2014)

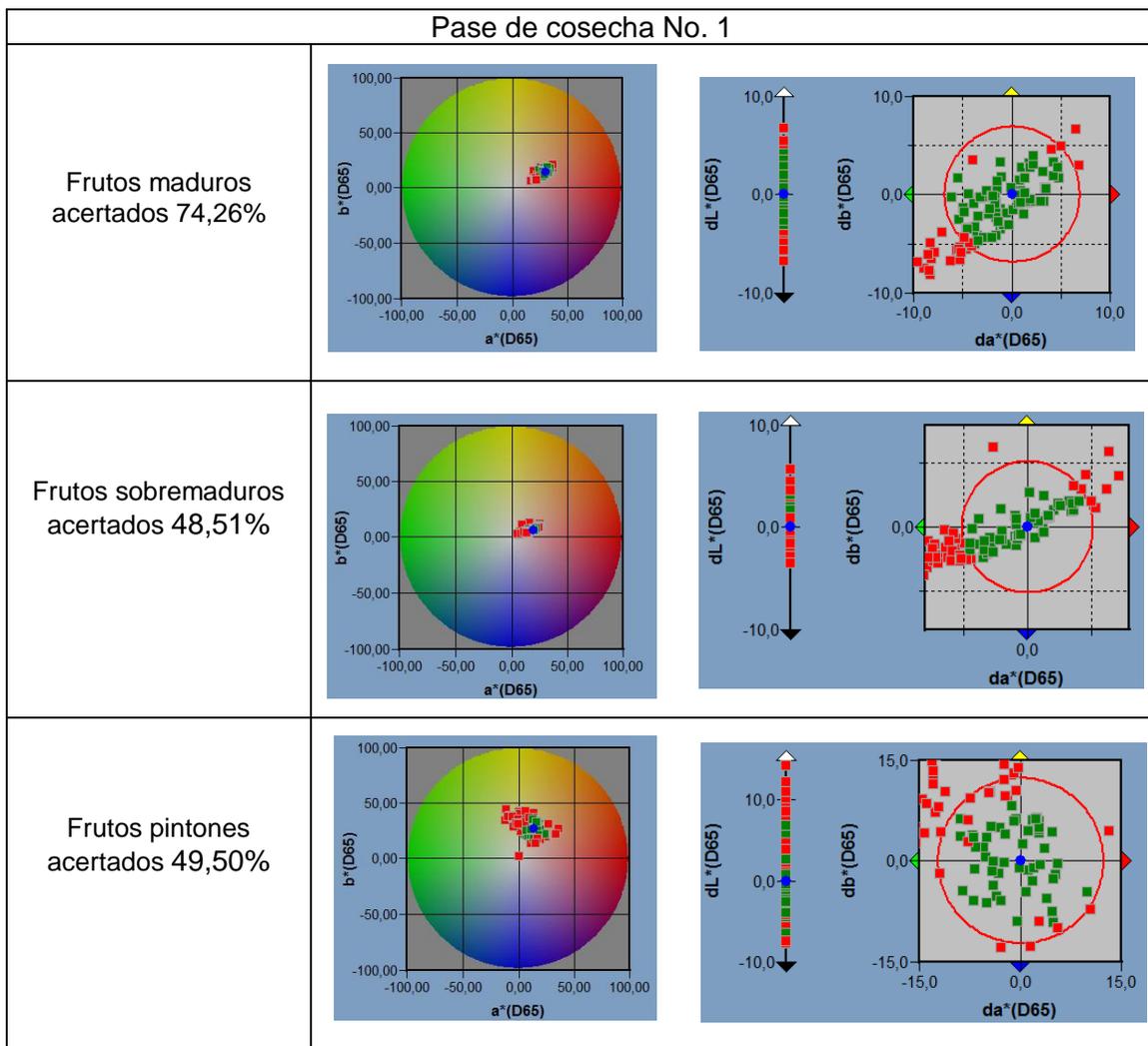
PROYECTO ANTIOQUIA ORIGEN DE CAFES ESPECIALES

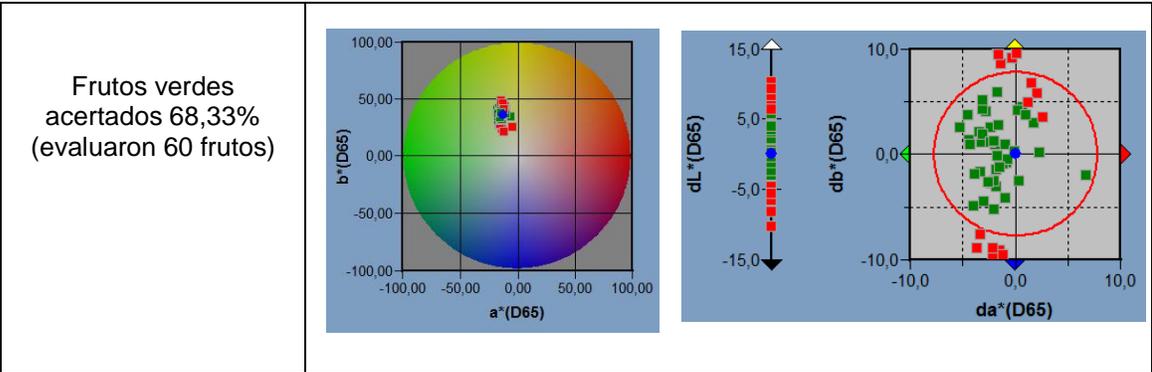
Fecha: _____ Sesión: _____ Objetivo: _____ Nombre Catador: _____

Muestra	Fragancia/Aroma			Sabor			Sabor residual			Acidez			Textura			Balance			
	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10	6	7	8	9
Floral	Chocolate	Mohoso	Dulce	Chocolate	Cerealeso	Suave	Limpio	Vinosa	Persistente	Mantequillosa	Seca	Puntaje catador							
Frutoso	Nuez	Cuero	Acido	Nuez	Reposo	Dulce	Prolongado	Vibrante	Moderada	Cremosa	Aspera	Puntaje catador							
Fruita Roja	Malta	Carbón	Delicado	Insipido	Picante	Acido	Aspero	Malica	Delicada	Aterciopelada	Arenosa	Puntaje catador							
Caramelo	Vainilla	Pimienta	Intenso	Espeziado	Verde	Floral	Sucio	Dulce	Suave	Sedosa	Tiza	Puntaje catador							
Limon	Mantequilla	Picante	Redondo	Frutoso	Punzante	Frutoso	Seco	Toronia	Dura	Jugosa	Astringente	Puntaje catador							
Fl. Amarillos	Cedro	Terroso	Vinoso	Fruita Roja	Mohoso	Frutoso	Amargo	Tartarica	Picante	Ligera	Metálica	Puntaje catador							
Tostada	Miel	Humo	Exótico	FL Amarillos	Maderoso	Fruita Roja		Herbal	Punzante	Aguada	Acetosa	Puntaje catador							
				Equilibrado				Limón	Agria			Dulzor	PUNTAJE TOTAL						
												Taza Limpia	PUNTAJE TOTAL						
												Uniformidad	PUNTAJE TOTAL						

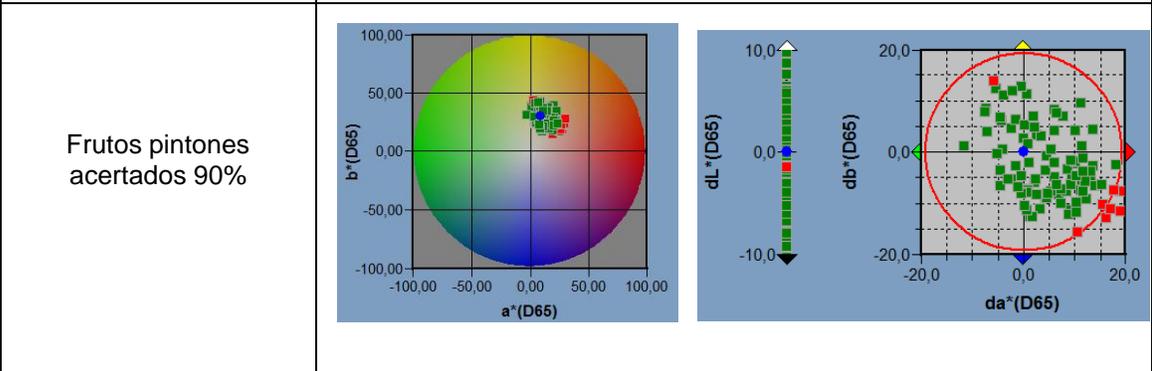
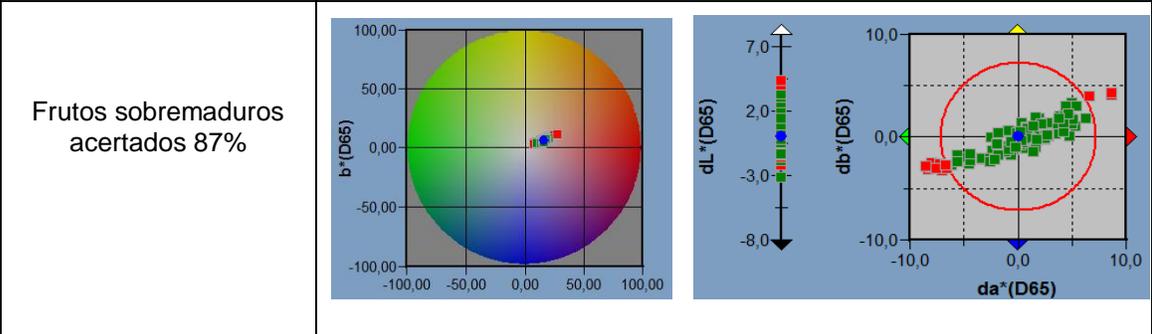
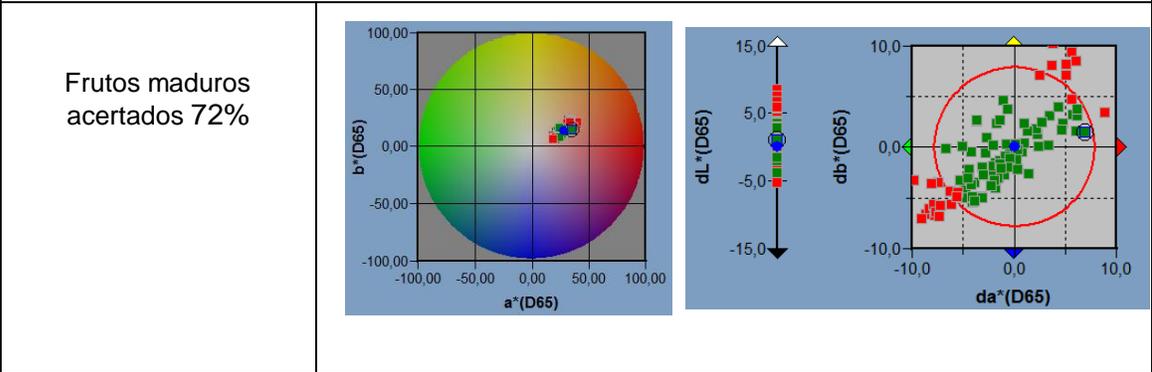
B. Anexo: Gráficas del software SpectraMagic NX producto de la verificación de color en frutos de café

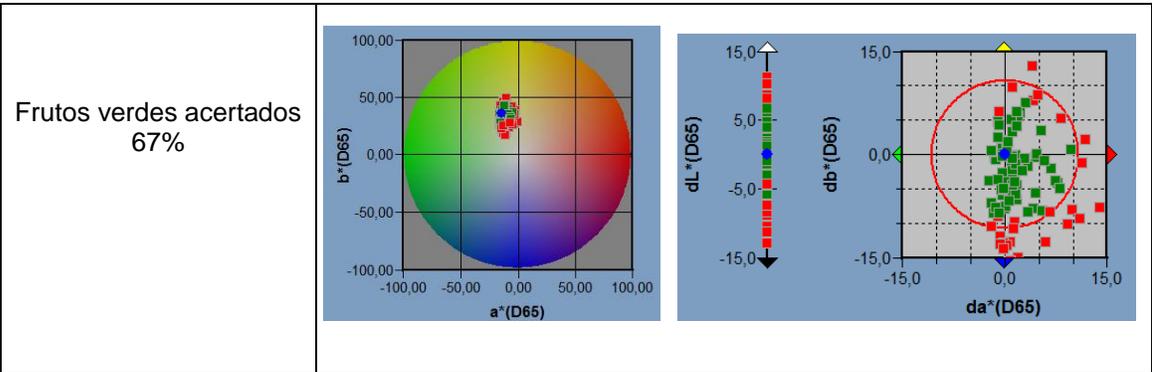
Tabla B.1. Verificación frutos de café en diferentes estados de desarrollo variedad Caturra



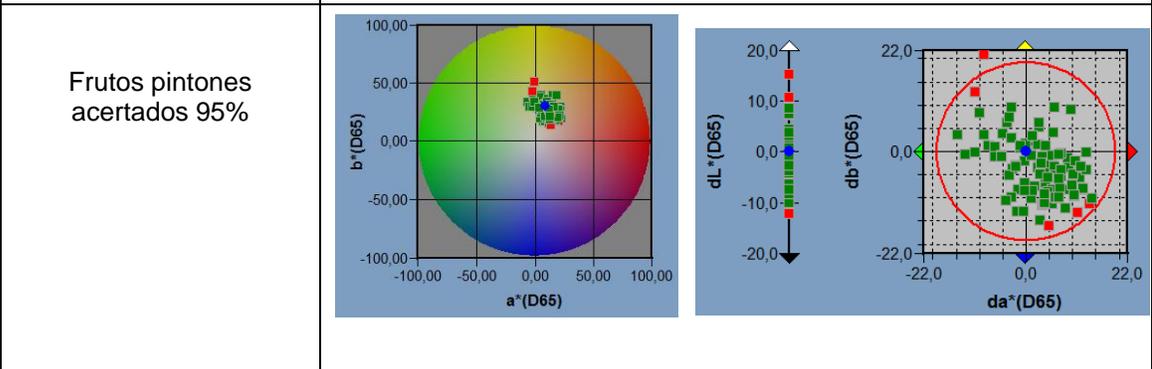
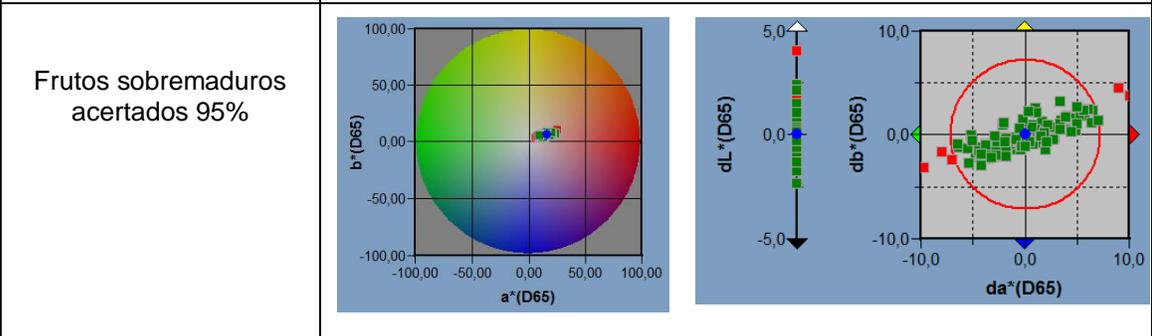
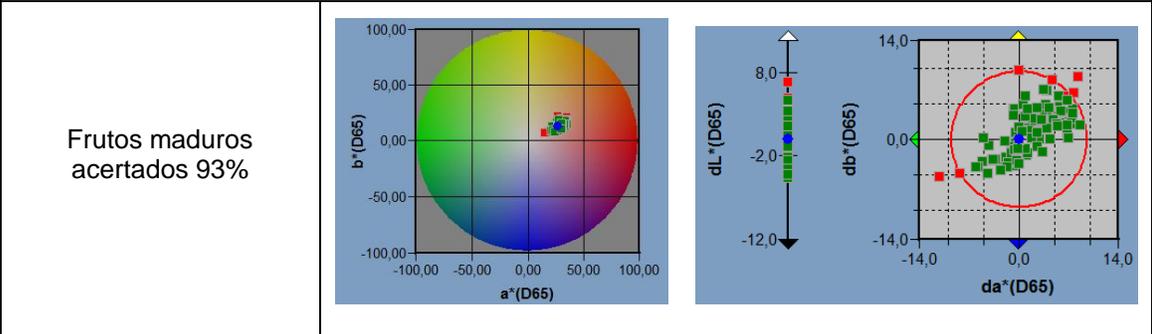


Pase de cosecha No. 2





Pase de cosecha No. 3



Frutos verdes acertados
85%

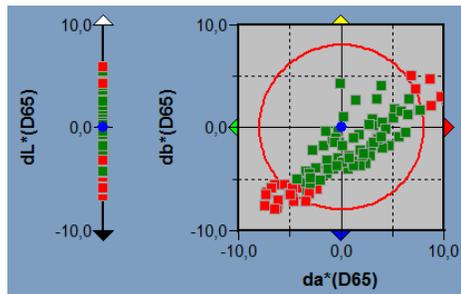
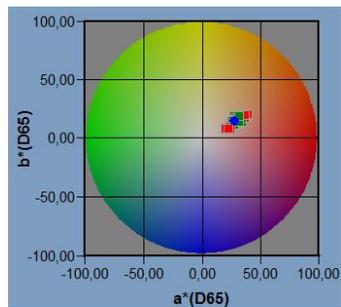
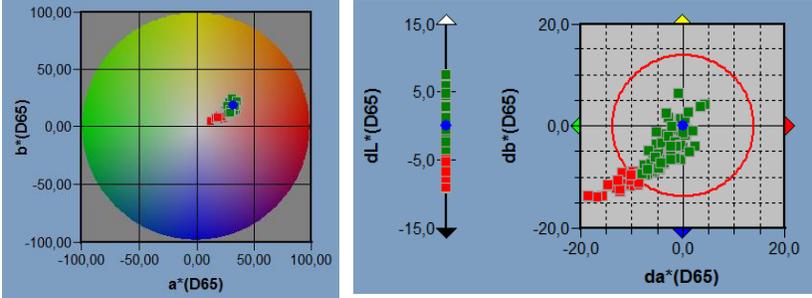
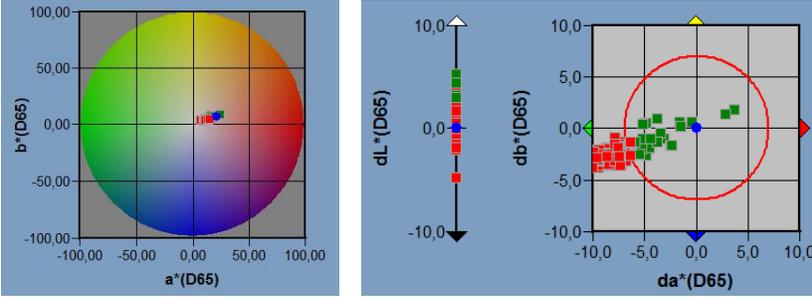
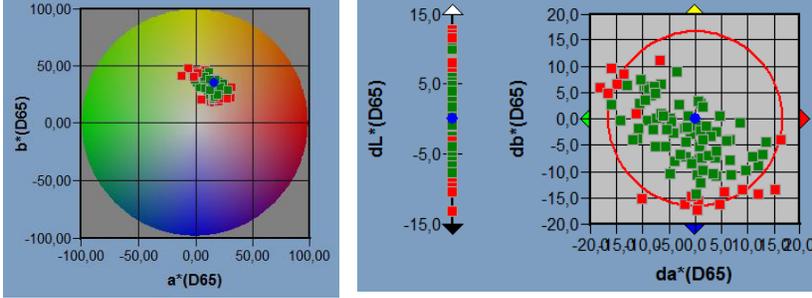
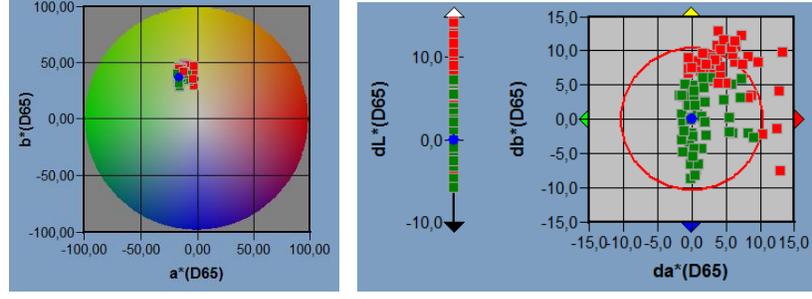
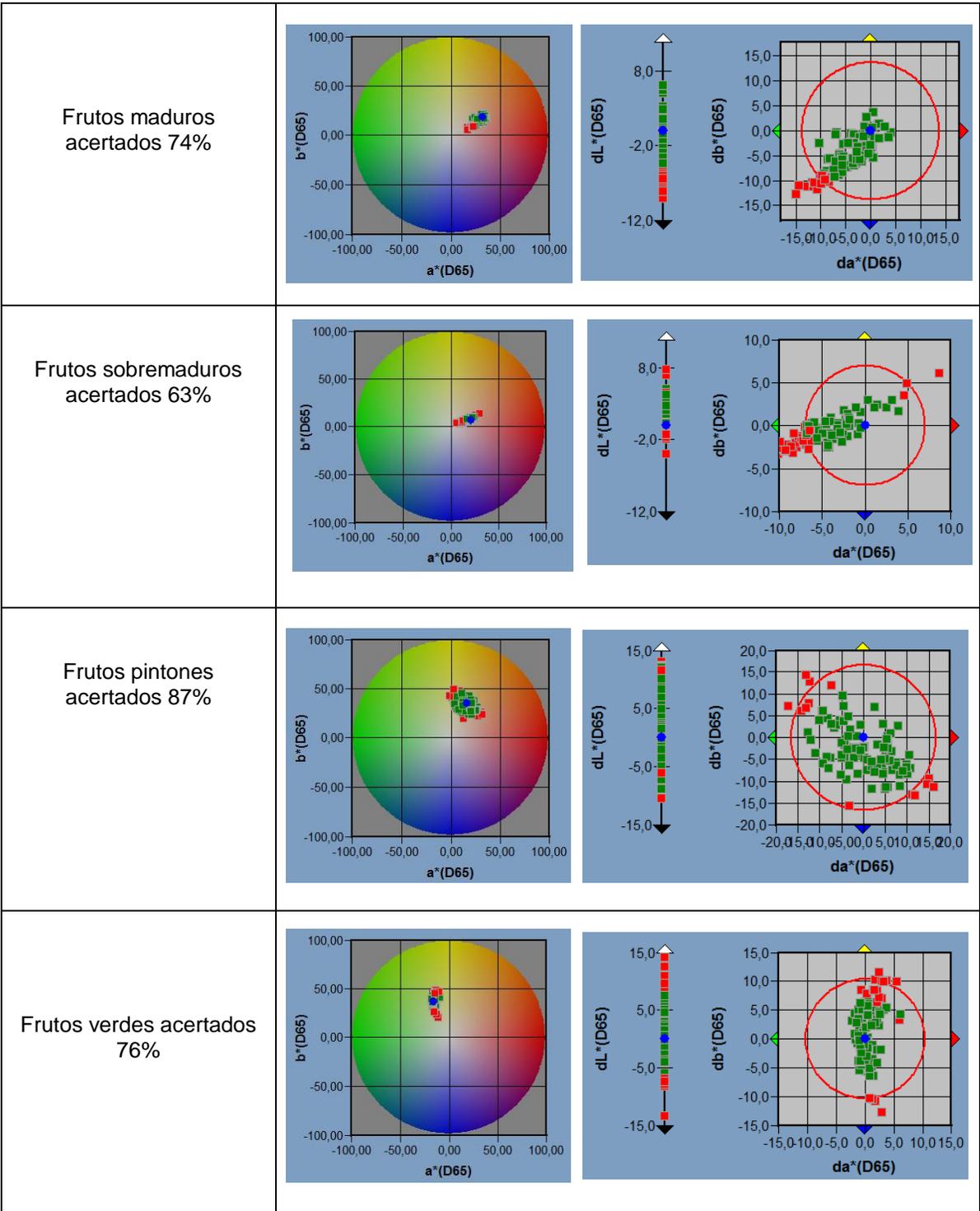


Tabla B.2. Verificación frutos de café en diferentes estados de desarrollo variedad Colombia

Pase de cosecha No. 1		
<p>Frutos maduros acertados 73%</p>		
<p>Frutos sobremaduros acertados 82%</p>		
<p>Frutos pintones acertados 92%</p>		
<p>Frutos verdes acertados 33%</p>		
Pase de cosecha No. 2		

<p>Frutos maduros acertados 67%</p>	
<p>Frutos sobremaduros acertados 24%</p>	
<p>Frutos pintones acertados 80%</p>	
<p>Frutos verdes acertados 58%</p>	
<p>Pase de cosecha No. 3</p>	



**C. Anexo: Registro fotográfico de los
tratamientos de café elaborados en cada
pase de cosecha**

Tabla C.1. Registro fotográfico de tratamientos (mezclas) en variedad Caturra.

 <p>M1</p>	 <p>M2</p>	 <p>M3</p>	 <p>M4</p>
Pase de cosecha No. 2			
 <p>M1</p>	 <p>M2</p>	 <p>M3</p>	 <p>M4</p>
Pase de cosecha No. 3			
 <p>M1</p>	 <p>M2</p>	 <p>M3</p>	 <p>M4</p>

Tabla C.2. Registro fotográfico de tratamientos (mezclas) de café en variedad Colombia.

Pase de cosecha No. 1			
			
M1	M2	M3	M4
Pase de cosecha No. 2			
			No se realizó muestreo
M1	M2	M3	M4
Pase de cosecha No. 3			
			
M1	M2	M3	M4

D. Anexo: Análisis de varianza (ANOVA) para la variable de respuesta calidad en taza

Comparación cuatro tratamientos M1, M2, M3, M4 de variedad Caturra

ANOVA Table for Taza by Tratamiento

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	10,3667	3	3,45556	0,63	0,6012
Within groups	309,117	56	5,51994		
Total (Corr.)	319,483	59			

Multiple Range Tests for Taza by Tratamiento

Method: 95,0 percent LSD

Tratamiento	Count	Mean	Homogeneous Groups
M4	15	82,4833	X
M2	15	82,95	X
M1	15	82,9833	X
M3	15	83,65	X

Contrast	Difference	+/- Limits
M1 - M2	0,0333333	1,71858
M1 - M3	-0,666667	1,71858
M1 - M4	0,5	1,71858
M2 - M3	-0,7	1,71858
M2 - M4	0,466667	1,71858
M3 - M4	1,16667	1,71858

* denotes a statistically significant difference.

Comparación cuatro tratamientos M1, M2, M3, M4 de variedad Colombia

ANOVA Table for Taza by Tratamiento

Analysis of Variance					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	30,6948	3	10,2316	8,80	0,0001
Within groups	65,1167	56	1,1628		
Total (Corr.)	95,8115	59			

Multiple Range Tests for Taza by Tratamiento

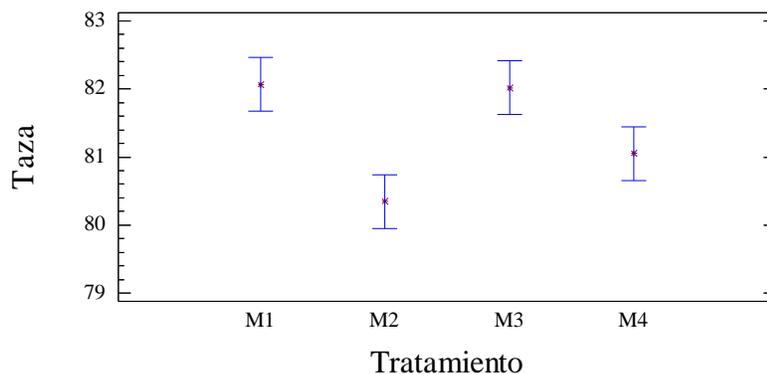
Method: 95,0 percent LSD

Tratamiento	Count	Mean	Homogeneous Groups
M2	15	80,35	X
M4	15	81,05	X
M3	15	82,0167	X
M1	15	82,0667	X

Contrast	Difference	+/- Limits
M1 - M2	*1,71667	0,788779
M1 - M3	0,05	0,788779
M1 - M4	*1,01667	0,788779
M2 - M3	*-1,66667	0,788779
M2 - M4	-0,7	0,788779
M3 - M4	*0,96667	0,788779

* denotes a statistically significant difference.

Means and 95,0 Percent LSD Intervals



Bibliografía

Álvarez, T. E., Álvarez, M. F., Oliveros, T. C.E., y Montoya, R. E.C. (1999). Propiedades físico - mecánicas del fruto de café y del sistema fruto - pedúnculo del café variedad Colombia. *Facultad Nacional de Agronomía*, 52(2), 701-732.

Ávila, H. R.M., & González, T., C. C. (2011). La evaluación sensorial de bebidas a base de fruta: una aproximación difusa. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 15(60), 171-182. Recuperado de <http://www.scielo.org.ve/pdf/uclt/v15n60/art07.pdf>.

Borges, B. F., Jorge, J.T., Noronha, R. (2002). Influência da idade da planta e da maturação dos frutos no momento da colheita na qualidade do café. *Ciência, Tecnologia alimentos*, 22(2), 158-163. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/cta/v22n2/a10v22n2>.

Binotto, F.E., Eiterer, S. C.H., Borges, P. N.M., Machado, J. V. (2011). Efeito do tempo de formação do grão de café (*Coffea sp*) na qualidade da bebida. *Bioscience Journal*, 27(5), 729-738. Recuperado de <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7172/7887>.

Carvajal, J.J., Aristizábal, I.D., Oliveros, C.E., y Mejía, J.W. (2011). Colorimetría del Fruto de Café (*Coffea arabica* L.) Durante su Desarrollo y Maduración. *Facultad Nacional de Agronomía*, 64(2), 6229-6240.

Carvajal, J. J., Aristizábal, I. D., y Oliveros, C. E. (2012). Evaluación de Propiedades Físicas y Mecánicas del Fruto de Café (*Coffea arabica* L. var. Colombia) durante su desarrollo y maduración. *Dyna*, 79 (173), 116-124.

Chaillou, L. L. (2008). Cálculo Numérico: Curso práctico con aplicaciones en Ingeniería de Alimentos. (pp. 8-9). Santiago del Estéreo, Argentina: Lucrecia. Recuperado de http://faa.unse.edu.ar/pdf/publicdoc/Calculo_numerico.pdf.

Cooperativa de Caficultores de Antioquia. (2015). Comercialización de café. Recuperado de <http://www.cafedeantioquia.com/index.php/gestion-comercial/comercializacion-del-cafe>.

Domínguez, J. C. (4 de marzo de 2014). Mejora en precios da mayor respiro a los cafeteros del país. *Portafolio*. Recuperado de <http://www.portafolio.co/economia/produccion-cafe-colombia-febrero-2014>.

Gobierno, infraestructura y banca, los motores del PIB en el 2014. (17 de marzo de 2015). *El Tiempo*. 2015. Recuperado de <http://www.eltiempo.com/economia/indicadores/crecimiento-de-la-economia-en-colombia-en-2014/15418095>.

Federación Nacional de cafeteros de Colombia. (2010). Sobre el café. EL árbol y el entorno. Recuperado de http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/sobre_el_cafe/el_cafe/el_arbol_y_el_entorno/.

Flórez, R. C.P., Ibarra, R. L.N., Gómez, G. L.F., Carmona, G. C. Y., Castaño, M. A., Ortiz, A. (2013). Estructura y funcionamiento de la planta de café. *Manual del cafetero Colombiano Tomo I* (pp. 123-169). Chinchiná, Colombia: Cenicafé. Recuperado de http://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/Manual_Cafetero.

Fuzzy Logic Toolbox User's Guide Matlab. (2015). Foundations of Fuzzy Logic. Version 2.22.2. The MathWorks, Inc. (pp. 15). Recuperado de www.mathworks.com.

Garay, R., Hidalgo, E., Alegría, J. A., y Mendieta, O. W. (2012). Determinación de Periodos Fisiológicos en la Maduración y Calidad del Aceite de Piñón Blanco (*Jatropha*

curcas L.). *Información tecnológica*, 23(4), 53-64. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000400007&script=sci_arttext.

Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen. (2010). (pp. 20-29) Guatemala: IICA. Recuperado de <http://www.iica.int>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) No. 3633. Café pasilla. 1999.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) No. 3314. Sector agropecuario. Café y sus productos. Vocabulario. 2002.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) No. 3566. Café verde. Preparación de muestras para uso en análisis sensorial. 2011.

Jaramillo D. A. (2012) *Efectos de las abejas silvestres en la polinización del café (Coffea arabica: Rubiaceae) en tres sistemas de producción en el departamento de Antioquia*. (Tesis de Maestría) Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

La Misión Cafetera presentó al Gobierno su documento final. (25 de marzo de 2015) *Portafolio*. Recuperado de <http://www.portafolio.co/economia/mision-cafetera-entrega-su-informe-final-al-gobierno>.

La oportunidad para los cafés especiales colombianos. (4 de septiembre de 2015). *Dinero*. Recuperado de <http://www.dinero.com/pais/articulo/como-esta-mercado-cafes-especiales-colombiano-mundo/207530>.

Marín, L. S. M., Arcila, P. J., Montoya, R. E. C., y Oliveros T.,C.E. (2003). Relación entre el estado de madurez del fruto de café y las características de beneficio, rendimiento y calidad de la bebida. *Cenicafe*, 54(4), 297–315.

Martínez, C. V.M. (2006). *Viabilidad técnica de la cosecha selectiva de café (Coffea arabica L.) utilizando espelación de los frutos*. (Tesis de Pregrado) Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia.

Moll, F. S. (2012). *Café: Producción, consumo y distribución mundial*. Central American Business Intelligence (CABI). Recuperado de <http://ca-bi.com/blackbox/?p=7359>.

Muñoz, O. L.G., Trujillo, E. G., Acero, L. L.F., Valencia, P. A., Medina, M.J., Villaveces, P. R. (2011) *Sostenibilidad en Acción 2011*. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Recuperado de http://www.federaciondefcafeteros.org/static/files/Informe_de_Sostenibilidad_2011_Espanol.pdf.

Oliveros, T. C. E., Peñuela, M. A. E., y Jurado, C. M. E. (2009). *Controle la humedad del secado solar, utilizando el método Gravimet*. Avances Técnicos Cenicafé No. 387.

Oliveros, T. C.E., Ramírez, G. C. A., Sanz, U. J. R., Peñuela, M. A. E., Pabón, U. J. (2013). *Secado solar y secado mecánico del café. Manual del cafetero Colombiano Tomo III* (pp. 49-78). Chinchiná, Colombia: Cenicafé. Recuperado de http://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/Manual_Cafetero

Peñuela, M. A.E., Pabón U. J., y Sanz U. J.R. (2013). *Método Fermaestro: Para determinar la finalización de la Fermentación del mucílago de café*. Avances técnicos Cenicafé No. 431.

Protocolo Análisis sensorial de café. (2014). Proyecto: Antioquia Origen de cafés especiales. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Puerta Q., G.I. (1998). *Calidad de las variedades de Coffea arabica L. cultivadas en Colombia*. *Cenicafé*, 49(4), 265-278.

Puerta, Q. G.I. (2000). *Influencia de los granos de café cosechados verdes, en la calidad física y organoléptica de la bebida*. *Cenicafé*, 51 (2), 136-150.

Puerta, Q. G.I. (2006). La humedad controlada del grano preserva la calidad del café. *Avances Técnicos Cenicafé* No. 352.

Puerta Q., G.I. (2010). Rendimientos y calidad de *Coffea arábica* L. según el desarrollo del fruto y la remoción del mucílago. *Cenicafé*, 61(1), 67-89. Recuperado de [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc061\(01\)067-089.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc061(01)067-089.pdf).

Puerta, Q. G.I. (2013). Calidad del Café. *Manual del cafetero Colombiano Tomo III* (pp. 82-108). Chinchiná, Colombia: Cenicafé. Recuperado de http://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/Manual_Cafetero.

Puerta, Q. G.I. (2015). Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad. *Avances técnicos Cenicafé*. No. 454.

Roa, M.G., Oliveros, T., C.E; Álvarez, G.J., Ramírez, G. C. A., Sanz, U.J.R., Dávila, A.M.T., Álvarez, H. J. R., Zambrano, F. D. A., Puerta, Q. G. I., Rodríguez, V. N. (1999). *Beneficio Ecológico del Café*. Chinchiná, Colombia: Cenicafé.

Rodríguez, A. L.W. (2011). *Diseño del sistema de control difuso de una máquina secadora de café que emplea energía solar*. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco. México D.F, México. Recuperado de <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/14477/SEPI-ESIME%20UA.pdf?sequence=1>.

Ruiz, M. P., Ureña, M. A., Torres, M. A. (2009). Los Mercados del Café y de los Cafés Especiales. Situación Actual y Perspectivas. Programa Más Inversión para el Desarrollo Alternativo Sostenible. (pp. 32 - 38). Recuperado de http://www.ard.org.co/midas/spanish/departamentos/agricultores-y-cadenas-de-valor/pdf/Mercado_Situacion_Actual_y_Perspectivas_CAF%C3%83%E2%80%B0S_ESP ECIALES.pdf.

Salazar G., M.R. (1993). *Estudio anatómico y Fisiológico del fruto de café*. (Tesis de Pregrado). Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

Specialty Coffee Association of America (SCAA). (2014). SCAA Protocols Cupping Specialty Coffee. Recuperado de <http://www.scaa.org/PDF/resources/cupping-protocols.pdf>.

Tominaga, O., Ito, F., Hanai, T., Honda, H., Kobayashi, T. (2002). Sensory Modeling of Coffee with a Fuzzy Neural Network. *Journal of Food Science*, 67(1), 363-368. Recuperado de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2621.2002.tb11411.x/epdf>.

Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Estrategia de intervención para el mejoramiento de la producción de cafés especiales en el departamento de Antioquia para el acceso a mercados de cafés diferenciados. Componente Ciencia Tecnología e Innovación. 2013. 12p.

Universidad Nacional de Colombia, Gobernación de Antioquia. Investigación sobre cafés especiales. Antioquia: Origen de cafés especiales. Informe final Técnico. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Noviembre de 2015. 331p.

Vidal, V. M. A. (2014). *Rango ideal de concentración de sólidos solubles durante la maduración del café y su influencia sobre la calidad de taza*. (Tesis de Pregrado) Universidad Rafael Landívar. Guatemala de la Asunción, Guatemala. Recuperado de <http://biblio3.url.edu.gt/Tesario/2014/06/14/Vidal-Marco.pdf>.

Vignoni, L.A., Césari, R. M., Forte, M., y Mirábile, M. L. (2006). Determinación de Índice de Color en Ajo Picado. *Información tecnológica*, 17(6), 63-67. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600011&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0718-07642006000600011.