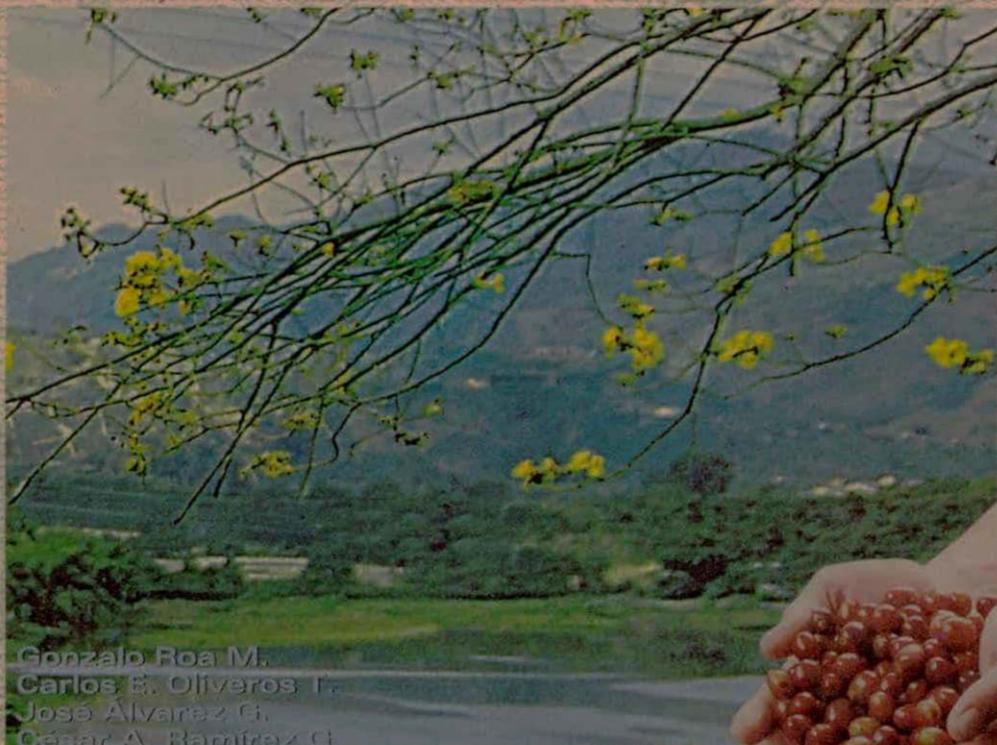


BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ



Gonzalo Roa M.
Carlos E. Oliveros T.
José Álvarez G.
César A. Ramírez G.
Juan R. Sanz U.
Jairo R. Álvarez H.
María T. Dávila A.
Diego A. Zambrano F.
Gloria I. Puerta O.
Nelson Rodríguez V.

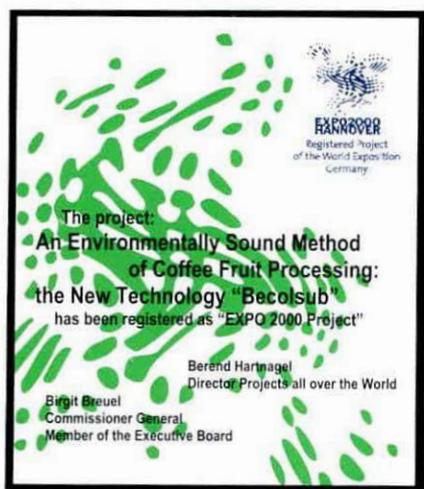


Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia

Cenicafé

Centro Nacional de Investigaciones de Café
"Pedro Uribe Meila"

BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ



Gonzalo Roa M.
Carlos E. Oliveros T.
José Álvarez G.
César A. Ramírez G.
Juan R. Sanz U.
María T. Dávila A.
Jairo R. Álvarez H.
Diego A. Zambrano F.
Gloria I. Puerta Q.
Nelson Rodríguez V.

6E6Ea4Ns

R51 Roa M., G.

BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ. Por Gonzalo Roa M.; Carlos E. Oliveros T.; José Álvarez G.; César A. Ramírez G.; Juan R. Sanz U.; María T. Dávila A.; Jairo R. Álvarez H.; Diego A. Zambrano F.; Gloria I. Puerta Q.; Nelson Rodríguez V.

Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ, 1999
300p.

ISBN: 958-96554-3-2

Roa M., G. II. Coautores. III. Título.

1. Beneficio del Café.

Copyright Cenicafé 1999.



Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.



FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA

COMITÉ NACIONAL DE CAFETEROS

Ministro de Hacienda y Crédito Público
Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Ministro de Comercio Exterior
Director del Departamento de Planeación Nacional

Miembros elegidos para el período 1999-2001

PRINCIPALES

Luis Ignacio Múnera Cambas
Mario Gómez Estrada
Alfonso Jaramillo Salazar
Rodrigo Múnera Zuloaga
Julio Ernesto Marulanda Buitrago
Diego Arango Mora
Floresmiro Azuero Ramírez
Carlos Alberto Martínez Martínez

SUPLENTE

Jorge Alberto Uribe Echavarría
Jorge Cala Robayo
Ramón Campo González
Rodolfo Campo Soto
Édgar Dávila Muñoz +
Alfredo Yañez Carvajal
Luis Ardila Casamitjana
Ernesto Sayer Martínez

Gerente General

JORGE CÁRDENAS GUTIÉRREZ

Subgerente General

HERNÁN URIBE ARANGO

Gerente Técnico

ANTONIO HERRÓN ORTIZ

Director Programa de Investigación Científica
Director Centro Nacional de Investigaciones de Café

GABRIEL CADENA GÓMEZ

UNA PUBLICACIÓN DE
Cenicafé

Coordinación editorial
y corrección de textos: Héctor Fabio Ospina Ospina - Ing. Agr. M.Sc.
Diseño y Diagramación: Gonzalo Gallego González.
Fotografías: Gonzalo Hoyos Salazar.
Disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé

1a. Edición, Noviembre de 1999
3.000 ejemplares

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Presentación	1
Prólogo	5
1. GENERALIDADES	7
1.1. DEFINICIÓN	11
1.2. PROCEDIMIENTOS COMPLEMENTARIOS PARA REALIZAR EL BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ	12
1.3. CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS POR EL BENEFICIO DEL CAFÉ	13
1.4. CONSUMO DE AGUA Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO	13
1.5. EVALUACIÓN PARCIAL DEL BENEFICIO ECOLÓGICO DESARROLLADO POR CENICAFÉ	14
2. LA CALIDAD DEL CAFÉ	15
2.1. ASPECTOS GENERALES	17
2.1.1. La calidad de las variedades de café cultivadas en Colombia	18
2.1.2. El beneficio húmedo de café y su influencia en la calidad	21
2.1.2.1. La cosecha	23
2.1.2.2. El despulpado	23
2.1.2.3. La remoción del mucílago	24
2.1.2.4. El lavado	25
2.1.2.5. El secado	26
2.1.2.6. El almacenamiento del café pergamino	26
2.1.3. El beneficio por vía seca y su influencia en la calidad del café colombiano	27
2.1.4. Principales defectos en la calidad del café	28
2.1.4.1. La broca del café	28
2.1.4.2. El sabor fenólico	28
2.1.4.3. El defecto “stinker”	28
2.2. EFECTO DEL DESMUCILAGINADO MECÁNICO EN LA CALIDAD FÍSICA Y ORGANOLÉPTICA DEL CAFÉ	29
2.2.1. Eliminación del mucílago	29
2.2.2. Calidad física del café desmucilaginado	29
2.2.3. Calidad organoléptica del café desmucilaginado	31

2.3.	EFFECTO DEL ENFRIAMIENTO MECÁNICO EN LA CALIDAD DEL CAFÉ ALMACENADO A GRANEL	35
2.3.1.	Contenido de humedad de los granos	37
2.3.2.	Decoloración de los granos	38
2.3.3.	Presencia de microorganismos	40
2.3.4.	Calidad de la bebida	40
2.3.5.	Conclusiones	41
2.4.	EFFECTO DEL SECADO Y DEL ALMACENAMIENTO EN LA CALIDAD DE LA SEMILLA DE CAFÉ (Var. COLOMBIA)	42
2.4.1.	Efecto del secado en la viabilidad de la semilla de café	43
2.4.2.	Efecto del almacenamiento en la viabilidad de la semilla de café. ..	44
2.5.	EFFECTO DEL DESMUCILAGINADO MECÁNICO EN LA CALIDAD DE LA SEMILLA DE CAFÉ	45
2.6.	RECOMENDACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DE LA CALIDAD DEL CAFÉ Y DEL MEDIO AMBIENTE	49
3.	BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ	51
3.1.	MANEJO DEL CAFÉ EN CEREZA	53
3.1.1.	Transporte del café cereza del campo al beneficiadero	54
3.1.1.1.	Transporte del café cereza por cafeductos	54
3.1.1.2.	Transporte del café cereza por cable aéreo de gravedad. ..	55
3.1.1.3.	Transporte del café cereza por cable aéreo motorizado ..	56
3.1.2.	Transporte de café cereza por gravedad, dentro del beneficiadero	56
3.1.3.	Tolva seca para la recepción del café cereza	57
3.2.	DESPULPADO DEL CAFÉ	60
3.3.	DESPULPADA DE CAFÉ ACCIONADA A PEDAL	63
3.4.	DISMINUCIÓN EN LAS PÉRDIDAS POR DESPULPADO	64
3.5.	CALIBRACIÓN DE LAS DESPULPADORAS DE LOS MÓDULOS BECOLSUB	65
3.6.	CLASIFICACIÓN DEL CAFÉ CON ZARANDAS	66
3.7.	FERMENTACIÓN DEL MUCÍLAGO	71
3.8.	LAVADO DEL CAFÉ CON MUCÍLAGO FERMENTADO	71
3.9.	LAVADO Y TRANSPORTE DE CAFÉ CON BOMBA SUMERGIBLE	73
3.10.	DESMUCILAGINADO MECÁNICO, LAVADO Y LIMPIADO DEL CAFÉ. EQUIPO DESLIM	77
3.10.1.	Eliminación del mucílago	78
3.10.2.	Principios del desmucilaginado mecánico del café	79
3.10.3.	Desarrollo de equipos para el desmucilaginado mecánico del café en Cenicafé	81
3.10.4.	La tecnología DESLIM	87
3.10.5.	Componentes de los equipos DESLIM	91
3.10.5.1.	Carcaza	91
3.10.5.2.	Rotor	92
3.10.6.	Características de los desmucilaginadores de flujo ascendente DESLIM	93

3.10.6.1. Modelo DESLIM 100	94
3.10.6.2. Modelo DESLIM 300	94
3.10.6.3. Modelo DESLIM 600	95
3.10.6.4. Modelo DESLIM 1000	97
3.10.6.5. Modelo DESLIM 3000	97
3.10.7. Desempeño de la tecnología DESLIM	98
3.11. LAVADO Y CLASIFICADO DEL CAFÉ EN EL HIDROCICLÓN	101
3.11.1. Diseño de un hidrociclón	102
3.11.2. Construcción	103
3.11.3. Instalación y funcionamiento	104
3.11.4. Evaluación del hidrociclón	104
3.11.5. Ventajas de la utilización del hidrociclón	105
3.11.6. Desventajas de la utilización del hidrociclón	106
3.12. TRANSPORTE NEUMÁTICO DE CAFÉ PERGAMINO Y PULPA FRESCA DE CAFÉ	106
3.13. TRANSPORTE Y MEZCLA DE LA PULPA CON TORNILLO SINFIN	108
3.13.1. Dimensiones principales	109
3.13.2. Selección del diámetro exterior	109
3.13.3. Cálculo del diámetro del eje y potencia del tornillo sinfín	111
3.13.4. Construcción del tornillo sinfín	111
3.14. BENEFICIADERO ECOLÓGICO CON MANEJO DE SUBPRODUCTOS - MÓDULO “BECOLSUB”	113
3.15. MÓDULO BECOLSUB MÓVIL	115
3.16. SELECCIÓN DE UN MÓDULO BECOLSUB	118
3.17. RETENCIÓN EN LA PULPA DE CAFÉ, DE LEFLUENTE LÍQUIDO SÓLIDO RESULTANTE DE LOS MÓDULOS BECOLSUB	120
3.18. EVALUACIONES DE CAMPO DEL MÓDULO BECOLSUB 600 MÓVIL	122
3.18.1. Caracterización de los diferentes tipos de café obtenidos	122
3.18.2. Rendimientos y desempeños	125
3.18.3. Control de la contaminación con el módulo BECOLSUB 600 MÓVIL	125
3.18.4. Control de la contaminación con el módulo BECOLSUB 1000 MÓVIL	127
3.19. CENTRAL DE BENEFICIO ECOLÓGICO DE ANSERMA, CALDAS (CBEA)	129
3.19.1. Componentes de la Central de Beneficio de Anserma, Caldas	131
3.19.2. Manejo de la pulpa, del mucílago y de la lombriz	133
3.19.3. Evaluación de la Central	133
3.19.3.1. Uso del método CERPER en la CBEA	133
3.19.3.2. Calidad del café cereza y del café pergamino	134
3.19.3.3. Calidad del café pergamino obtenido por desmucilaginado mecánico	135
3.19.3.4. Secado de café en los secadores CENICAFÉ-IFC, Intermitentes de Flujos Concurrentes	136
3.19.3.5. Lombricompuesto	136

3.19.3.6.	Consumo de agua	139
3.19.3.7.	Retención de la contaminación	139
3.19.3.8.	Consumo de energía eléctrica	139
3.19.3.9.	Mano de obra	139
3.19.3.10.	Objetivos planteados en la propuesta del proyecto de la CBEA (1992-1993)	140
3.19.3.11.	Central de Anserma como generadora de tecnología de beneficio	141
3.20.	CURSO INTERNACIONAL SOBRE EL BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ	143
3.21.	COMERCIALIZACIÓN DEL MÓDULO BECOLSUB	143
4.	SECADO DEL CAFÉ	145
4.1.	CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CAFÉ	147
4.2.	DETERMINADOR DE HUMEDAD CENICAFÉ MH-2	148
4.3.	EVALUACIÓN DE LOS MEDIDORES COMERCIALES DE HUMEDAD	151
4.4.	DETERMINADORES Y MEDIDORES INDIRECTOS DE HUMEDAD	152
4.5.	DIFUSIÓN DE HUMEDAD DENTRO DEL GRANO DE CAFÉ	154
4.6.	SECADOR SOLAR	155
4.6.1.	El Secador Solar Rotatorio	155
4.6.2.	El Secador Solar Parabólico	156
4.7.	RASTRILLOS REVOLVEDORES DE CAFÉ	158
4.8.	SECADO MECÁNICO DEL CAFÉ	160
4.8.1.	Caudal de aire	160
4.8.2.	Paso del aire a través del café	162
4.8.3.	Ventiladores	163
4.8.4.	Generadores de aire caliente. Intercambiadores de calor	164
4.8.5.	Secado mecánico de capas estáticas del café	166
4.8.5.1.	Secado en una sola dirección del aire	166
4.8.5.2.	Secado con inversión de la dirección del flujo de aire..	167
4.8.5.3.	Presecado del café en capas estáticas	168
4.8.5.4.	Secado mecánico del café en carros convencionales para secado al sol	169
4.8.5.5.	Dimensionamiento de los secadores de capa fija	170
4.8.5.6.	Selección del ventilador	171
4.8.6.	Secador mecánico de café, para el aprovechamiento de la energía calorífica no utilizada en las estufas campesinas	171
4.8.7.	Secador Intermitente de Flujos Concurrentes, (IFC)	172
4.9.	SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL SECADO	179
4.9.1.	Propiedades físicas	180
4.9.1.1.	Contenido de humedad de equilibrio	180
4.9.1.2.	Calor latente de vaporización	181
4.9.1.3.	Secado de capa delgada. Difusión de humedad	182
4.9.1.4.	Área superficial	184
4.9.1.5.	Calor específico	184

4.9.1.6.	Densidad aparente	185
4.9.2.	Simulación de procesos comerciales	185
4.9.2.1.	Enfriamiento en silos	185
4.9.2.2.	Secado en capas estáticas	186
4.9.2.3.	Secado en Secador Intermitente de Flujos Concurrentes	187
5.	RENDIMIENTO DEL CAFÉ CEREZA A CAFÉ PERGAMINO SECO	189
5.1.	INTRODUCCIÓN	191
5.2.	COMERCIALIZACIÓN DE CAFÉ EN CEREZA	192
5.3.	COMERCIALIZACIÓN DE CAFÉ PERGAMINO LAVADO	192
5.4.	DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PESO POR LA PERMANENCIA DEL CAFÉ HÚMEDO	194
5.4.1.	Revisión de literatura	194
5.4.2.	Ensayos experimentales sobre pérdida de peso	195
5.5.	MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO CEREZA/PERGAMINO	196
5.5.1.	Método CERPER	196
5.5.1.1.	El método CERPER original	196
5.5.1.2.	Método CERPER modificado	198
5.5.1.3.	Método CERPER comercial en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma	199
6.	LOMBRICULTURA CON SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ	201
6.1.	INFRAESTRUCTURA	203
6.1.1.	Área necesaria	203
6.1.2.	Camas o lechos	203
6.1.3.	Pisos	204
6.1.4.	Techos	204
6.1.5.	Cerramiento	204
6.1.6.	Siembra de la lombriz	204
6.2.	SISTEMA DE SIEMBRA	205
6.3.	MANEJO DEL LOMBRICULTIVO	205
6.3.1.	Sustrato alimenticio	205
6.3.2.	Almacenamiento temporal del sustrato	206
6.3.3.	Sistema de alimentación	206
6.3.4.	Frecuencia y cantidad de alimento	206
6.4.	RECOLECCIÓN DE LOS PRODUCTOS	207
6.4.1.	Incremento de lombrices. Secado solar	208
6.4.2.	Rendimiento en la producción de lombricompuesto	209
7.	RENTABILIDAD DEL BENEFICIO ECOLÓGICO	211
7.1.	BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA TECNOLOGÍA NO CONTAMINANTE	213
7.2.	GENERALIDADES SOBRE LAS EVALUACIONES ECONÓMICAS DE INVERSIONES	214

7.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DEL PROGRAMA DE BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ	217
7.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA MEDIANTE SOFTWARE DESARROLLADO EN CENICAFÉ. Programa "ANEF SUB"	218
7.4.1. Supuestos en el análisis económico de la inversión	220
7.4.2. Criterio decisorio	221
7.4.3. Valor del dinero en el tiempo	223
7.4.4. Valor presente neto. Relación beneficio/costo	223
7.4.5. Utilización del programa ANEF SUB	224
8. TRATAMIENTO ANAERÓBICO DE AGUAS RESIDUALES	235
8.1. SISTEMA MODULAR DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO DE AGUAS RESIDUALES DE BENEFICIO DEL CAFÉ - SMTA	237
8.2. PRODUCCIÓN DE LODO METANOGÉNICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ POR BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA	242
8.2.1. Maduración del lodo	242
8.2.2. Arranque	242
8.2.3. Operación	243
9. BIBLIOGRAFÍA	247
APÉNDICE - A	265
APÉNDICE - B	266
APÉNDICE - C	272

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Efecto del desmucilaginado mecánico en la calidad física de café: Daño Mecánico (DM), Guayaba y Media Cara (GMC) e Impurezas (IMP), después del despulpado (d) y del desmucilaginado (D).	29
Figura 2. Calidad física del café obtenido con desmucilaginado mecánico sin previa eliminación de flotes y sin zarandear el café despulpado.	30
Figura 3. Esquema de silos metálicos utilizados para estudios de almacenamiento de café en laboratorio, con aire enfriado y forzado mecánicamente.	34
Figura 4. Batería de 60 silos de 30m de altura y 6m de diámetro, de ALMACAFÉ, Bello, Antioquia, para el almacenamiento de café pergamino con aireación forzada nocturna.	35
Figura 5. Contenido de humedad del café como función de las condiciones del aire tratado y del tiempo de almacenamiento.	37
Figura 6. Contenido de humedad del café enfriado en condiciones ambientales, como función del tiempo de almacenamiento.	37
Figura 7. Granos decolorados como función de las condiciones controladas del aire de enfriamiento mecánico, falta de enfriamiento y el almacenamiento tradicional en sacos.	38
Figura 8. Calidad de la bebida de café según las condiciones del aire enfriado mecánicamente, aire sin enfriar y café almacenado en sacos en forma convencional, según el tiempo de almacenamiento.	39
Figura 9. Influencia de la temperatura del aire de secado en la viabilidad de la semilla de café secada en capas delgadas.	43
Figura 10. Efecto del tiempo y temperatura de almacenamiento del café, durante su almacenamiento prolongado.	44
Figura 11. Germinación normal de las semillas de café obtenidas por desmucilaginado mecánico	46
Figura 12. Esquema del sistema de transporte por gravedad, de café cereza por cable.	55
Figura 13. Tolva seca para la recepción del café cereza.	58
Figura 14. Utilización de transportador de paletas para alimentación de despulpadoras (incluyendo las que conforman los módulos BECOLSUB) y posible separación de objetos duros, mediante captación de señales electrónicas.	61
Figura 15. Despulpadoras de eje horizontal, operadas sin agua.	61

Figura 16. Comportamiento de una cereza madura de café sometida a compresión entre placas paralelas.	62
Figura 17. Comportamiento de una cereza verde de café sometida a compresión entre placas paralelas.	63
Figura 18. Despulpadora No. 3 (tradicionalmente accionada por un motor de 1hp) movida a pedal.	63
Figura 19. Sistema mecánico que permite la calibración de la despulpadora, en operación	66
Figura 20. Esquema general del beneficio ecológico en el cual se utilizan zarandas y tanques tradicionales de fermentación del mucílago	67
Figura 21. Porcentaje de pasillas del café despulpado retiradas en la zaranda plana.	68
Figura 22. Esquema general del sistema de beneficio utilizando la tecnología BECOLSUB.	70
Figura 23. Zaranda para separar granos almendras, impurezas y subproductos, después de secado	70
Figura 24. Lavado del café por agitación manual en el tanque tina. La zaranda plana clasifica el café despulpado	72
Figura 25. Lavado del café con mucílago fermentado en canales de correteo, mediante agitación manual.	72
Figura 26. Motobomba sumergible utilizada para el lavado y transporte del café.	73
Figura 27. Lavado del café, mediante su transporte por motobomba, utilizando cuatro enjuagues.	74
Figura 28. Canal semisumergido para el lavado y clasificación tradicional del café pergamino.	74
Figura 29. Esquema de un sistema de lavado y transporte de café lavado con bomba sumergible, con recirculación de agua.	75
Figura 30. Curvas características de la bomba sumergible marca IHM modelo HWH 10-21-3 de 1 HP, al transportar café lavado.	77
Figura 31. Corte transversal de una semilla de café despulpado ilustrando la distribución y el tamaño relativo del mucílago.	77
Figura 32. Volumen alto de mucílago desprendido en los primeros instantes del proceso de desmucilaginado mecánico.	79
Figura 33. Efecto de la velocidad de rotación de un agitador CENICAFE III (a) en el desprendimiento del mucílago (b) y en la tasa de remoción de mucílago (c).....	80
Figura 34. Comportamiento reológico del mucílago del café y de suspensiones mucílago-café en baba.	81
Figura 35. Diagrama del primer prototipo, DESMULACLA, diseñado y construido en Cenicafe, en 1984, para estudiar el desmucilaginado, lavado y clasificado simultáneos del café.	81
Figura 36. Desmucilaginator por fricción entre capas delgadas, CENICAFÉ- B-I.	83
Figura 37. Esquema del desmucilaginator de barras, CENICAFÉ-B-II	84

Figura 38. Desmucilagador CENICAFÉ-C-I provisto de tornillo sinfín lavador ascendente.....	85
Figura 39. Desmucilagador CENICAFÉ-C-II.....	87
Figura 40. Rotor robusto tipo COLMECANO, compuestos por piñones agitados, fundidos en aluminio, utilizado tradicionalmente en las máquinas repadoras tipo COLMECANO.	87
Figura 41. Aspecto general del módulo DESMULAC desarrollado en Cenicafé	88
Figura 42. Desmucilagador de café en baba, vertical, de flujo ascendente desarrollado por Fukunaga, 1957.	89
Figura 43. Tasa Cortante Promedio Aplicada (TCPA), por una rotor COLMECANO, con agitadores de 13,5cm de diámetro externo y 9,0cm de diámetro interno.	90
Figura 44. Efecto de la velocidad de rotación en el consumo de potencia para un equipo DESLIM 3000, operado con alimentación de 1.500kg de café despulpado/h.....	91
Figura 45. Esquema general, principales componentes y elementos del desmucilagador, lavador, limpiador DESLIM, para café.	93
Figura 46. Imagen virtual del modelo BECOLSUB 100 lograda por computador	95
Figura 47. Imagen virtual interior del equipo DESLIM 300.	95
Figura 48. Desmucilagador modelo DESLIM 1000, constituyente de un equipo BECOLSUB construido por la industria nacional.	97
Figura 49. Modelo DESLIM 3000 con despulpadora de doble disco y capacidad de 2.500kg café cereza/hora	98
Figura 50. Calidad física del café obtenido con el equipo DESLIM 600.	98
Figura 51. Contaminación generada por la utilización del agua posterior al proceso desmucilagador en equipos DESLIM, para la eliminación de los flotes e impurezas.	99
Figura 52. Sistema de zaranda clasificadora, transportador por el sistema cable-disco, 7 tanques de fermentación, y lavado mediante motobomba utilizada para el transporte del café. Cenicafé, Paraguaicito, Quindío.	100
Figura 53. Simplificación del sistema de lavado, limpiando y clasificando el café mediante el módulo BECOLSUB, en una cuarta parte del espacio anterior. Cenicafé, Paraguaicito, Quindío, 1996.....	100
Figura 54. Variables de diseño de un hidrociclón.	102
Figura 55. Hidrociclón en operación, clasificando café pergamino	102
Figura 56. Diagrama que representa la descarga superior del hidrociclón para café.	103
Figura 57. Operación del hidrociclón acoplado a un módulo BECOLSUB, en Cenicafé.	105
Figura 58. Esquema de un transportador neumático de presión positiva.	107
Figura 59. Tornillo sinfín para mezcla y transporte de la pulpa de café con mucílago.	108
Figura 60. Dimensiones principales del rotor del transportador de un tornillo sinfín.....	109

Figura 61. Gráfico utilizado para la selección del diámetro exterior en transportadores de tornillo sinfín para pulpa de café sola o mezclada con mucílago concentrado. .	110
Figura 62. Dimensiones para la construcción de los discos del tornillo sinfín...	112
Figura 63. Módulo demostrativo BECOLSUB, dentro de un beneficiadero construido en guadua. Cenicafé, Chinchiná.	113
Figura 64. Esquema tridimensional del módulo BECOLSUB (Beneficiadero Ecológico, con Manejo de Subproductos)	114
Figura 65. Módulo BECOLSUB, con zaranda cilíndrica para clasificación del café despulpado.	115
Figura 66. Vista lateral del módulo BECOLSUB provisto de zaranda cilíndrica. .	115
Figura 67. Esquema del Módulo BECOLSUB 600 móvil.....	116
Figura 68. Módulo BECOLSUB 600 móvil, remolcado por un vehículo campero..	117
Figura 69. Café de muy alta calidad obtenido con el BECOLSUB móvil.	117
Figura 70. Pulpa mezclada con mucílago, que debe utilizarse preferencialmente como sustrato en un lombricultivo cubierto.	117
Figura 71. Selección del equipo DESLIM y módulo BECOLSUB en función de la producción de la finca y del número de horas de funcionamiento del módulo	118
Figura 72. Comparación de porcentajes de control total de contaminación, con adición de cisco de café al mucílago.	121
Figura 73. Pruebas de campo con el Módulo BECOLSUB 1000 móvil, realizadas en la finca “La Palma”, Cundinamarca	128
Figura 74. Esquema de la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, Caldas ..	130
Figura 75. Central de Beneficio Ecológico de Anserma, Caldas.	130
Figura 76. Esquema del manejo de los subproductos pulpa y mucílago en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, CBEA.	132
Figura 77. Comparación entre los valores estimados de la relación de café cereza al café pergamino seco.	134
Figura 78. Histograma de la calidad del café cereza recibido en la cosecha principal de 1995 en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, Caldas.	135
Figura 79. Influencia del desmucilaginado mecánico en la calidad física del pergamino (Promedio de 29 evaluaciones)	135
Figura 80. Influencia del desmucilaginado mecánico en la calidad física del pergamino (Promedio de 16 evaluaciones)	136
Figura 81. Influencia del desmucilaginado mecánico en la disminución de los granos guayaba (G) y media cara (MC).	136
Figura 82. Influencia del desmucilaginado mecánico en aumento del daño mecánico del café pergamino.	137
Figura 83. Análisis físico de los granos obtenidos del desmucilaginator de pasillas en la Central de Beneficio de Anserma.	137
Figura 84. Recuperación de granos buenos en los flotes del café procesado en la Central de Beneficio de Anserma.	138

Figura 85. Seminario internacional sobre Caficultura Sostenible - Beneficio Ecológico del Café, una Opción Ecológica y Rentable. Octubre, 1996. Fotografía del grupo de participantes y del plegable promocional del evento.	143
Figura 86. Esquema del determinador de Humedad CENICAFÉ MH-2	149
Figura 87. Banco de ocho determinadores de humedad CENICAFÉ MH-2 para control del café recibido y secado en la CBEA.	151
Figura 88. Comparación de dos medidores indirectos de humedad con relación al método estándar de estufa.	154
Figura 89. Secador solar rotatorio para café.	156
Figura 90. Comparación del secado solar con capas de café colocadas 1) en el secador de bandejas rotatorias, 2) sobre una superficie horizontal perforada y 3) sobre un piso de madera, utilizado en los carros secadores tradicionales (77)....	157
Figura 91. Secador Solar con estructura de marquesina de plástico en forma parabólica	157
Figura 92. Comparación del secador de capas de café dispuestas en los carros tradicionales y en el secador solar parabólico	158
Figura 93. Comparación de los efectos de remoción del rastrillo tradicional y el rastrillo revoledor CENICAFÉ	159
Figura 94. Rastrillo provisto de un muelle o resorte para prolongar su vida útil ..	159
Figura 95. Ventilador centrífugo forzando aire a un silo-secador CENICAFÉ.. ...	161
Figura 96. Relaciones de caudales y presiones por el paso del aire a través de capas de granos de café pergamino.	163
Figura 97. Curvas de secado de capa fija sin inversión del flujo del aire	167
Figura 98. Curvas de secado de capa fija con inversión de la dirección del flujo del aire	167
Figura 99. Silo secador tipo CENICAFÉ para café pergamino, en capas estáticas de secado y presecado, con inversión de la dirección del flujo del aire. Descarga neumática	168
Figura 100. Esquema de un silo-secador vertical de dos capas estáticas, provisto de inversión de la dirección del flujo del aire, solamente en la cámara de secado..	169
Figura 101. Equipo de secado "EScafé" para el aprovechamiento de energía calorífica en los hogares campesinos	172
Figura 102. Secadores intermitentes de flujos concurrentes, CENICAFÉ-IFC.	173
Figura 103. Esquema de un secador intermitente de flujos concurrentes, CENICAFÉ-IFC.	174
Figura 104. Diagrama tridimensional de un Secador Intermitente, de Flujos Concurrentes, CENICAFÉ-IFC.	175
Figura 105. Uniformidad en las diferencias entre las humedades absolutas de entrada y de salida al secador	176
Figura 106. Curva de secado obtenida en los secadores CENICAFÉ-IFC. Se caracteriza por la reducción lineal, y humedad uniforme durante el tiempo de secado.	176

Figura 107. Comparación entre las temperaturas del aire de secado y de las temperaturas de los granos en una operación típica de los secadores CENICAFÉ-IFC..	177
Figura 108. Calidad del café pergamino seco en el secador IFC de torre	178
Figura 109. Uniformidad del café pergamino seco en el secador IFC de torre, Anserma, Caldas.....	179
Figura 110. Calidad de la almendra del café secado en el secador IFC de torre, Anserma, Caldas.....	179
Figura 111. Curva de contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, calculada con la Ecuación 11.	181
Figura 112. Curvas de capa delgada para secado y almacenamiento de café pergamino, calculadas con la Ecuación 14	183
Figura 113. Comparación de datos experimentales y curvas simuladas de enfriamiento (modelo de Thompson) de café pergamino, colocados a granel, en silos. .	186
Figura 114. Comparación de datos experimentales y curvas simuladas de secado de café, colocados en capas estáticas a dos alturas diferentes	187
Figura 115. Comparación de datos experimentales con curvas de simulación de secado de café pergamino, en secador intermitente de flujos concurrentes, IFC, mediante dos modelos matemáticos (M.S.U. y de Thompson)	187
Figura 116. Pérdida o ganancia en la venta del café lavado al recibir la mitad del peso como equivalente a café pergamino seco	194
Figura 117. Diagrama de flujo del método CERPER original para el recibo de café cereza..	197
Figura 118. Valores de rendimientos determinados por los métodos de vía húmeda, vía seca y el método CERPER original, comparados con el rendimiento real..	198
Figura 119. Desmucilagador. Determinador de Humedad MH-2, Despulpadora. (Elementos del método CERPER modificado, Anserma, Caldas.).....	199
Figura 120. Diagrama de flujo del método CERPER modificado.	200
Figura 121. Comparación de rendimientos reales y estimados por dos métodos de cálculo evaluados en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma..	200
Figura 122. Lechos del lombricultivo irrigados con aguas residuales no controladas en el beneficio de café.....	204
Figura 123. Almacenamiento de pulpa mezclada con mucílago de café en la fosa cubierta, materia prima para el lombricultivo en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, Caldas.	206
Figura 124. Lombrices en preparación para la recolección en el lombricultivo. .	207
Figura 125. Recolección del abono orgánico, resultado del lombricultivo con pulpa de café.	208
Figura 126. Secado del abono orgánico en un Secador Solar Parabólico.	209
Figura 127. Características básicas aplicables a los beneficiaderos tradicional y BECOLSUB.	225
Figura 128. Características de los módulos BECOLSUB	226
Figura 129. Características económico-financieras relacionadas con los módulos BECOLSUB.	227

Figura 130. Variables de respuesta correspondientes a cálculos físicos y económicos.	228
Figura 131. Resumen de los datos de entrada y de respuesta del programa ANEFSUB.	229
Figura 132. Resultados de la relación beneficio/costo vs. pérdidas física y pago por contaminación	230
Figura 133. Gráfico de la relación beneficio/costo ajustada teniendo en cuenta la eliminación de las pérdidas físicas y los pagos por contaminación	231
Figura 134. Selección de la variable de estudio y de la relación beneficio/costo deseado.	231
Figura 135. Selección de la variable de estudio	232
Figura 136. Resultado del valor de la variable de estudio.	232
Figura 137. Reactores hidrolítico y metanogénico del sistemas de descontaminación de aguas residuales del lavado del café.	238
Figura 138. Esquema del sistema de tratamiento de aguas de lavado del café, por medio de reactores metanogénicos.	238

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Calificación de las características sensoriales de las variedades de café <i>Coffea arabica</i> L. cultivadas en Colombia*.....	20
Tabla 2. Defectos del grano y de la bebida de café de acuerdo con la etapa del proceso de cultivo, beneficio y trilla.....	22
Tabla 3. Calidad de la bebida del café obtenido con remoción mecánica del mucílago.....	31
Tabla 4. Evaluación comparativa de la calidad en taza del café obtenido con fermentación natural y desmucilaginado mecánico.....	31
Tabla 5. Condiciones controladas del aire y su influencia en el contenido final de humedad de los granos.....	38
Tabla 6. Comparación de los granos decolorados según el sistema de almacenamiento empleado luego de 1 año de almacenamiento.....	39
Tabla 7. Condiciones de almacenamiento de la semilla de café, en tres pisos térmicos en la zona cafetera colombiana.....	43
Tabla 8. Promedios de los valores de germinación de la semilla obtenida en diferentes modelos BECOLSUB.....	47
Tabla 9. Porcentaje de daño de doble raíz causado por diferentes modelos BECOLSUB utilizado para despulpar y desmucilagar mecánicamente la semilla de café.....	47
Tabla 10. Porcentaje de raíz bifurcada causado por diferentes modelos BECOLSUB utilizados para el despulpado y el desmucilaginado mecánico de la semilla de café.....	47
Tabla 11. Ángulos de deslizamiento en grados, para el café en diferentes estados y sobre distintas superficies*.....	57
Tabla 12. Dimensiones y capacidad de tolvas de 1,2m de altura, para el recibo de café en cereza.....	59
Tabla 13. Dimensiones y capacidad de tolvas de 1,4m de altura para café cereza... ..	59
Tabla 14. Porcentaje de pasillas de café retiradas en la zaranda plana ubicada después de la despulpadora.....	68
Tabla 15. Calidad física del café procesado en el beneficiadero para el pequeño caficultor de Cenicafé (13).....	69
Tabla 16. Composición química del mucílago del café. Tomado de Ríos (149) ...	78
Tabla 17. Parámetros obtenidos en la evaluación del desempeño del desmucilagador prototipo DESMULACLA.....	82

Tabla 18. Desempeño comparativo de diferentes desmucilagadores evaluados en Cenicafé.	84
Tabla 19. Desempeño comparativo de diferentes desmucilagadores mecánicos desarrollados en Cenicafé.	86
Tabla 20. Desempeño comparativo de desmucilagadores mecánicos.	87
Tabla 21. Características principales de los tres modelos DESLIM para desmucilagar mecánicamente el café.	92
Tabla 22. Niveles de producción anual de café (ton y @ cps/año) y módulos BECOLSUB apropiados.	93
Tabla 23. Características técnicas de los equipos DESLIM y los módulos BECOLSUB 100, 300, 600, 1000 y 3000 (kg de café cereza/hora).	96
Tabla 24. Dimensiones del hidrociclón experimental de Cenicafé para la clasificación del café.	103
Tabla 25. Dimensiones del hidrociclón para diferentes condiciones de bombeo....	103
Tabla 26. Desempeño del prototipo de un hidrociclón, diseñado para lavado y clasificación de café pergamino. (19*, 182**, 95***)	104
Tabla 27. Velocidades mínimas del aire para el transporte neumático, vertical y horizontal de café pergamino y de la pulpa de café.	107
Tabla 28. Potencias y diámetros de ejes en tubería galvanizada, recomendados para transportadores de tornillo sinfín con pulpa sola o mezclada con mucílago concentrado.	111
Tabla 29. Dimensiones de los discos para la construcción del rotor del transportador de tornillo sinfín.	112
Tabla 30. Variables y unidades utilizadas en los círculos para seleccionar el módulo BECOLSUB.	119
Tabla 31. Actividad de la lombriz roja californiana <i>Eisenia foetida</i> Savigny en dos sustratos.	121
Tabla 32. Caracterización del café cereza recibido. (Muestras de 500g).	122
Tabla 33. Caracterización del café despulpado (Muestra de 100g).	123
Tabla 34. Caracterización del café desmucilaginado (Muestra de 100 g).....	124
Tabla 35. Caracterización del café pergamino seco proveniente del beneficio en un BECOLSUB móvil (Muestra de 100g).	124
Tabla 36. Velocidades de giro de los diferentes ejes del BECOLSUB móvil (rpm)..	125
Tabla 37. Capacidad de proceso del módulo BECOLSUB 600 móvil.	125
Tabla 38. Consumo de agua del módulo BECOLSUB 600 móvil.	126
Tabla 39. Flujos de agua+mucílago generados por en el BECOLSUB 600 móvil...	126
Tabla 40. Flujos de agua + mucílago, drenados y análisis de DQO.	126
Tabla 41. Control de la contaminación generada, por el módulo BECOLSUB 600 móvil.	127
Tabla 42. Desempeño general de la tecnología BECOLSUB móvil, en el beneficio de café.	127
Tabla 43. Desempeño general de la tecnología BECOLSUB 1000 móvil.	129

Tabla 44. Tasas de producción de lombricomposteo obtenidas en la CBEA, 1996..	138
Tabla 45. Contenidos de humedad de muestras de café pergamino húmedo obtenidos en la estufa y en cinco determinadores de humedad MH-2. Se incluyen los límites de confianza para el promedio al 5%.	152
Tabla 46. Comparación del daño mecánico producido por la utilización del rastrillo tradicional y el rastrillo revolovedor, de dientes, CENICAFÉ.	160
Tabla 47. Selección del sistema y especificaciones de secado según la producción de la finca	161
Tabla 48. Caudales recomendados para el secado del café pergamino en capas estáticas.	162
Tabla 49. Poder calorífico de algunos combustibles utilizados en Colombia.	166
Tabla 50. Tiempo total de secado para cada plataforma y para cada prueba, en un secador solar de carros. Humedad final = 11%.	170
Tabla 51. Valores obtenidos de la energía disponible, la energía utilizada en el secado, el tiempo de secado y el contenido de humedad final.	173
Tabla 52. Pérdidas o ganancias por comercialización del café lavado*.	193
Tabla 53. Pérdidas de peso del café durante el proceso de fermentación según Carbonel y Vilanova (32).	195
Tabla 54. Pérdidas de peso del café durante el proceso de fermentación según Boyce (27).	195
Tabla 55. Caracterización de la borra del café procedente de la Fábrica de Café Liofilizado, Chinchiná, utilizada para preparar el manto de lodos anaeróbicos.	239
Tabla 56. SMTA prototipos instalados en finca y promedios de remoción de DQO estimadas. 1994.	240
Tabla 57. Características de las corrientes líquidas del SMTA Cenicafé durante pruebas de esfuerzo	241
Tabla 58. Densidades y equivalencias aproximadas de peso entre los diferentes estados del café, de la pulpa y del cisco.	265

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación < 1 > Pérdidas de presión en una tubería vertical de agua con café, en función de la velocidad y de la concentración	76
Ecuación < 2 > Pérdidas de presión en una tubería horizontal de agua con café, en función de la velocidad y de la concentración	76
Ecuación < 3 > Producción de la finca en kilogramos de cps por día $PFKPpD = PF@PpA \times REL@aK \times PDP / 100$	119
Ecuación < 4 > Producción de la finca en kilogramos de cc por día $PFKCCpD = PFKPpD \times RelCCaP$	119
Ecuación < 5 > Capacidad horaria de la unidad BECOLSUB $CapB = PFKCCpD / HorOp$	119
Ecuación < 6 > Caudal específico como función de la pérdida de presión específica para café pergamino.	162
Ecuación < 7 > Pérdida de presión específica como función de la pérdida del caudal específico para café pergamino	162
Ecuación < 8 > Potencia necesaria para que el ventilador suministre el caudal y la presión requeridos para el correcto secado del café pergamino	163
Ecuación < 9 > Balance general de energía.	165
Ecuación < 10 > Cantidad de energía calorífica necesaria para aumentar la temperatura del aire que fluye con un caudal Q.	166

Ecuación < 11 > Contenido de humedad (% base seca) de equilibrio del café pergamino, como función de la humedad relativa (dec) y la temperatura (°C).....	181
Ecuación < 12 > Calor latente de vaporización del café pergamino.	181
Ecuación < 13 > Ecuación de secado de capa delgada de café pergamino, en forma diferencial.	182
Ecuación < 14 > Ecuación de secado de capa delgada de café pergamino, integrada para condiciones controladas del aire.	182
Ecuación < 15 > Ecuación de Fick, que describe la distribución de la humedad dentro del café pergamino	183
Ecuación < 16 > Difusión de humedad dentro de un grano de café en función de su humedad y temperatura.	184
Ecuación < 17 > Calor específico del café pergamino	185
Ecuación < 18 > Densidad aparente del café pergamino, en función del contenido de humedad	185
Ecuación < 19 > Principio básico de rentabilidad	221
Ecuación < 20 > Comparación de ingresos de las dos tecnologías de beneficio en un período dado de análisis.	222

PRESENTACIÓN

Nos complace presentar este libro que expresa el resumen de las investigaciones de más de una década realizadas por científicos de Cenicafé, en torno al tema del Beneficio Ecológico del café colombiano, con el soporte científico de universidades del país y validadas en su oportunidad y en sus distintas etapas en experiencias con los caficultores del país.

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, ha puesto su mayor empeño en desarrollar tecnologías efectivas que propendan por el bienestar de quienes se dedican a la producción de café, para aportarles a su tarea cotidiana elementos técnicos y científicos aplicables, generados en la investigación profunda y concienzuda, y perfectamente adaptados a sus necesidades.

El libro, además, espera ofrecer nuevos aportes a los técnicos del Servicio de Extensión de nuestra Institución y a los caficultores en general, elementos necesarios para la caficultura del futuro en la que el equilibrio ecológico y la sostenibilidad serán elementos fundamentales.

Antonio Herrón Ortiz

Gerente Técnico

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia

PRÓLOGO

Esta publicación presenta ante la comunidad cafetera colombiana los avances de la investigación aplicada en el beneficio del café y se espera que se constituya en la guía conceptual y práctica, básica, para apoyar el actual programa de la FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA que busca la transformación de los beneficiaderos existentes y la construcción de nuevos beneficiaderos que reúnan las especificaciones que los caracterice como beneficiaderos ecológicos.

Se pretende con las tecnologías consignadas en esta obra que el café conserve, durante los procesos de transformación de cereza a pergamino seco, su calidad intrínseca, cumpliendo con las normas de comercialización. Con ello, se logra la mayor rentabilidad para el caficultor, se altera en mínimo grado la calidad del agua utilizada que además, es la estrictamente necesaria para efectuar el beneficio por vía húmeda, y se logra un manejo apropiado de los subproductos.

Esta obra se basa esencialmente en las investigaciones realizadas en los últimos quince años en Cenicafé, período en el que se creó el PROGRAMA DE POST-COSECHA, conformado por las disciplinas de Ingeniería Agrícola y Química Industrial.

Gracias al apoyo de la FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS y al aporte científico de las universidades colombianas, principalmente de los programas de Ingeniería Agrícola, a través de las actividades de año sabático de ocho profesores y de tesis de cincuenta estudiantes, el PROGRAMA DE POST-COSECHA en un período relativamente corto, ha logrado proponer modificaciones sustanciales en todas las etapas del beneficio tradicional del café que se practica en nuestro país y en los países que utilizan comercialmente el sistema de beneficio por vía húmeda, desde los propios inicios de la producción comercial del grano. Estos nuevos procedimientos no alteran la calidad del café, favorecen la conservación del medio ambiente y hacen más rentable el negocio.

La fundamentación teórica integral de los trabajos y la continuidad de las ejecuciones resultantes de la programación científica a largo plazo, permiten presentar las técnicas de carácter ecológico y rentable del beneficio húmedo y las recomendaciones válidas para obtener la reconocida calidad del café colombiano, la eliminación de etapas innecesarias, la simplificación de la mayoría de los procedimientos y la disminución significativa de las pérdidas cualitativas y cuantitativas que ocurren en el beneficio tradicional del café. Además, coincide su aplicación con menores necesidades de mano de obra y menor requerimiento de espacio.

En especial, se recomienda la transformación en forma simple y eficiente de los subproductos pulpa y mucílago, causantes de contaminación, en productos de valor comercial como el abono orgánico y la proteína animal.

Muchas fueron las etapas constructivas de la nueva tecnología, desde los estudios preliminares tendientes a utilizar la fuerza de la gravedad o minimizar los consumos de agua en el transporte del café en los diferentes estados y de la pulpa, hasta conseguir la amplia aceptación nacional e internacional de la tecnología. Hace unos cinco años estábamos relativamente lejos de esta realidad. De no haberse contado con el continuado apoyo de la FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA, todo el esfuerzo pudiera haber quedado en una ilusión, como ocurre con la gran mayoría de las investigaciones de largo plazo en los países en desarrollo.

Otros temas de gran importancia técnica y económica relacionados con la industria productora del café son: 1) el secado del café pergamino, 2) el almacenamiento del grano del café y de la semilla, 3) las alternativas de la comercialización del café incluyendo la determinación exacta y rápida de la conversión café cereza a café pergamino seco, 4) la descontaminación, por medios biológicos, de las aguas residuales que no fue posible eliminar físicamente. Estos también fueron temas de investigación y de novedosos resultados que, de aplicarse masivamente, permitirán obtener más café y de mayor uniformidad de humedad final en el secado, mantener la excelente calidad del café pergamino y de la semilla, durante un tiempo mayor que el doble del empleado en el almacenamiento convencional, permitir una comercialización justa, por el pago adecuado al productor y por último controlar en forma complementaria el 97% de la contaminación potencial.

En forma general, consideramos que este aporte de la ingeniería aplicada a la producción agrícola, tema específico de la nueva carrera de Ingeniería Agrícola en Colombia, puede ser repetida y superada para otros productos agrícolas y pecuarios. No es extraño que los aportes técnicos a la producción de los productos agrícolas primarios de los países en desarrollo sólo tengan lugar al final del presente siglo. Así ocurre en todos los países en desarrollo y para todas las materias primas. Simplemente muy pocos ingenieros han tenido la oportunidad de investigar, a largo plazo, alternativas a los problemas propios de éstos países que han conservado por más de un siglo las tecnologías que los colonizadores improvisaron. La FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA, con la visión que siempre la ha caracterizado, le ha dado, en el caso del café en Colombia, la oportunidad, el ambiente, y los recursos necesarios a un pequeño grupo de ingenieros investigadores para producir el cambio.

En un período de más de una década de desarrollo tecnológico, en un Centro de importancia nacional e internacional como Cenicafé, son muchas y valiosas las ayudas recibidas. Queremos expresar nuestros agradecimientos a las directivas de la Federación Nacional de Cafeteros y a Cenicafé por el soporte brindado siempre en forma oportuna y continua.

Nuestro reconocimiento a quienes crearon y consolidaron el PROGRAMA DE POST-COSECHA en Cenicafé, en particular a los doctores Germán Valenzuela Samper, ex-Subgerente General Técnico de FEDERACAFÉ; Silvio Echeverri Echeverri, ex-Director de Cenicafé; Óscar Cardona Álvarez, ex-Jefe del Departamento Administrativo de Cenicafé; Antonio Herrón Ortíz, Gerente Técnico de FEDERACAFÉ, y Gabriel Cadena Gómez, Director de Cenicafé.

A los departamentos de Ingeniería Agrícola de las universidades colombianas, a los Comités Departamentales de Cafeteros y a los mecánicos y los auxiliares del Programa de POST-COSECHA que construyeron, con gran profesionalismo, dedicación y esmero, la infraestructura en la que hemos trabajado, incluyendo plantas industriales de gran capacidad, como la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, Caldas.

Agradecemos a las industrias colombianas que entendieron y compartieron el esfuerzo naturalista de la Federación de Cafeteros y trabajaron armónicamente con Cenicafé, para ofrecer a los agricultores la tecnología BECOLSUB. A los doctores Hernando Duque Orrego, de Cenicafé y al doctor Alfonso Parra Coronado, de la Universidad Nacional - Bogotá, por las correcciones y sugerencias al manuscrito. Al doctor Fernando Álvarez Mejía, de la Universidad Nacional de Medellín, por las múltiples y muy valiosas colaboraciones.

Gonzalo Roa Mejía.

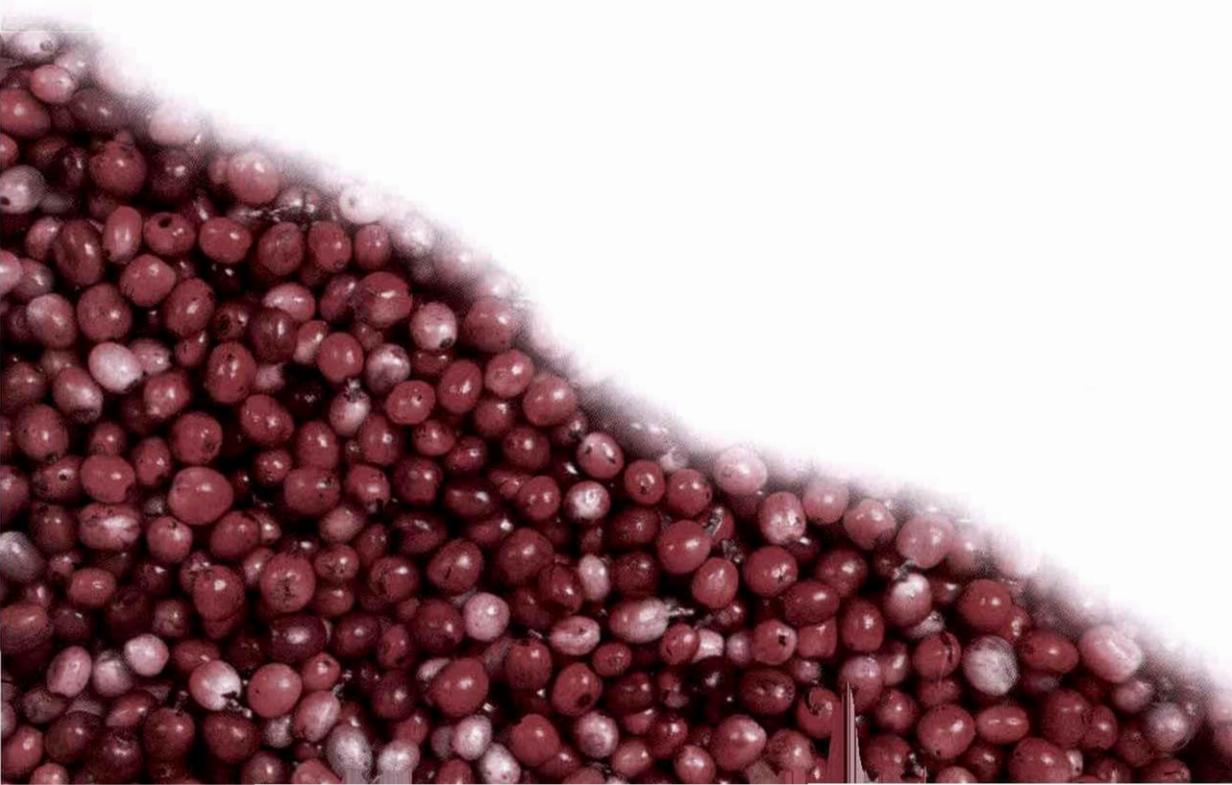
Editor

Chinchiná, Caldas, Colombia.

CAPÍTULO

Generalidades

1





GENERALIDADES ¹

El fruto de café maduro, denominado **café cereza** (cc) está compuesto por la **pulpa**, formada por el exocarpio (epidermis) y parte del mesocarpio; el color de la epidermis varía de verde (clorofila) a amarillo y rojo (antocianinas) y depende de la variedad de café y del grado de maduración del fruto. Envuelto por la epidermis se encuentra el **mucílago** o mesocarpio, constituido por una capa gruesa de tejido esponjoso de aproximadamente 0,5mm de espesor, rico en azúcares y pectinas y que rodea los dos granos enfrentados por su cara plana. Los granos o **almendras** se encuentran revestidos por una doble membrana: la primera llamada comúnmente **pergamino** (endocarpio), de color amarillo pálido y de consistencia dura y frágil; la segunda, llamada **película plateada** (tegumento seminal) más fina que la anterior y adherida al grano (albumen). En la base del grano y sobre su cara interna se encuentra el **embrión** o germen.

Según la Norma de Calidades de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (68), café es todo aquel grano de café almendra, verde o **crudo** cubierto por el endocarpio (pergamino), el cual se encuentra **seco de trilla**. El **pergamino tipo Federación** debe estar fresco y presentar las características correspondientes, esto es, contenido de humedad entre el 10% y el 12% (base húmeda, b.h.); grano pelado hasta un 2% en peso con base en pergamino; guayaba y media cara hasta un 3% en peso, con base en pergamino; pasilla hasta un 5,5% en peso, con base en almendra; libre de olores extraños o de cualquier tipo de contaminación; libre de todo insecto vivo o muerto; color del pergamino uniforme; admite materia extraña y/o impurezas hasta un 0,5% en peso y la prueba de taza debe tener sabor y aroma característicos, libre de sabores defectuosos como fermento, producto químico, moho, reposo, etc. **Pasilla** es todo grano de café defectuoso, como: grano negro, cardenillo, vinagre, cristalizado, decolorado, mordido o cortado, picado por insectos, deformado, inmaduro, aplastado, flotador o balsudo y flojo. **Rendimiento en el beneficio del café** es la relación entre la masa del café cereza recibido de los lotes de producción y el café pergamino seco, tipo Federación obtenido en el beneficio. **Rendimiento en la trilla** es la relación entre la masa del café pergamino y el café excelso de exportación.

¹ En el Apéndice A se presentan las densidades y relaciones aproximadas entre cada uno de los estados del café y de sus subproductos.

Grano trillado o pelado es aquel que por acción de distintas fuerzas presenta pérdida de más de la mitad de su pergamino. Grano **almendra o verde** es el grano de café seco, sin el pergamino. Grano **mordido** es el que, por diferentes causas, presenta ruptura de la almendra. Grano **guayaba**, aquel que después del proceso de beneficio permanece recubierto por la totalidad de la pulpa seca. Grano **mediacara** es aquel que después del beneficio permanece recubierto por más de la mitad de la pulpa. **Impurezas** son los residuos de pulpa, pergamino y materiales extraños al café pergamino seco.

Se denomina comúnmente como **café corriente** al grano de café que no cumple con las exigencias del café tipo Federación, pero que dadas sus aceptables características, se comercializa.

La unidad de medida de peso del café comúnmente utilizada en Colombia es la **arroba (@)** que equivale a 12,5kg. La **carga** equivale a 10 arrobas.

La pulpa y el mucílago del café no son elementos tóxicos o venenosos; por el contrario, son productos orgánicos que debidamente manejados pueden representar un alto valor agregado para el caficultor. En particular, como se demostrará en este trabajo, en su forma simple o mezclados tienen uso inmediato para producir abono orgánico y proteína animal de buena calidad.

La **contaminación** que la pulpa y el mucílago producen se debe a que parte de su materia orgánica se disuelve o queda en suspensión en las aguas, en las diferentes etapas del transporte y del beneficio. El material orgánico disuelto puede retirar o consumir muy rápidamente el oxígeno del agua que lo contiene, en un proceso natural de oxidación. La pulpa y el mucílago contenidos en un kilogramo de café cereza (cc) pueden retirarle todo el oxígeno a 7,4 metros cúbicos de agua pura, propiciando su rápida putrefacción en 24 horas.

La pulpa separada del grano en ausencia de agua representa el 72% de la contaminación potencial en un proceso de beneficio tradicional. El mucílago que queda sobre el grano representa el 28% restante. Si el café se deja en tanques con agua corriente se genera contaminación adicional a medida que el grano pierde materia seca por difusión. La contaminación potencial que puede causar la pulpa mal manejada es muy alta, debido a su alto contenido orgánico y debido a que, si se transporta hidráulicamente, puede perder hasta la mitad de su contenido de materia seca. La producción de pulpa anual fresca en Colombia es del orden de 2,5 millones de toneladas y la del mucílago de 1,3 millones.

Es práctica muy común en el beneficio de café por vía húmeda en Colombia y en otros países productores de café, utilizar agua en prácticamente todas las etapas del proceso del café: en el transporte del campo a los beneficiaderos, por medio de cafeductos; en las tolvas húmedas de recepción del café cereza; en el transporte del café cereza a los tanques sifones (clasificadores hidráulicos de café cereza por

diferencia de densidad); en el transporte del café cereza a las despulpadoras; en el transporte de la pulpa al lugar de su depósito, o a las quebradas y ríos; en el transporte del café en baba a los tanques de fermentación; en el lavado del mucílago fermentado; en las diferentes etapas de clasificación del café cereza o del café pergamino húmedo y en el transporte del café lavado a los secadores.

1.1. DEFINICIÓN

No obstante es posible elaborar una definición muy completa sobre beneficio ecológico del café, en la cual se consideren las diferentes posibilidades de alterar el ambiente en las diferentes prácticas, incluyendo la contaminación del aire en el secado del café y la del ruido producido por los equipos, entre otras, este trabajo se limita a la alteración que se hace del agua utilizada, la más importante, y que se constituye en problema grave en prácticamente todos los beneficiaderos que funcionan en Colombia y en los países en los que se procesa el café por vía húmeda.

Una definición satisfactoria es la siguiente: **“Beneficio ecológico del café por vía húmeda es un conjunto de operaciones realizadas para transformar el café cereza en café pergamino seco, conservando la calidad exigida por las normas de comercialización, evitando pérdidas del producto y eliminando procesos innecesarios, lográndose además, el aprovechamiento de los subproductos lo cual representa el mayor ingreso económico para el caficultor y la mínima alteración del agua estrictamente necesaria para el beneficio”**.

El **lavado** del café, es el único proceso en el que se requiere indispensablemente el agua. En los trabajos de investigación de Cenicafe (192) se demostró que es posible efectuar un lavado completo del mucílago fermentado con menos de 5 litros (L) de agua por kilogramo de café pergamino seco (cps) y que con solo 2L/kg cps, es posible retirar cerca del 90% del mucílago que queda en contacto con el café pergamino, después de la fermentación (Sección 3.8.). También se encontró (112) que es posible desmucilaginar el café mecánicamente, lavarlo y limpiarlo, con consumos de agua de 0,6L/kg cps (Sección 3.10.). Los valores de consumo de agua mencionados están muy distantes de los valores reales de consumo de agua en muchos de los beneficiaderos existentes, donde se utiliza alrededor de 40L/kg cps. Por tanto, el potencial de reducción de agua y la disminución de la contaminación causada en el beneficio húmedo del café es muy grande.

Finalmente se ha demostrado que los productos tradicionalmente contaminantes, la pulpa y el mucílago, pueden ser manejados adecuadamente en el mismo momento en que se efectúa el beneficio, para controlar más del 90% de la contaminación potencial. A esta tecnología se le ha denominado **BECOLSUB** (**BE**neficio **ECOL**ógico y Manejo de **SUB**productos). Al elemento principal del módulo, el desmucilaginador mecánico, se le denominó **DESLIM** (**DES**mu-cilaginador **L**avador – **LIM**piador) y se describe ampliamente en la Sección 3.10.4.

1.2. PROCEDIMIENTOS COMPLEMENTARIOS PARA REALIZAR EL BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ

Existen en principio dos prácticas, mutuamente complementarias, para realizar el beneficio ecológico. La primera consiste en racionalizar el proceso de beneficio convencional eliminando las etapas no necesarias como el transporte hidráulico, la fermentación del mucílago, la excesiva clasificación o separación del café, disminuyendo el consumo de agua. El segundo consiste en eliminar la materia orgánica contenida en las aguas residuales del beneficio.

La racionalización del beneficio tradicional permite además, utilizar casi la totalidad de los materiales contaminantes (pulpa y mucílago) para transformarlos en productos de mayor valor, como son el lombricompost y la proteína animal (Capítulo 6).

Si se utiliza el desmucilaginador mecánico y en particular la última versión del equipo DESLIM desarrollado en Cenicafé (112), es posible disponer simultáneamente y en flujo continuo de: **mucílago** altamente concentrado mezclado con **residuos** provenientes de los granos guayabas y mediacaras, de granos y pasillas trituradas que no resistieron los esfuerzos mecánicos, y de **pulpa**. Estos elementos se mezclan uniformemente en un tornillo sinfín (Sección 3.13.), que es además un mecanismo de transporte que genera un nuevo tipo de sustrato fácilmente consumido por la lombriz roja (*Eisenia foetida*). De esta forma es posible controlar aproximadamente el 92% de la contaminación potencial utilizando métodos físicos. El café lavado y limpio que proviene del desmucilaginador, puede ir directamente al secador. Si la materia prima no es de muy buena calidad, se aconseja utilizar un método de clasificación complementario como el hidrociclón (Sección 3.11.).

La inclusión o utilización de un desmucilaginador mecánico, que no reúna las características descritas, no garantiza que la contaminación disminuya. Por el contrario, si se utiliza un desmucilaginador no optimizado en su construcción y operación y volúmenes de agua superiores a 1,0 litro por kilogramo de café pergamino seco, o no se mezclan la pulpa y los residuos liberados, la contaminación causada es muchas veces mayor que la que se obtendría sin la introducción del desmucilaginador mecánico. En efecto, el uso de desmucilaginadores que no tengan en cuenta las características indispensables anotadas, origina mayor contaminación por la introducción de nuevos elementos originados en el funcionamiento del desmucilaginador, en comparación con la técnica del despulpado sin agua, fermentación convencional, el lavado racional y el manejo apropiado de la pulpa.

El segundo procedimiento de beneficio ecológico, como lo conceptúa Cenicafé, consiste en eliminar la materia orgánica de las aguas contaminadas por diferentes medios, incluyendo los **biorreactores** (191,194). El método puede ser utilizado para tratar las aguas de lavado, (192) después de efectuar la fermentación convencional del mucílago del grano. Este procedimiento permite reducir el 90% de la

contaminación de las aguas de lavado, lo que equivale a evitar el 25% de la contaminación total, que sumada a la reducción del 72% por el manejo adecuado de la pulpa, permite un control global del 97% de la contaminación potencial. Los adelantos de Cenicafe en el desarrollo de biodigestores se presentan en el Capítulo 8 y en la reciente publicación de Zambrano *et al* (194).

Es posible utilizar el sistema de descontaminación de las aguas por medio de biorreactores, como complemento de la tecnología BECOLSUB, en grandes fincas y en Centrales de beneficio, para descontaminar el 8% de contaminación existente en los líquidos que no es posible controlar, hasta el momento, por los métodos físicos.

1.3. CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS POR EL BENEFICIO DEL CAFÉ

La utilización del oxígeno del agua por los residuos orgánicos del beneficio del café, pueden ocasionar los siguientes problemas:

- Muerte de los animales acuáticos y de las plantas por falta de oxígeno y por la alta acidez del agua.
- Proliferación de microorganismos indeseables.
- Impotabilidad e inutilización de las aguas para el uso doméstico.
- Inutilización de las aguas para el uso industrial, incluyendo el beneficio del café en otros beneficiaderos.
- Proliferación de malos olores, atracción de moscas y otros insectos y deterioro del paisaje.

1.4. CONSUMO DE AGUA Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Teniendo en cuenta que tradicionalmente el beneficio del café utiliza aproximadamente 40L de agua por kilogramo de café pergamino seco, (12,5 % en el despulpa-do; 37,5% en el lavado y transporte del grano y 50% en el transporte de la pulpa) se necesitarían 46 millones de metros cúbicos de agua al año para realizar el beneficio de 16,7 millones de sacos de café verde (60kg) en Colombia. Este volumen es equivalente al consumo humano de una ciudad de 840.000 habitantes en un año, asumiendo que cada persona consume 150L de agua por día.

Además, es indispensable disponer de suficiente cantidad de agua almacenada para evitar pérdidas completas durante el beneficio, en caso de que no se disponga de cantidades suficientes en las fuentes de suministro directo.

El volumen de los tanques de almacenamiento se calcula dependiendo de la disponibilidad de agua en la región. El valor mínimo recomendado es el equivalente por lo menos, al consumo en 2 **días pico**². El volumen de los tanques de almacenamiento de agua necesario para el beneficio nacional sería, por tanto, de 1,84 millones de metros cúbicos, lo que representa un costo de aproximadamente 140 mil millones de pesos (US \$70,5 millones).

1.5. EVALUACIÓN PARCIAL DEL BENEFICIO ECOLÓGICO DESARROLLADO POR CENICAFÉ

Cuando se adoptó el programa de estímulos para la conversión de beneficiaderos convencionales en beneficiaderos ecológicos en 1994 (69) la Gerencia Técnica de la Federación Nacional de Cafeteros contrató los servicios de investigación de la Universidad de los Andes, para que se evaluara económicamente el programa.

Después de la primera fase de adopción del programa en más de 3.000 fincas y entrevistados 370 caficultores en todos los Comités del país, considerada la opinión de los Directores Técnicos de los Comités Departamentales de Cafeteros, los ingenieros de beneficio y los Extensionistas, el equipo de evaluación de UNIANDES concluyó que la inversión podría ser **rentable** para la mayoría de los caficultores. La inversión se podría pagar generalmente entre uno y tres años. Además, se recomendó que el modelo BECOLSUB (Sección 3.14.), que contiene la tecnología optimizada, debería adoptarse como la opción básica. (23).

² Día pico es aquel en el que se procesa la mayor cantidad de café en la finca. La capacidad global del beneficiadero se diseña con base en este valor.

CAPÍTULO

La Calidad del Café

2





LA CALIDAD DEL CAFÉ

2.1. ASPECTOS GENERALES ^{3, 4}

La calidad de los alimentos se define según su valor nutritivo, estado sanitario, características organolépticas y aceptación del consumidor. El valor nutritivo indica cómo contribuye un alimento a una dieta balanceada, por su composición en proteínas, carbohidratos, grasas, minerales y vitaminas esenciales para la salud. Sanitariamente implica la ausencia de agentes contaminantes químicos y microbianos en el alimento. El sabor, el aroma, el color, la textura son propiedades sensoriales de los alimentos.

Desde el punto de vista del consumidor se pueden distinguir varios niveles de calidad: calidad esperada de un producto, calidad inducida por una marca, clase o procedencia y calidad efectiva, la cual mide las características del producto y permite aceptarlo o rechazarlo (15, 84).

Para algunos productos como el café, las **características sensoriales** son más importantes que su valor nutritivo.

La apariencia, el color y el olor del grano de café pergamino, almendra y tostado, así como las cualidades organolépticas de la bebida que comprenden el aroma, la acidez, el amargor, el cuerpo y el sabor, constituyen la calidad física y organoléptica del café (133, 143, 147).

Más de cuatrocientos compuestos orgánicos e inorgánicos contribuyen al **sabor** distintivo del café, en tanto que el aroma está constituido por más de setecientas sustancias, principalmente aldehídos, cetonas, ésteres e hidrocarburos de bajo peso molecular (90). Muchos de estos compuestos se encuentran en trazas y no puede considerarse uno solo, como el componente primario del café. De hecho, muchos de sus componentes naturales, cuando se separan de éste y se concentran, tienen

³ Preparado por Puerta Q., G. I. Química Industrial, Cenicafé.

⁴ Para el más adecuado entendimiento de esta sección, con relación a términos descriptivos de la calidad del café, de uso internacional, se incluye en el capítulo 9, Apéndice B, la descripción y origen de los principales sabores y términos organolépticos del café (15, 57, 143).

sabores y olores muy diferentes al café. Otros componentes son inestables y se evaporan o combinan con otros formando compuestos con otros sabores y olores (44, 47, 49, 90).

El **análisis organoléptico o sensorial**, es decir, el estudio de aquellas propiedades de los alimentos que afectan los órganos de los sentidos del consumidor, es hasta ahora el método más eficiente para evaluar la calidad del café. Las características de color, apariencia, olor y sabor de los alimentos, estimulan la visión, el olfato, el tacto y el gusto produciendo sensaciones que van al cerebro, donde ocurre la percepción o correlación de impresiones sensoriales, lo cual se traduce en un juicio por medio del cual se determina si un producto es aceptado o rechazado (15, 84, 89, 90, 97, 139, 140, 143, 147).

A diferencia del consumidor común, quien expresa su aceptación del producto con un simple “me gusta” o “no me gusta”, un panel de catación entrenado para un producto clasifica, describe y califica las características utilizando términos y escalas propias para cada alimento (15, 90, 139, 143).

Las características sensoriales indican no sólo la calidad comercial final del grano, sino que también permiten establecer las características deseables del proceso de beneficio y los cuidados con el café, desde su cultivo hasta la obtención de la bebida.

La **calidad del café colombiano** ha sido apreciada y mundialmente reconocida por los países consumidores, como una de las mejores dentro de los cafés arábigos. Esta calidad está determinada genéticamente 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 calidad de la cosecha, el tipo y control durante el proceso de beneficio, la trilla, la torrefacción y la preparación de la bebida (16, 17, 27, 53, 66, 67, 93, 97, 100, 131, 133, 136, 138, 141, 142, 143, 147, 167, 183, 184, 185, 198).

Existen también marcadas diferencias en las calidades y preferencias entre los países consumidores de café. Por ejemplo, los franceses e italianos prefieren una bebida con amargor y cuerpo altos, mientras que a los alemanes les gusta una taza con altas calificaciones de acidez y aroma, y moderado cuerpo.

A continuación se presentan algunos resultados de investigaciones sobre calidad del café colombiano en relación con las variedades, el tipo de beneficio y las condiciones de beneficio y almacenamiento del café.

2.1.1. La calidad de las variedades de café cultivadas en Colombia

El café pertenece a la familia Rubiaceae y al género *Coffea*. Dos especies tienen importancia económica en el mundo: *Coffea arabica* Linneo y *Coffea canephora* Pierre ex Froehner, las cuales se conocen comercialmente como cafés arábigos y

café robustas, respectivamente (44, 47, 49, 167, 183, 185). Los cafés arábigos presentan aroma y acidez pronunciados mientras que los robustas se caracterizan por su mayor cuerpo (84, 167). Ambas especies se distinguen por sus características botánicas, genéticas, agronómicas, químicas y morfológicas (47, 84). El 80 % de la producción mundial corresponde a la especie *C. arabica* que se cultiva principalmente en los países centroamericanos, Colombia, Brasil, en algunos países asiáticos como la India y africanos como en Kenia y Etiopía. La mayoría de los cafés robustas se cultiva en el Africa, Indonesia y Brasil (47).

La especie *C. arabica* tiene su origen en las montañas de Etiopía y es el resultado de un cruzamiento entre dos especies silvestres de café, seguido por una autoduplicación espontánea de sus cromosomas (47, 53, 84, 108, 167, 185). Históricamente se han distinguido dos variedades de *C. arabica*: *C. arabica* var. *arabica* (sinónimo var. Típica), la cual se cultivó en los jardines botánicos holandeses y fue introducida por los franceses al Caribe, de allí se difundió a los países de Centro y Sudamérica y *C. arabica* var. Bourbon cultivada por los franceses en la isla Bourbon o Réunion (47, 122). Todas las variedades de *C. arabica* cultivadas en el mundo se derivan de estas dos variedades.

El café llegó a Colombia a finales del siglo XVIII al departamento de Santander (67); desde allí se difundió hacia los departamentos, hoy mayores cultivadores del grano: Antioquia, Tolima, Caldas, Valle del Cauca, Risaralda, Quindío, Cundinamarca y Nariño, entre otros. Al principio en Colombia se cultivó la variedad Típica; a finales de la década de los 20 se introdujo a Colombia la variedad Bourbon por su alto rendimiento en producción. Después de 1952 se introdujo en Colombia la variedad Caturra desde el Brasil.

Desde la década de los 80 se cultiva la variedad Colombia desarrollada en Cenicafé, proveniente de la variedad Caturra y el Híbrido de Timor. Este material presenta resistencia a la roya del cafeto (34, 108).

En la actualidad hay en Colombia cerca de 900.000 hectáreas sembradas con cafetales (41, 67), de las cuales el 70 % están tecnificadas y están sembradas con variedad Colombia unas 300.000; el resto corresponde prácticamente a cultivos tradicionales de variedades Típica, Caturra y Bourbon, principalmente (34).

La **calidad de la bebida** de la variedad Colombia fue uno de los aspectos más tenidos en cuenta en su desarrollo y mejoramiento y se evaluó a través de la investigación por paneles de catación nacionales e internacionales (34, 108, 109, 122), antes de su liberación como variedad comercial.

En Cenicafé y con la cosecha de 1995, de lotes experimentales de variedades de café se evaluó la calidad de la bebida preparada con las principales variedades de *C. arabica* L. cultivadas en Colombia: Típica, Caturra, Bourbon y Colombia de fruto rojo y amarillo. Se analizaron las cualidades sensoriales: intensidad del aroma del café molido, aroma, acidez, amargor, cuerpo e impresión global, de muestras de

café procesadas mediante beneficio húmedo controlado y preparadas bajo condiciones normalizadas de tostación y molienda (139). Se realizaron **1.100 pruebas sensoriales** descriptivas, cuantitativas y comparativas. Para la calificación de la bebida se utilizó una escala de 9 puntos, donde 9 califica las mejores tazas y 1 a las peores (35, 56, 57, 135, 140). Se demostró que la calidad de las variedades de café de *C. arabica* cultivadas en Colombia es muy homogénea y presenta características generales de suavidad en cuerpo y amargor, y pronunciados aroma y acidez (Tabla 1).

También se comprobó que la variedad Colombia se destaca por su alta acidez y amargor pronunciado, en tanto que la variedad Borbón presenta características equilibradas y suaves. La variedad Típica produce tazas muy suaves y limpias y en la variedad Caturra se destacó su acidez y aroma. Es de anotar que en pruebas realizadas con comparaciones múltiples, para identificar cinco variedades, solo en el 28% de los casos se seleccionó correctamente la variedad correspondiente y todas las variedades fueron confundidas con las otras por los siete integrantes de los paneles de catación, al menos una vez, y no resultó de ningún modo fácil seleccionar la variedad correcta por ninguno de ellos cuando se hizo tostación uniforme de la muestra (139).

2.1.2. El beneficio húmedo de café y su influencia en la calidad

De todos los factores que afectan la calidad de una taza de café, el beneficio o proceso de transformación del grano de café cereza en pergamino seco es el que más se ha investigado, describiéndose el efecto que cada una de las etapas de este proceso tiene en la calidad física y organoléptica del café (47, 67, 97, 100, 133, 136, 137, 143, 167, 183, 185). Es así como se hace la distinción entre cafés arábigos procesados por vía húmeda y por vía seca. Mientras que los primeros, como los colombianos, se catalogan como **suaves lavados** por sus características moderadas de amargor y cuerpo, y por su acidez y aroma pronunciados, los arábigos procesa-

Tabla 1. Calificación de las características sensoriales de las variedades de café *Coffea arabica* L. cultivadas en Colombia*.

Característica sensorial	Variedad				
	Borbón	Caturra	Colombia amarillo	Colombia rojo	Típica
Aroma del café tostado y molido	7,06	7,24	7,00	7,14	6,84
Aroma de la bebida	7,09	7,28	7,08	7,17	7,06
Acidez	7,11	7,33	7,11	7,40	6,63
Amargor	7,17	6,52	7,34	6,97	6,26
Cuerpo	7,09	7,06	6,94	7,21	6,69
Impresión global	7,07	7,04	7,07	7,26	6,67

* Resultados de 1.100 análisis para cada característica sensorial.

dos por vía seca, como en el Brasil, se estiman por su mayor cuerpo y amargor y moderada acidez (17, 47). Del mismo modo, la falta de control durante los procesos de fermentación y secado ocasionan defectos en el café como el fermento, **stinker**, tierra, fenólico, mohoso, decolorado y cristalizado, que ocasionan su rechazo (16, 97, 100, 133, 136, 138, 142, 143, 167, 185, 198). La mayoría de los otros aspectos, en particular los agronómicos y de condiciones de cultivo, han sido apenas estudiados en relación con la calidad del café.

En Colombia y varios países centroamericanos como Costa Rica, Guatemala, México, El Salvador y algunos del centro del África como Kenya, se beneficia el café tradicionalmente por vía húmeda. Este proceso comprende las siguientes etapas: recolección, despulpado, remoción del mucílago, lavado y secado. La mayoría del café robusta en el África se procesa por vía seca, aunque la mitad del robusta del Zaire se beneficia por vía húmeda.

En el Brasil se procesa café *C. arabica* por vía seca (183). El proceso de beneficio en seco consta de menos etapas que el proceso por vía húmeda, pero se requiere de más tiempo hasta obtener la almendra de café para la exportación, ya que el café cereza se seca directamente y luego se retira la cáscara seca que comprende la pulpa, el mucílago y el pergamino, por medio de una máquina peladora (53). El color de la almendra del café beneficiado por vía seca es amarillo o café, mientras que la almendra procedente del beneficio húmedo presenta una coloración verde, cuando se controlan las condiciones del proceso de beneficio del café (183).

Durante cada una de las etapas del proceso de beneficio húmedo se puede afectar la calidad del café. Los defectos más graves tales como el grano fermento en cualquiera de sus grados: agrio, fruta, cebolla, rancio, **stinker**, se originan por malas prácticas durante las etapas del beneficio, como recolección de altos porcentajes de grano sobremaduro, retraso entre en proceso de despulpado y separación del mucílago de café, sobrefermentación, el proceso de mezclas de café cosechado y despulpado en diferentes días y el uso de aguas sucias para el lavado. Por falta de control del proceso de secado del café se originan la mayoría de los defectos: fermento, vinagre, cristalizado, decolorado, manchado, aplastado, flojo y sucio. Una inadecuada recolección genera también una gran cantidad de defectos (16, 27, 44, 46, 49, 53, 66, 67, 84, 97, 100, 131, 133, 135, 136, 138, 142, 143, 147, 167, 183, 185, 198).

En la Tabla 2 se presentan los defectos más comunes del café almendra y de la bebida.

Para obtener una **taza** de café de buena calidad y equilibrada en todos sus cualidades sensoriales, cuando se procesa el café por la vía húmeda tradicional, se requiere de control en cada una de las etapas de beneficio, así: recolección de cereza madura, despulpado 6 a 8 h después de la recolección, fermentación natural llevada a cabo en un tanque limpio hasta que se haya desprendido totalmente el mucílago,

Tabla 2. Defectos del grano y de la bebida de café de acuerdo con la etapa del proceso de cultivo, beneficio y trilla.

Etapa de proceso	Número de defecto*
Cultivo: Contaminación química o microbiana	20
Enfermedades o plagas	1, 3, 8
Deficiencias nutricionales de la planta	1, 5, 10, 16
Recolección	1, 3, 6, 7, 11, 12, 15, 21
Despulpado	3, 7
Fermentación	1, 2, 3, 6, 19
Lavado	3, 6, 19
Secado	2, 3, 4, 5, 12, 13, 14, 19, 20
Almacenamiento	2, 13, 18, 19, 20, 22
Trilla	9, 12, 17

*1 Negro o parcialmente negro, 2 Cardenillo, 3 Vinagre (fermento, **stinker**), 4 Cristalizado, 5 Decolorado (blanqueado), 6 Manchado, 7 Mordido y cortado, 8 Picado por insectos (atacado por broca), 9 Partido, 10 Malformado o deformado, 11 Inmaduro, 12 Aplastado, 13 Flotador o balsudo, 14 Flojo, 15 Negro balsudo, 16 Vano, 17 Astillado y partido, 18 Reposo, 19 Sucio, 20 Sabor fenólico, 21 Materias extrañas, 22 decolorado (ámbar o mantequilla).

proceso que puede durar de 12 a 18 h, dependiendo principalmente de las condiciones de temperatura del lugar de proceso; lavado con agua limpia para retirar los ácidos y alcoholes formados durante la fermentación. Inmediatamente después se debe realizar el secado uniforme y cuidadoso del café pergamino, para disminuir el contenido de humedad hasta el 10 ó 12% y finalmente, empacarlo y almacenarlo en condiciones controladas de temperatura, humedad relativa y en ausencia de materiales y elementos olorosos como combustibles, abonos y pinturas, entre otros (53, 67, 97, 100, 133, 138).

En un beneficiadero ecológico, en el cual se propone reducir los consumos de agua para el procesamiento o lavado de café y eliminar la pulpa y el mucílago sin contaminar el agua, se debe considerar como condición esencial la conservación de la calidad física y de la bebida del café (133).

El efecto de cada una de las etapas de beneficio húmedo en la bebida de café se describe a continuación:

2.1.2.1. La cosecha

Los mayores defectos ocasionados por una inadecuada recolección son los aromas y sabores acres por la presencia de granos negros, los fermentos por la recolección de granos sobremaduros e inmaduros y también los sabores y aromas extraños y contaminados por la recolección de frutos perforados por insectos y contaminados.

2.1.2.2. El despulpado

En lo relacionado con el despulpado se presentan defectos por el retraso en la

separación del epicarpio del fruto o por la separación incompleta de la pulpa de los granos, ocasionándose en ambos casos café con aroma a fermento que se aprecia en el pergamino, defecto que se acentúa a medida que aumentan los porcentajes de grano sobremaduro en el café cosechado, el número de granos semidespulpados o se retrasan las operaciones de separación de pulpa y mucílago en el proceso de beneficio. Los granos mordidos y cortados se originan principalmente por mal ajuste de la máquina despulpadora, lo cual ocasiona alteraciones en la apariencia, el color y el tamaño, sin afectar generalmente la bebida.

En ensayos de almacenamiento a 4°C de café cereza maduro y pintón seleccionado se encontró que es posible conservar el café físicamente cuando se guarda la cereza hasta por 40h, pero la calidad de la bebida presenta el **defecto fermento**, el cual se acentúa mientras más se demore la realización de los procesos de fermentación, lavado y secado del café. En otras investigaciones, por medio de 480 análisis sensoriales, se determinó que cuando el proceso de remoción de mucílago se realiza rápidamente utilizando enzimas pectolíticas, el deterioro del café cereza almacenado es más lento. Después del almacenamiento del café cereza por 24h antes de su procesamiento, se afectó más el café de fermentación natural que aquel al cual se le removió más rápidamente el mucílago por medios enzimáticos. En el primero de los casos se detectó el defecto fermento hasta en el 50% de las tazas evaluadas, en tanto que para las muestras tratadas con las enzimas se afectaron del 10 al 27% de las tazas (134).

Cuando se realizó el despulpado inmediato del café, luego de la cosecha, no se presentaron diferencias entre la fermentación natural y la fermentación con adición de enzimas en cuanto a la calidad de la bebida, en ninguna característica sensorial. Por el contrario, a medida que se aumentó el tiempo de almacenamiento de la cereza de café se incrementó el porcentaje de tazas defectuosas por muestra, detectándose defectos como fermento, fenol y tierra.

El café pintón y maduro despulpado inmediatamente después del recibo, procesado por fermentación natural o enzimática, lavado con agua limpia y secado hasta humedad del 10 al 12% fue calificado de calidad aceptable (134).

2.1.2.3. La remoción del mucílago

Durante la fermentación natural actúan bacterias, levaduras y enzimas que transforman los compuestos pécticos y azúcares constituyentes del mucílago, en alcoholes y ácidos carboxílico, acético, láctico, propiónico y butírico, que luego se retiran con el lavado. En la fermentación, es crítico el tiempo de proceso, ya que por sobrefermentación se origina café con aroma y sabor a vinagre, piña madura, cebolla, rancio y nauseabundo. Del mismo modo, antes del lavado, es necesario que el café esté libre de mucílago, ya que si se lava antes de que esto ocurra se mancharía el pergamino, se dificultaría el secado y la bebida de café podría adquirir sabores a sucio o agrio. El proceso de mezclas de café cosechado y despulpado en diferentes

días, depositado en tanques para la fermentación y lavado posterior, causa también defecto fermento.

En ensayos acerca de la sobrefermentación y mezclas de café cereza se encontró que después de 20h se perciben en la bebida sabores a vinagre y piña, a las 40h el 37,5% de las muestras presentan el defecto fermento y **stinker**, a las 64h más del 75% de las tazas dan sabor nauseabundo (133).

Se determinó que para cosechas con 24% de granos sobremaduros y 23% de granos recogidos del suelo, la temperatura de la masa de café en fermentación asciende hasta 30 °C y se observa descenso del pH hasta 2,5, obteniéndose tazas con el defecto fermento. Muestras de café con contenidos superiores al 65%, entre granos pintones y maduros, dan buenas tazas (133).

Por medio de preparaciones enzimáticas se logra acelerar la remoción del mucílago de café y disminuir el tiempo en el proceso de beneficio. El manchado del pergamino por la coloración de la solución enzimática o por el lavado prematuro del café es un daño que puede originarse en el café por el uso de productos enzimáticos y puede afectarse la calidad de la bebida, como en el caso de la fermentación natural. Durante la cosecha de 1993 se evaluaron en Cenicafé tres productos enzimáticos (Novoferm 11, Novoferm 25, y SP 249) de la empresa danesa Novonordisk en el proceso de remoción del mucílago de café cereza verde, pintón, maduro y de recolección normal (137) Se midieron las condiciones de proceso para cada caso: temperatura, pH y tiempo, determinándose la calidad física de la almendra, la remoción de la cutícula plateada y la calidad de la bebida. Los resultados se compararon con los de café sometido a fermentación natural sin agua y bajo agua, y provenientes de **desmucilaginado mecánico**. Cada producto enzimático se evaluó en 3 dosis (0,025; 0,075 y 0,3g de enzima por kg de café baba). Se encontró que la remoción del mucílago era más rápida a medida que se aumentaba la dosis de enzima. La preparación Novoferm 11, redujo el tiempo de remoción hasta a 3,4h para café de recolección normal, conservándose la calidad física del pergamino, la almendra y la bebida en todas las características. Del mismo modo se determinó que el tiempo de remoción del mucílago cuando se adicionan enzimas depende del estado de madurez de la cereza; el café inmaduro se rechazó por su sabor acre y fermento, en tanto que los pintones obtuvieron calificaciones medias. El café maduro de fermentación natural presentó las mejores características sensoriales, destacándose su aroma y acidez. Le siguió el café de recolección normal.

Para evitar el deterioro de la calidad del café con el desmucilaginado mecánico se deben seguir básicamente las mismas recomendaciones que para un beneficio tradicional, así: no procesar granos verdes, ya que dan acidez astringente indeseable y defecto fermento; evitar el procesamiento de cafés con alto porcentaje de granos sobremaduros que pueden ocasionar sabores agrios y defecto fermento; no repasar café guayaba cosechado anteriormente debido a que la larga permanencia del grano con la pulpa, ocasiona pergamino manchado y sabores y aromas a fermento; verifi-

car que se haya retirado totalmente el mucílago del café para evitar pergamino manchado y bebida agria; lavar el café con agua limpia y secar de inmediato y cuidadosamente el café.

2.1.2.4. El lavado

Los mayores defectos que se ocasionan en la etapa de lavado se califican como pergamino manchado y sabores sucio, o fermento y contaminado, por el uso de aguas sucias. El lavado parcial del grano, dejando parte de mucílago o de los ácidos formados durante la fermentación, causa también el defecto fermento.

2.1.2.5. El secado

Las normas vigentes para la comercialización del café pergamino seco establecen un contenido de humedad entre 10 y el 12%. Humedades superiores al 13%, es decir, actividad del agua en el café mayor a 0,67, causan deterioro considerable presentándose ataque de hongos, el aspecto mohoso y el pergamino y la hendidura se manchan (133, 141). Durante el proceso de secado se rebaja **la actividad del agua del café**, por tanto, se inhibe el crecimiento de microorganismos y se disminuye la actividad enzimática; lo anterior favorece la calidad y estabilidad del producto. Los defectos más graves ocasionados durante el proceso de secado se originan por no iniciarlo inmediatamente después de lavado el café y por el amontonamiento de café pergamino húmedo. Además, se agrava la situación si el pergamino se empaqueta antes de estar completamente seco.

Con el objetivo de evaluar el deterioro en la calidad física y de la bebida de café por el mercadeo del café pergamino húmedo (sección 5.3.), se procesó café de recolección normal por sobrefermentación, pero lavado cuidadoso; posteriormente el café pergamino húmedo se almacenó hasta por tres días y luego se secó cuidadosamente. La bebida presentó defectos: sucio terroso, fenol y fermento (133).

También, se realizaron ensayos de almacenamiento de café pergamino con proceso controlado de beneficio hasta el lavado, almacenando posteriormente el café pergamino en agua hasta por tres días. Se detectó el defecto fermento, aún cuando el agua se cambió diariamente; no obstante, la apariencia del pergamino fue aceptable (133).

En otras investigaciones desarrolladas en Cenicafé durante el año de 1996 se realizó el proceso semihúmedo con café seleccionado maduro, que se despulpó y se secó con su mucílago, obteniéndose tazas con defecto fermento, más acentuado a medida que se tostaba el grano, con pérdidas superiores al 13%. El sabor resultante fue el de cereal dulzón para tostaciones bajas. Para café cereza maduro o verde procesado por vía seca se obtuvieron tazas con defecto **stinker**.

En el marco de las investigaciones desarrolladas en Cenicafé sobre las causas del **defecto fenólico** se encontraron hongos del género *Penicillium* en muestras de

café pergamino procesado y almacenado en fincas que habían presentado defecto fenol en los análisis sensoriales. El café pergamino analizado presentó apariencia sucia, color grisáceo y olor del compuesto característico a fenol, detectándose en todas las fincas evaluadas deficiencia en el proceso de secado por carencia de espacio y equipos, amontonamiento y mezclas de café pergamino húmedo y pasillas de diferentes humedades (136, 142).

2.1.2.6. El almacenamiento del café pergamino

Si se almacena café con humedad superior al 12% bajo condiciones de humedad relativa superiores al 70% y temperaturas por encima de 20°C, se favorece el deterioro rápido del producto, dando como resultado sabores a reposo, viejo y fenol. La apariencia del pergamino puede ser normal o sucia, pero el color de la almendra se deteriora apareciendo el grano decolorado y blanqueado. Para granos de café con humedad del 11% almacenado a 30°C se mantiene un equilibrio entre el agua del grano y la humedad del medio, siempre y cuando esta última sea inferior al 65%. (Sección 4.9.1.1) Para humedades relativas en el sitio de almacenamiento por encima de 74% se han encontrado hongos de los géneros *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp. y *Rhizopus* sp. (142). Algunas especies de hongos de los géneros *Aspergillus* y *Penicillium* han sido reconocidas en la industria de alimentos como productores de micotoxinas, que afectan la salud del consumidor.

2.1.3. El beneficio por vía seca y su influencia en la calidad del café colombiano

En el caso del beneficio seco hay mayores riesgos de obtener café con el defecto fermento, debido a que el grano está mucho tiempo en contacto con la pulpa y el mucílago, subproductos que a su vez representan una barrera para la rápida disminución de la humedad en la cereza, la cual varía al inicio del proceso del 60 al 75% (53, 167). La calidad del café puede afectarse aún más si la cereza se rehumedece por el efecto de las lluvias, lo que ocasiona granos manchados y de coloración negra (53, 167). El secado de la cereza hasta un contenido de humedad del 12 al 20% puede durar varias semanas, lo cual favorece el crecimiento de hongos de los géneros *Aspergillus* sp. y *Penicillium* sp. Esto ocurre especialmente en la región central del Brasil, donde la cosecha tiene lugar en la época húmeda; bajo estas condiciones los hongos pueden atacar la cereza desde el árbol y así los granos adquieren el **sabor a “río”** antes de ser cosechados, resultando el sabor aún más fuerte si la cereza no se revuelve frecuentemente durante el secado (53, 138, 167).

Con el fin de determinar la calidad del café colombiano procesado por **vía seca**, se realizaron 280 evaluaciones sensoriales a muestras de *C. arabica* L. var. Colombia de recolección normal, con contenidos en promedio del 42,4% de grano maduro, 18,8% de grano sobremaduro, 13,3% de grano pintón, 7,5% de grano verde y 18% de negros recogidos del suelo, que se secaron en cereza al sol hasta una humedad

final del 10 al 12%, medida por el método de estufa a 105°C. La cereza se trilló en una máquina peladora para café cereza seco. El secado requirió de 20 a 25 días y se obtuvo un café almendra de color amarillo a café, de aspecto muy cuticulado, olor a vinagre y la bebida fue rechazada por su muy baja calidad. Se presentaron defectos tales como fermento, **stinker** y fenol, percibidos en el aroma de la bebida, la acidez, el amargor, el cuerpo y la impresión global del café, en todas las muestras. Se demostró cómo los componentes químicos de la pulpa y del mucílago en contacto con la almendra de café durante el proceso de secado afectan la calidad de la bebida. Se concluyó que esta forma de beneficio no es recomendable para el café colombiano, si se quiere conservar su calidad y su suavidad tradicional, apreciadas por los países consumidores (138).

2.1.4. Principales defectos en la calidad del café

2.1.4.1. La broca del café

Este insecto no solo origina pérdidas económicas en la caficultura y en la calidad física del grano al afectar su apariencia, color y tamaño, sino que también altera la calidad de la bebida, afectando todas sus características organolépticas según el grado de daño y del porcentaje de granos perforados presentes en la muestra. Para contenidos del 50% de granos perforados por la broca en la muestra de café y grados de daño superiores al 30% se obtienen bebidas de café con olor nauseabundo, acidez acre o nula, amargor muy fuerte, cuerpo pesado y sabores nauseabundo, contaminado, carbonoso que hacen la taza imbebible. Se debe por tanto, adoptar la estrategia de manejo integrado de la plaga recomendada por la Federación de Cafeteros de Colombia.

2.1.4.2. El sabor fenólico

El defecto fenólico de la bebida de café se describe principalmente como riado, yodado, a farmacia, a medicina, a químico, a moho, a húmedo, a tierra húmeda, a caucho quemado, a madera, contaminado ó metálico. La cualidad sensorial de amargor varía desde muy amargo, pronunciado y quemado hasta el carbonoso e indefinible. La acidez se califica como muy baja, nula, picante o acre. El cuerpo puede ser sucio, muy áspero, espeso o pesado; el sabor es desagradable y la impresión global se califica de total rechazo (133, 136, 142).

Entre los factores que contribuyen a la aparición del defecto se tienen: la contaminación química y microbiana del café cereza o durante el proceso de beneficio por el uso de agentes químicos o materiales que contaminen el café; las deficiencias en el proceso de secado y el almacenamiento del café y la broca de café como causa indirecta, ya que sobre el grano con broca proliferan hongos como *Aspergillus* sp. y *Penicillium* sp., los cuales han sido aislados de muestras con el defecto (142). El compuesto 2, 4, 6 tricloroanisol ha reproducido sensorialmente las características

del defecto para concentraciones desde 0,01ppt del compuesto en café tostado y molido (136). Se ha demostrado que este compuesto puede ser el producto de la descomposición por hongos, de sustancias organocloradas (136, 142).

2.1.4.3. El defecto “stinker”

Como ya se mencionó las causas principales de este defecto se originan en la carencia de condiciones adecuadas en la recolección y en el inadecuado beneficio del café.

2.2. EFECTO DEL DESMUCILAGINADO MECÁNICO EN LA CALIDAD FÍSICA Y ORGANOLÉPTICA DEL CAFÉ (117)⁵

2.2.1. Eliminación del mucílago

En el beneficio del café por vía húmeda utilizado en Colombia y otros países Centroamericanos y Africanos para obtener los cafés denominados “suaves”, el mucílago se elimina por medio de la fermentación natural. Cuando este proceso se controla se obtienen cafés con alta calidad en taza; sin embargo, en muchos casos se ejerce poco ó ningún control, especialmente cuando la producción es baja y el café despulpado de 2 ó 3 días se reúne en un mismo tanque dando origen a cafés con sabor a fermento y en casos más críticos, a cafés con defecto “stinker”. En ambos casos se ocasionan importantes pérdidas económicas, ya que los compradores rechazan estos materiales en el exterior.

El mucílago fermentado se retira del café lavándolo en el tanque (Figura 24) (en el caso de pequeños productores) o utilizando dispositivos como el canal de correteo (Figura 25) o el canal semisumergido (Figura 28) (36). Cuando el café se lava en el tanque de fermentación el consumo específico de agua se puede disminuir hasta 4,2L/kg de café pergamino seco (192). Cuando el café se lava y se clasifica en el canal de correteo el consumo de agua, sin recirculación, es de 39,0L/kg de cps. (36, 182). En el caso del canal semisumergido el consumo específico es del orden de 6,1L/kg de cps (95).

El **desmucilaginado mecánico** realizado con equipos apropiados permite remover rápidamente el mucílago (Secciones 3.10.7. y 3.14.) con ventajas sobre la fermentación natural, tales como: reducción significativa en el consumo de agua, reducción de la contaminación (las mieles altamente viscosas se pueden mezclar con la pulpa y retener más del 60% de estos efluentes líquidos) lográndose manejar más del 90% de la contaminación (144), obtener mayor cantidad de café seco gracias a la eliminación de las pérdidas de materia seca por respiración del grano (179, 180),

⁵ Preparado por Oliveros T., C. E. y Roa M., G.

recuperar aproximadamente el 50% de los granos guayabas y medias caras (164), aumentar la utilización de los secadores (se puede iniciar el secado el mismo día) y reducir significativamente las estructuras civiles requeridas para el beneficio.

La contaminación generada por el lavado del café, en términos de Demanda Química de Oxígeno (DQO) expresada en gramos de DQO/kg de café cereza, en el caso de la fermentación natural es de 30,0. Esta representa el 26,3% de la contaminación potencial generada por el beneficio húmedo del café (190). Mediante la adecuada utilización del desmucilaginado mecánico este valor se reduce a menos del 10% (144).

2.2.2. Calidad física del café desmucilaginado

La calidad física del café desmucilaginado depende del equipo utilizado y forma de operarlo, pero principalmente de la calidad del café cereza (contenido de frutos verdes, secos, impurezas) y del tratamiento previo y posterior al proceso: eliminación de flotes e impurezas en el café cereza, separación de guayabas y medias caras en el café en baba y separación de flotes, guayabas e impurezas en el café desmucilaginado.

Cuando el café proviene de la cosecha principal el porcentaje de granos verdes generalmente es inferior al 3% (186). En el caso de granos provenientes de cafetales sanos o con pocos problemas fitosanitarios, bajo contenido de guayabas, los cafés desmucilaginados son de alta calidad física y pueden estar dentro de las normas de compra establecidas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia: menos de 0,5% de impurezas, menos de 3,0% de guayabas y media cara y menos de 2,0% de granos mordidos y trillados (68).

En la Figura 1 se presentan los resultados de la **calidad física** de café obtenido de 29 evaluaciones a café de recolección normal, pergamino húmedo (53% de humedad) procesado en un desmucilaginador (lavador y limpiador) de flujo ascendente desarrollado en Cenicafé (117). Al café cereza utilizado en las evaluaciones se le

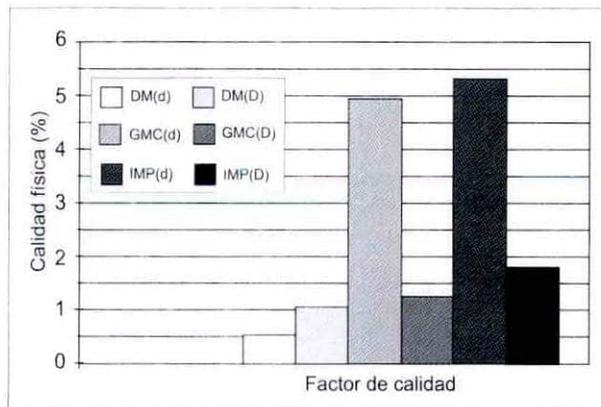


Figura 1. Efecto del desmucilaginado mecánico en la calidad física de café: daño mecánico (DM), guayaba y media cara (GMC) e Impurezas (IMP), después del despulpado (d) y del desmucilaginado (D).

retiraron los flotes en un canal semisumergido (con recirculación de agua). El análisis de calidad del café pergamino húmedo obtenido después del despulpado (d) y del desmucilaginado (D) muestra que solamente el contenido de impurezas (IMP), 1,8%, es superior al límite establecido por la norma de calidad de la Federación (0,5%).

En la Figura 2 se presentan los valores promedio de calidad física de café, en pergamino húmedo (20 ensayos), obtenido sin eliminar flotes antes del despulpado y sin utilizar la zaranda en el café despulpado. Al café desmucilaginado y lavado se le retiró parte de las impurezas y guayabas utilizando un clasificador-limpiador hidráulico (hidrociclón, Sección 3.11.). Los valores de daño mecánico (0,49%), guayabas y media cara (1,09%) e impurezas (0,45%) indican que la calidad del café obtenido con este proceso de beneficio satisface los requisitos establecidos por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia para la compra del café pergamino.

2.2.3. Calidad organoléptica del café desmucilaginado

Existen medios mecánicos, químicos, bioquímicos, para retirar eficientemente el mucílago en tiempos mucho más cortos que los utilizados por el método convencional, o sea, el de someter el café despulpado a la fermentación del mucílago en tanques de fermentación, por tiempos que oscilan entre 12 y 18 horas, para después lavarlos utilizando agua limpia (143).

En ALMACAFÉ, en Chinchiná y en Letras se almacenaron muestras de café procesado por remoción mecánica y por fermentación del mucílago obtenidas de los laboratorios de Cenicafé (112). La calidad de la bebida se evaluó en el panel de catación de la Unidad de Control de Calidad (U.C.C.) de FEDERACAFÉ, en Bogotá, y por la firma John D'Elena, de Nueva York (109). Los resultados presentados en la Tabla 3 permiten concluir que la calidad en taza del café desmucilaginado mecánicamente es igual ó superior a la obtenida por fermentación natural.

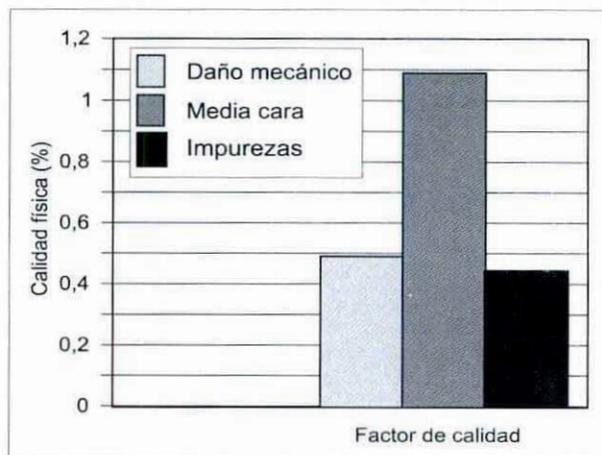


Figura 2. Calidad física del café obtenido con desmucilaginado mecánico sin previa eliminación de flotes y sin zarandear el café despulpado. Solamente se retiró, mediante un hidrociclón, parte de las guayabas e impurezas después del desmucilaginado.

Tabla 3. Calidad de la bebida del café obtenido con remoción mecánica del mucílago.

Tratamiento	Evaluador	Acidez - Aroma - Cuerpo			Impresión global
DESMULAC -0 meses	U.C.C.	A-M			Excelente
	J.D´ELENA	M-B	M-B	M-B	
TESTIGO	U.C.C.	M-B			Excelente
	J.D´ELENA	M-B	M-B	M-B	
DESMULAC -L3 meses	U.C.C.	M-B			Buena
	J.D´ELENA	A	A	A	
TESTIGO -L3 meses	U.C.C.	B			Buena
	J.D´ELENA	A	A	M	
DESMULAC -C3 meses	U.C.C.	B			Buena
	J.D´ELENA	B	A	A	
TESTIGO -C3 meses	U.C.C.	B			Buena
	J.D´ELENA	A-M	M	M	
DESMULAC -L6 meses	U.C.C.	B			Buena
	J.D´ELENA		A	A	
TESTIGO -L6 meses	U.C.C.	B			Buena
	J.D´ELENA		A	A	

A = Alta; M = Media; B = Baja; L = Letras; C= Chinchiná; U.C.C.= Unidad de Control de Calidad. Desmulac: Desmucilaginado mecánico. Testigo: Fermentación natural.

Sanz (164) comparó la calidad de la bebida de muestras de café fresco obtenidas con fermentación natural y desmucilaginado mecánico; los resultados incluidos en la Tabla 4 indican que con la técnica de desmucilaginado mecánico se obtiene mejor calidad de la bebida.

Durante 1995 y 1996 se realizaron 77 evaluaciones para comparar la calidad de la bebida del café obtenido por el proceso de remoción mecánica del mucílago con café procesado por fermentación natural. Se contó con la colaboración de los paneles de catación de Cenicafé, la Fábrica de Café Liofilizado en Chinchiná, Caldas y ALMACAFÉ en Bogotá. De los resultados obtenidos en los diferentes paneles se pudo concluir lo siguiente:

Tabla 4. Evaluación comparativa de la calidad en taza del café obtenido con fermentación natural y desmucilaginado mecánico*.

ATRIBUTO	Fermentación natural	Desmucilaginado mecánico
Intensidad del aroma	7,1	7,0
Aroma de bebida	6,7	6,8
Acidez	6,1	5,2
Amargor	5,0	5,2
Cuerpo	6,4	6,8
Impresión global	6,4	6,9

* Escala de 9 puntos; 9 la mejor; 1 la peor calificación.

De acuerdo a lo registrado por el panel de Cenicafé, en el período de cosecha principal (agosto 1995 - diciembre 1995), la calidad del café obtenido con tecnología DESLIM (Sección 3.10.4.) es superior a la obtenida con el método tradicional de beneficio que incluye la fermentación. A partir de enero/96, hasta junio de 1996, época de cosecha muy escasa, la calidad de la bebida no fue buena en ambos métodos y en general, con pocas excepciones, se obtuvieron bebidas con calificación de 6. El panel de la Fábrica de Café Liofilizado registró bebidas normales y niveles de acidez similares. ALMACAFÉ encontró similares niveles de aroma, acidez, cuerpo y una notoria tendencia a sabores astringentes y herbales en las muestras evaluadas. De acuerdo con Puerta (133), la calidad de la bebida depende en gran parte de la calidad del café cereza cosechado; granos sobremaduros y verdes producen bebidas con sabor a vinagre, granos pintones dan sabor astringente, y granos perforados por la broca del café generan sabores extraños que demeritan la calidad de la bebida. Las evaluaciones de la calidad de la bebida se han seguido efectuando hasta la presente fecha, con resultados consistentes.

A continuación se presentan los conceptos y resultados de ensayos reportados en la literatura científica nacional e internacional sobre la remoción y el beneficio del café:

Calle (30) obtuvo la mejor calidad del café después de almacenado durante 5 años cuando lo desmucilaginoó mecánicamente. Argumentó que la película plateada que queda más adherida a los granos durante este proceso, con relación al grano fermentado tradicionalmente, disminuye la oxidación de la almendra, conservándola mejor.

Coste (54) afirma que “la fermentación bien realizada, de duración limitada al tiempo necesario para la fluidificación del mucílago, no tiene influencia alguna sobre la bebida. La comparación con los mismos cafés tratados con métodos rápidos que excluyen la fermentación no permite apreciar diferencias”.

El mismo autor agrega: “debe sin embargo, hacerse notar que el sabor ligeramente ácido de la bebida obtenida de ciertos cafés arábigos (Kenya, Kivu, etc.) muy apreciado por los consumidores, se obtiene mediante una fermentación de cierta duración”.

Fourney *et al.* (73) en evaluaciones de desmucilaginado rápido de café arábica utilizando tratamientos con sustancias enzimáticas, no encontraron diferencias en la calidad de la bebida al compararlos con el procedimiento tradicional de fermentación.

Wilbaux (183) menciona como principal argumento contra la eliminación mecánica del mesocarpio el hecho de que pequeñas porciones del mucílago quedan adheridas a la semilla y agrega que de no eliminarse esos residuos se desarrolla una post-fermentación nociva durante el escurrimiento y el presecado que además, facilita que las semillas se adhieran durante el secado.

Vasquez e Hidalgo (179), al comparar la calidad del café proveniente del desmucilaginado mecánico con la del café procesado por fermentación natural y con diferentes tiempos de espera para el secado, concluyeron que el **desmucilaginado mecánico del café y el secado inmediato** del mismo mejoran la acidez y el cuerpo del café sin afectar el aroma, y se incrementa el rendimiento hasta un 1,9%. en peso, cuando se compara con la fermentación natural.

Vasquez y Montero (180) indican que la adopción de métodos mecánicos para desmucilaginar café en Costa Rica es cada día mayor. Se encontraron las siguientes pérdidas de materia seca expresadas en porcentaje, durante la fermentación; para 12 horas = 2%; para 48 horas = 3,14%; para 60 horas = 3,44%; para desmucilaginado mecánico y 12 horas de espera antes de iniciar el secado = 0,56%. Los mismos autores citan que Cleves (48) obtuvo rendimientos en peso superiores en 3,4% y 5,1%, al utilizar el desmucilaginado mecánico (mediante la máquina Acuapulpa), con relación a la fermentación natural.

Carbonel y Vilanova (31) encontraron pérdidas de materia seca de hasta el 9% de los sólidos en 48 horas de fermentación, tanto en seco como bajo agua. En las pruebas de calidad de taza se compararon favorablemente las muestras procesadas químicamente con muestras similares procesadas por fermentación y enzimáticamente. Al referirse a la utilización del desmucilaginado mecánico indican que su principal defecto es su alto costo y elevada potencia eléctrica del motor. Los autores citan un trabajo realizado en Kenya sobre la fermentación del café en 1935. Sus conclusiones fueron: “la remoción de la materia azucarada mucilaginoso, para asegurar un desecamiento parejo y rápido del café, es la única razón de la fermentación”.

Menchu (98) indica que los desmucilaginadores tipo ELMU (eliminación del mucílago), son los sistemas más utilizados por los beneficiaderos de mediana y gran capacidad de Centroamérica y que el café desmucilaginado mecánicamente resulta afectado por la presencia de la película adherida, pero el sabor permanece igual que el de los testigos obtenidos por fermentación natural. Por otra parte, indica que si se deja el café desmucilaginado bajo agua limpia se consigue mejorar en parte el aspecto del café, particularmente en cafés que no se pueden cosechar totalmente maduros y que poseen polifenoles que causan mal sabor a “grama”, a “áspero”, etc.

Case (33) en su trabajo de recopilación bibliográfica sobre comparaciones del desmucilaginado natural (fermentación y lavado) y el desmucilaginado rápido, incluyendo el mecánico concluye, luego de revisar los trabajos realizados en todas las regiones productoras de café desde inicios del presente siglo, que **el único propósito de la fermentación del mucílago es hacer esa sustancia fácilmente diluible en agua para facilitar su lavado**; que no es el grano el que se fermenta, sino apenas el mucílago que lo rodea.

En conclusión, todos los autores revisados que sustentan sus apreciaciones en resultados experimentales coinciden con los resultados obtenidos en Cenicafé. Se puede afirmar que no hay diferencias en la calidad del café obtenido por fermentación natural o por desmucilaginado mecánico. En ambos procesos se requiere la completa remoción del mucílago para garantizar la calidad del café, aunque por la mayor duración del proceso de fermentación natural se requiere mayor control para evitar defecto fermento o vinagre. De otro lado, hay unanimidad en atribuir una pérdida de peso siempre mayor que 1,5 % de la materia seca del grano durante el proceso de la fermentación.

2.3. EFECTO DEL ENFRIAMIENTO MECÁNICO EN LA CALIDAD DEL CAFÉ ALMACENADO A GRANEL (155, 174)⁶

Pocos esfuerzos se han realizado para encontrar opciones al almacenamiento a mediano plazo (seis meses) y largo plazo (más de un año) del café almendra, aunque se conoce que el café almacenado en los sacos convencionales y principalmente en lugares cálidos, pierde su calidad y su precio rápidamente. Después de un año de almacenado prácticamente en cualquier lugar, el café ya se considera café reposado y su valor puede ser solo una fracción del valor del café fresco, de menos de tres meses de cosechado.

El enfriamiento mecánico de granos a granel ha sido utilizado exitosamente, para conservar la calidad de las semillas y de granos que presentan resistencia física y uniformidad intersticial, que les permite ser almacenados en silos de varias decenas de metros de altura.

Para encontrar las **mejores condiciones del aire enfriado** mecánicamente para conservar la calidad del café almacenado a granel a largo plazo, teniendo en cuenta los criterios de coloración de la almendra, prueba de taza, contenido de humedad, población de microorganismos y porcentaje de pasilla, se utilizaron 10 silos metálicos (Figura 3) de sección cuadrada de 0,5 x 0,5 m con una altura de 2,8 m (altura efectiva de 2,35 m), para una capacidad entre 220 y 250kg de café pergamino seco.

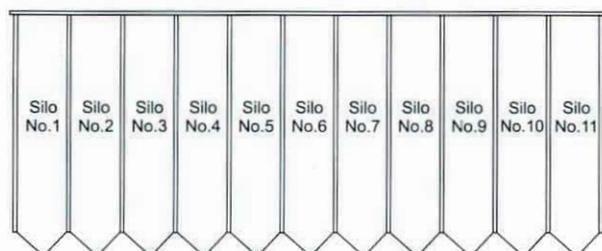


Figura 3. Esquema de silos metálicos utilizados para estudios de almacenamiento de café en laboratorio, con aire enfriado y forzado mecánicamente.

⁶ Preparado por Roa M., G.; Trejos R., y Cruz, M.

La sección y altura de éstos silos piloto se escogió para que los resultados fueran geoméricamente similares a los 30 silos de 6m de diámetro y 30m de altura, del complejo de almacenamiento de ALMACAFÉ, de Bello, Antioquia (Figura 4). De esta forma los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio podrían ser más confiablemente aplicados a los silos industriales.

Se aislaron 9 silos exteriormente con una capa de 5cm de fibra de vidrio, buscando minimizar los efectos de la variación de las condiciones ambientales sobre el café almacenado. Se controlaron las condiciones del aire de enfriamiento (temperatura, humedad y caudal) con un equipo diseñado en Cenicafé. Se utilizó café var. Caturra de la Subestación de Naranjal de Cenicafé, beneficiado por vía húmeda y secado mediante los silos-secadores tradicionales utilizados en Colombia. La densidad aparente del café dispuesto a granel, medida en cada silo, varió entre 388 y 435kg/m³.

Las temperaturas del aire de enfriamiento se hicieron variar entre 11 y 20°C; las humedades relativas entre 68 y 80% y los caudales utilizados estuvieron entre 20 y 30m³/h, lo que da un caudal específico de aire de almacenamiento promedio de

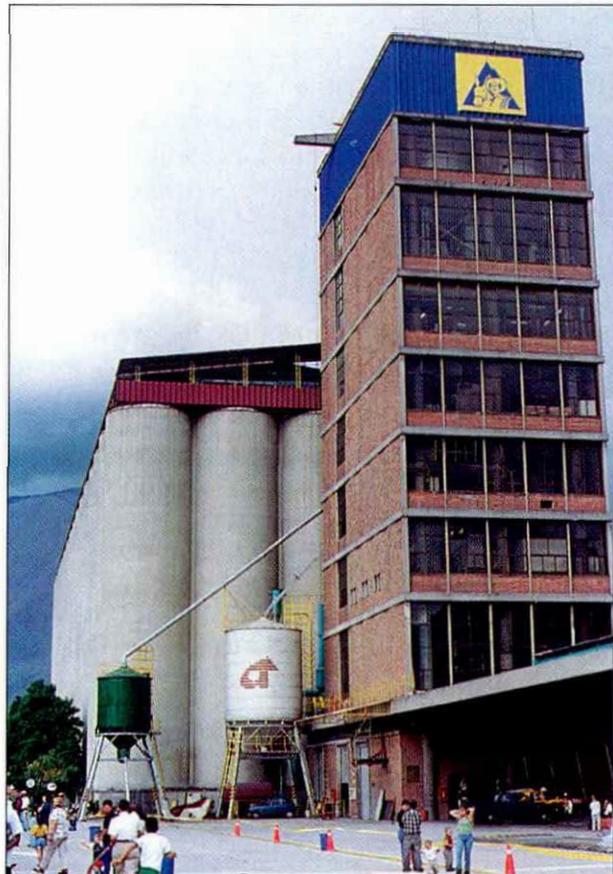


Figura 4. Batería de 60 silos de 30m de altura y 6m de diámetro, para el almacenamiento de café pergamino con aireación forzada nocturna. Foto: Cortesía Almacafé, Bello, Antioquia.

1m³ / (min x ton). El tiempo de enfriamiento varió entre 10 y 17 horas. Se escogieron las siguientes parejas de temperaturas (°C) y humedades relativas (%) del aire: 15°C y 70% (con una repetición), 18°C y 68% (con una repetición), 20°C y 70% (con una repetición), 15°C y 80%, 11°C y 80%, 12°C y 80%. Se escogieron estos valores por el conocimiento previo de las posibles mejores condiciones de almacenamiento del café, y por su relacionamiento con los valores de humedad de equilibrio (Sección 4.9.1.1).

Se almacenó adicionalmente la misma cantidad de café en un silo idéntico, sin airear. También se almacenó una muestra de café representativa de cada silo en sacos de fique de 3kg de capacidad, en las condiciones ambientales del mismo lugar de las experiencias (laboratorios de Cenicafé, Chinchiná.)

Se encontró experimentalmente que para enfriar completamente las masas de café se necesitaron entre 220 y 590m³ de aire por cada m³ ocupado por el café. Se consideraba enfriado el silo cuando la diferencia de temperaturas entre la salida y entrada del aire era de 2°C o menor. Se midieron las temperaturas de las masas a diferentes alturas de cada silo (Ver las curvas de enfriamiento experimentales y simuladas matemáticamente en la sección 4.9.2.1). El contenido de humedad se determinaba en 8 puntos localizados a diferentes alturas del silo separados 30cm, cada uno. La coloración de la almendra y el porcentaje de granos decolorados se determinó mensualmente en las capas inferiores, medias y superiores, utilizando patrones de color de aceptación general de la Federación Nacional de Cafeteros. La prueba de taza se determinó en las capas inferiores, medias y superiores, cada mes hasta el tercer mes, y posteriormente hasta un año, cada dos meses. Se utilizaron los paneles de catación de la Unidad de Control de Calidades en Bogotá, Cenicafé en Chinchiná, y la Fábrica de café liofilizado en Chinchiná.

2.3.1. Contenido de humedad de los granos

Después de un año de almacenamiento el café aireado mecánicamente mantuvo un contenido de humedad promedio entre el 10 y el 12 % (Figura 5); los valores más bajos de humedad correspondieron a las temperaturas del aire más bajas, porque inducen la transferencia de humedad desde la superficie del grano hacia el aire, por diferencia de presiones de vapor de agua. En el silo sin airear, las humedades superan el valor del 12%.

Las muestras que se utilizaron como testigos en sacos de fique (Figura 6), se humectaron por encima de los valores recomendados (10 a 12%), obteniéndose valores promedio de 12,9%, que corresponden muy aproximadamente a los valores del contenido de humedad de equilibrio de la región, 13,2%, (Sección 4.9.1.1) correspondiente a las condiciones ambientales en que se realizó el experimento (20,6°C de temperatura y 76% de humedad relativa).

En la Tabla 5 se presenta un resumen de las condiciones del aire con las cuales se

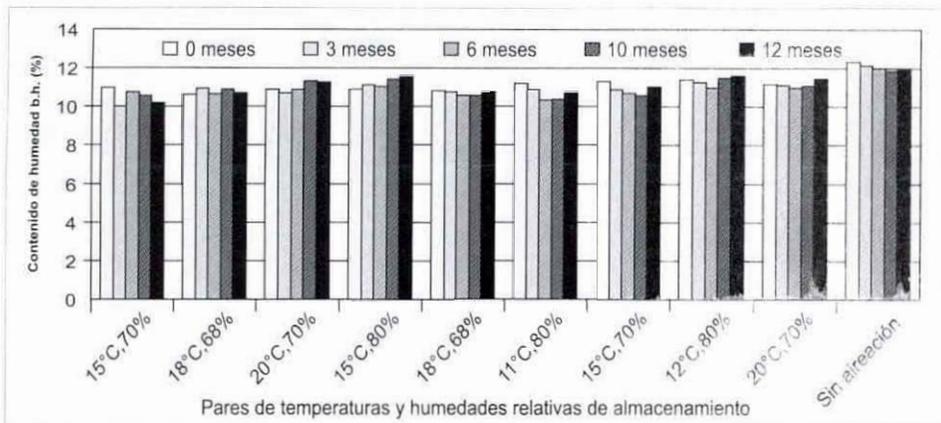


Figura 5. Contenido de humedad del café en silos como función de las condiciones del aire tratado, sin aireación, y del tiempo de almacenamiento.

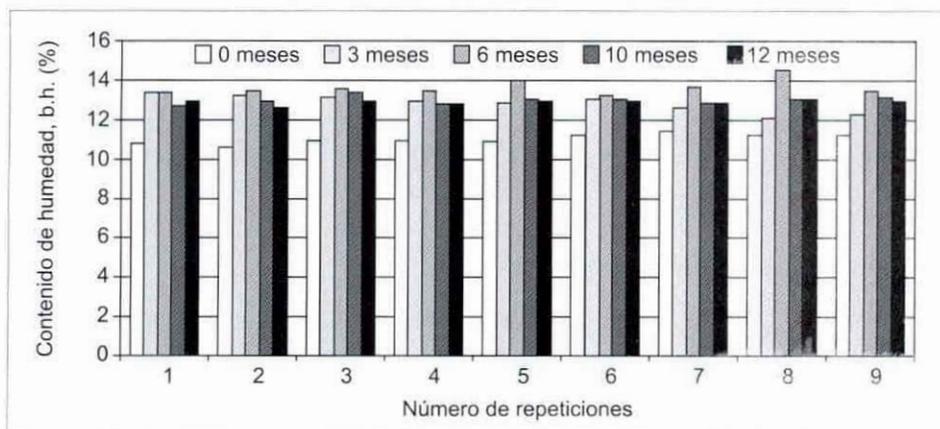


Figura 6. Contenido de humedad del café en silos en condiciones ambientales, como función del tiempo de almacenamiento.

trabajó durante la experimentación y el efecto de absorción o de secado que se obtuvo, de acuerdo a los conceptos de humedad de equilibrio del café.

2.3.2. Decoloración de los granos

Para la evaluación de la decoloración de los granos se siguió la norma de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, que indica de la presencia de los granos decolorados por sobresecado⁷, granos decolorados veteados por absorción de humedad durante el almacenamiento, granos decolorados por reposo y por el efecto de tiempos prolongados de almacenamiento, granos decolorados ámbar o mantequillo, causados por deficiencias de nutrientes en el suelo.

⁷ El proceso puede ser reversible, como ocurrió después de dos años en el silo número 17 de la planta de silos de Bello, Antioquia.

Tabla 5. Condiciones controladas del aire y su influencia en el contenido final de humedad de los granos.

Temperatura del aire	Humedad relativa del aire (°C)	Contenido de humedad de equilibrio, b.h. (%)	Efecto de acondicionamiento de los granos (%)
15	70	11,0	Deshidratación
20	70	11,0	Absorción
18	68	10,7	Equilibrio
11	80	11,0	Deshidratación

En la Figura 7 se muestra la **decoloración** expresada en porcentaje de granos decolorados sobre el total de la muestra, para cada uno de los sistemas de almacenamiento utilizados durante el transcurso del proceso de almacenamiento.

Después de un año de almacenamiento el valor promedio de decoloración del café almacenado en los silos con enfriamiento mecánico fue de 2,1%; el valor promedio de decoloración del café almacenado en el silo sin aireación fue de 4,1% y el valor promedio de decoloración del café almacenado en sacos, en forma convencional, fue de 22,0%. Estos resultados categóricos a favor del almacenamiento con enfriamiento mecánico se presentan en la Tabla 6.

2.3.3. Presencia de microorganismos

Se determinó la población de microorganismos indeseables presentes en el café almacenado en 4 silos previamente seleccionados y representativos de la experi-

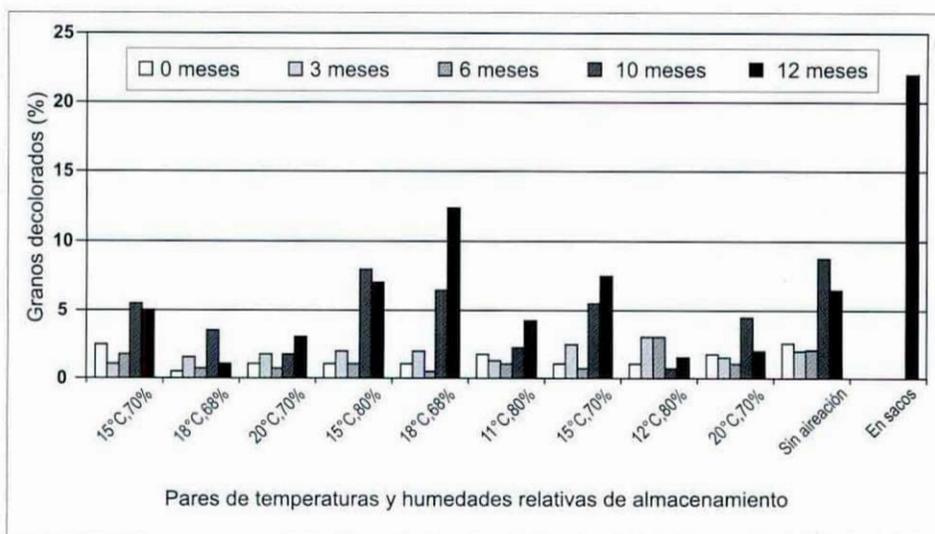


Figura 7. Granos decolorados como función de las condiciones controladas del aire de enfriamiento mecánico, falta de enfriamiento y el almacenamiento tradicional en sacos.

Tabla 6. Comparación de los granos decolorados según el sistema de almacenamiento empleado luego de 1 año de almacenamiento.

Granos decolorados en silos provistos con enfriamiento mecánico (%)	Granos decolorados en el silo sin aireación mecánica (%)	Granos decolorados en los sacos, sometidos a las variaciones ambientales (%)
2,1	4,1	22

mentación, mediante la escala de 0 a 18, en la cual 0 indica una población nula y 18 la máxima tolerable. Se obtuvo un valor promedio (durante los 12 meses de almacenamiento) para todos los silos que utilizaron el enfriamiento mecánico de 9,1 que indica buenas características de almacenamiento. El valor medio correspondiente al silo sin aireación mecánica fue de 11,2 valor próximo al límite permisible de 14, y las muestras de los sacos almacenados convencionalmente un valor de 17,4 que lo descalifica como café de buena calidad.

2.3.4. Calidad de la bebida

El café almacenado bajo condiciones controladas conservó una calidad aceptable (Figura 8), según la calificación global de la bebida hasta después de 10 meses de almacenamiento, que clasifica el café en tres categorías: taza deficiente (2-3), taza regular (4-6) y taza aceptable (7-9). Para algunas combinaciones de temperatura y humedad relativa, **la buena calificación de la bebida se mantuvo hasta después de un (1) año**. La combinación de la humedad del grano entre el 10 y el 12% y temperaturas en el rango de 10 a 15°C, permitieron el mejor almacenamiento y la mejor conservación de la calidad.

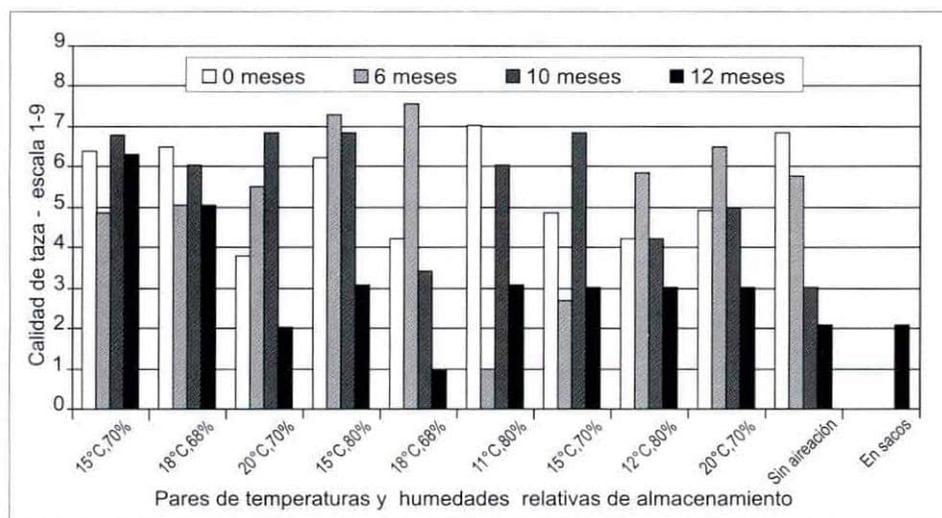


Figura 8. Calidad de la bebida de café, según las condiciones del aire enfriado mecánicamente, aire sin enfriar y café almacenado en sacos en forma convencional, según el tiempo de almacenamiento.

2.3.5. Conclusiones

Según las anteriores consideraciones se concluye que:

- El almacenamiento a granel en condiciones de aireación controlada mostró ventajas relacionadas con el porcentaje de grano decolorado, prueba de taza, contenido de humedad y población de microorganismos sobre el café almacenado en sacos, y sobre el silo sin aireación, en las condiciones ambientales que se desarrolló el experimento en Chinchiná (20,6°C de temperatura y 76% de humedad relativa).
- Para un **almacenamiento de hasta 1 año**, para garantizar la mínima pérdida de calidad, **se recomiendan dos combinaciones de temperatura y de humedad relativa, 15°C - 70% y 18°C - 80%. El caudal específico de almacenamiento debe ser igual o superior a 1m³ /min.Ton.**^{8,9}
- Para almacenar café pergamino seco a granel por un período máximo de 10 meses con una mínima pérdida de calidad, utilizando aire enfriado mecánicamente, se recomiendan las siguientes combinaciones de temperatura y de humedad relativa: 15°C - 70%, 18°C - 68%, 20°C - 70%, 15°C - 80% y 11°C - 80%.
- El café almacenado en sacos de fique en las condiciones normales de almacenamiento en sacos, se humedeció por encima del valor máximo recomendado para el almacenamiento (12%) y se decoloró por encima de los valores aceptados comercialmente. Las poblaciones de los microorganismos sobrepasaron los valores admisibles y como consecuencia, la calidad de la taza fue deficiente a partir de los 3 meses, en algunos casos.
- El criterio principal de manejo de las condiciones adecuadas de temperatura y humedad del aire, en el enfriamiento mecánico, lo constituyen las relaciones dinámicas de **presiones de vapor** en la superficie de los granos (que dependen de la temperatura del grano y de su humedad) y la presión de vapor del aire. Si los granos presentan temperaturas de 5°C o más, por encima de la temperatura ambiente, es posible practicar la aireación, aún con aire con humedades relativas de saturación (100%), sin que el café adsorba humedad. Este fenómeno se debe a que la presión de vapor en la superficie del grano es mayor que la presión de vapor del aire saturado.

⁸ Para calcular la presión y potencia necesarias se debe consultar la sección que presenta las relaciones de caudal y pérdida de presión estática por el paso del aire a través del café depositado a granel (Ver Sección 4.8.2)

⁹ En silos de gran diámetro el tiempo de permanencia de los granos fríos puede ser de más de un año, como se ha verificado en la planta de Silos de Bello, Antioquia. La explicación se da en términos térmicos, puesto que el pergamino seco es un elemento aislante térmico excelente, (conductividad térmica $k=0,08$ w/m.°C y difusividad térmica $\alpha=1,4$ E-7), (71).

- Existe una tendencia a que el café se sobreseque ligeramente durante el período de enfriamiento, proceso que toma lugar en solo unas horas. Este inconveniente tiene solución mediante aireaciones posteriores utilizando aire con humedades altas, como las que ocurren en las horas nocturnas y en las primeras horas de la mañana. Así se ha efectuado esta práctica por los técnicos de la planta de silos de ALMACAFÉ de Bello, Antioquia, en una batería de 60 silos de 30m de alto, 6m de diámetro con una capacidad de almacenamiento de 340ton de café pergamino seco por silo (Figura 4). En efecto, siguiendo las recomendaciones de aireación mecánica nocturna de Cenicafé, ha sido posible poner en práctica comercialmente los sistemas de aireación, disminuyendo en promedio 4°C en las masas de café a granel almacenado en toda la batería de silos, con inmensas ventajas, en comparación con el sistema convencional de almacenamiento en sacos (76).
- Los resultados obtenidos en estas investigaciones son altamente satisfactorios y coinciden con logros similares obtenidos para todos los granos y leguminosas y para semillas, aptos para ser almacenados a granel con aireación mecánica. En particular, para café, así lo habían reportado o previsto varios investigadores, incluyendo los técnicos de Federacafé, antes de la construcción de los silos de Bello y otros investigadores como Stirling (168) y Teixeira *et al.* (170).

2.4. EFECTO DEL SECADO Y DEL ALMACENAMIENTO EN LA CALIDAD DE LA SEMILLA DE CAFÉ (Var. COLOMBIA) ¹⁰

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia produce la totalidad de la semilla de la variedad Colombia, resistente a roya del cafeto, la almacena adecuadamente y la entrega a los comités departamentales de cafeteros, con el vigor necesario para que los agricultores puedan obtener nuevas plantas robustas y sanas.

Hasta el año de 1983, cuando hizo presencia la roya del café en Colombia, todas las semillas de café eran producidas directamente por los propios caficultores. En ese mismo momento, en el cual se comenzó la explotación comercial de la variedad Colombia, para obtener las semillas de las distintas variedades de café se efectuaban las operaciones de cosecha y de beneficio con el mayor cuidado, cosechando manualmente solo los mejores granos con énfasis en el uso manual en todas las operaciones de beneficio, se operaban las despulpadoras a menores revoluciones y se secaban los granos a la sombra.

A partir de 1983 la sección de Ingeniería Agrícola de Cenicafé, desarrolló la tecnología necesaria **para procesar masivamente la semilla de café**, que se comenzaba a producir en los campos especiales de propagación.

¹⁰ Preparado por Álvarez, G. J. y Roa G. Ingeniería Agrícola. Cenicafé.

Se modificaron los conceptos de beneficio convencional y se desarrollaron procesos modificados para despulpar, clasificar, lavar, transportar, secar y almacenar la semilla. En las secciones 2.5. y 3.9. se presenta la tecnología apropiada para lavar, transportar y desmucilaginar la semilla del café, utilizando ya sea motobombas semisumergidas con un sistema hidráulico de transporte y de recirculación de agua, y los desmucilagadores mecánicos.

En la presente sección se presentan los resultados más relevantes de la investigación realizada para mantener la calidad de la semilla durante el proceso del secado y de almacenamiento (70). Es de anotar que los resultados de esta investigación tuvieron una aplicación inmediata. En efecto, tan pronto se presentó el informe final con conclusiones contundentes sobre los mejores métodos para el sistema de secado y de almacenamiento, se decidió inmediatamente la adopción de las recomendaciones correspondientes, y así se ha logrado conservar la semilla en las condiciones ambientales del páramo de Letras en Caldas, con el vigor necesario para producir plantas normales, durante más de un año de almacenadas.

2.4.1. Efecto del secado en la viabilidad de la semilla de café

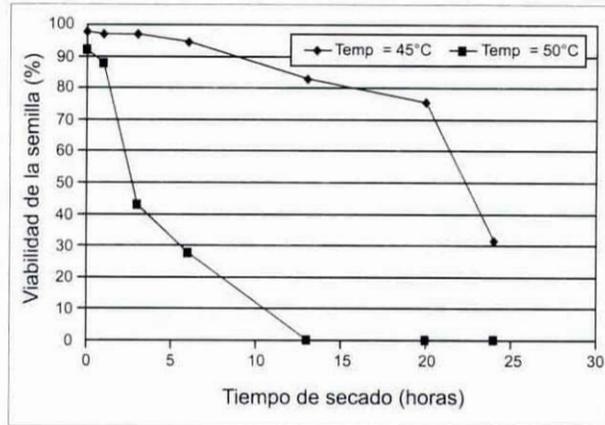
El daño por calentamiento de las semillas durante el secado origina pérdida de su viabilidad por destrucción de bandas celulares en regiones vitales del embrión; el daño térmico depende de la interacción de temperatura con el tiempo de exposición y el contenido de humedad de la semilla, es decir, altas humedades del grano con altas temperaturas durante tiempos prolongados, son condiciones desfavorables que originan pérdida de viabilidad de la semilla.

No obstante, al inicio de los procesos normales de secado y a pesar de la alta temperatura del aire, el grano está lejos de verse expuesto a esas condiciones debido a que el proceso de evaporación es refrigerante (Figura 107). De otro lado, el endospermo del café es semiceluloso y debido a las pérdidas de humedad a tasas de deshidratación elevadas, se puede contraer y estrangular el embrión. Se estima que los dos fenómenos, el de daño térmico y el daño físico al embrión puedan explicar, simultáneamente, el daño en la viabilidad de la semilla del café durante el proceso de secado con aire de temperaturas excesivas.

En la Figura 9 se observa el efecto del **daño térmico** por la temperatura del aire de secado en una población de semillas dispuestas en forma estática. Entre la primera y tercera hora de secado, a 50°C de temperatura del aire, el 43% de las semillas habían perdido su viabilidad. A la temperatura de secado de 45°C la semilla mantuvo su viabilidad por encima de 90% hasta las 10 horas de secado, detectándose a partir de ese instante reducción de la germinación, de tal manera que a las 20 horas el 76% de las semillas permanecían viables. Ninguna de éstas temperaturas se podría utilizar para secar semillas en capas estáticas.

Ensayos posteriores del mismo tipo demostraron que la viabilidad de la semilla de café se mantenía por encima del 95%, cuando se utilizaron temperaturas del aire de

Figura 9. Influencia de la temperatura del aire de secado en la viabilidad de la semilla de café secada en capas delgadas.



secado de 38°C, o menores. No solamente se logró mantener la viabilidad de éstas semillas inmediatamente después del secado, sino durante su almacenamiento prolongado, como se verá en la siguiente sección.

2.4.2. Efecto del almacenamiento en la viabilidad de la semilla de café

Se realizaron 70 pruebas de almacenamiento comercial de semilla de café empacada en bolsas de polietileno herméticas, de 2kg de capacidad, en tres bodegas de almacenamiento de ALMACAFÉ, en diferentes pisos térmicos, para conocer la viabilidad según las condiciones de humedad del grano, de temperatura del aire de secado y condiciones ambientales de almacenamiento. Las condiciones de temperatura ambiente promedio de las bodegas de almacenamiento se consignan en la Tabla 7.

En la Figura 10 se muestra la disminución típica de viabilidad de la semilla durante el almacenamiento durante la serie de experimentos ejecutados; bajo las condiciones del proceso anotadas se observa que la semilla almacenada durante 270 días (9 meses), mantuvieron en las bodegas del páramo de Letras (Caldas), una **viabilidad** mayor al 95% y para Manizales una viabilidad mayor del 90%. La semilla almacenada en Chinchiná mantuvo su germinación alrededor del 85% hasta los 240 días, momento en que bajó abruptamente hasta el 68% en solo un mes.

Tabla 7. Condiciones de almacenamiento de la semilla de café, en tres pisos térmicos en la zona cafetera colombiana.

Piso Térmico	Promedio de temperatura °C
Alto de Letras	10,8
Manizales	19,7
Chinchiná	23,5

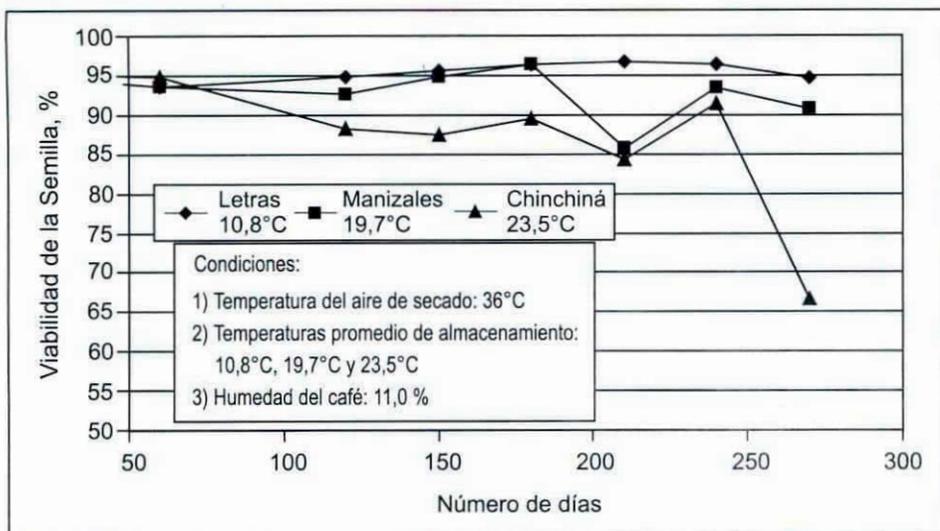


Figura 10. Efecto del tiempo y temperatura de almacenamiento del café, durante su almacenamiento prolongado.

Se observaron comportamientos similares para otras condiciones de almacenamiento, variando las temperaturas del aire de secado. Las mejores condiciones para el secado y almacenamiento de la semilla para mantener su viabilidad comercial durante aproximadamente un 1 año, fueron: temperatura del aire de secado máxima de 38°C, contenido de humedad del café de 11% y temperatura de almacenamiento de 11°C.

2.5. EFECTO DEL DESMUCILAGINADO MECÁNICO EN LA CALIDAD DE LA SEMILLA DE CAFÉ ¹¹

El daño de la semilla de café consiste en la pérdida de su función germinativa y ocurre frecuentemente en el proceso tradicional de beneficio por deficiencias en alguna de las etapas como el despulpado, el desmucilaginado o el lavado con bomba sumergible. Sierra (165, 166) estudió las operaciones de despulpado y lavado del café. El diseño mecánico apropiado de los sistemas mecánicos para evitar la influencia nociva de la percusión originada por las motobombas y las colisiones de los granos dentro de los ductos hidráulicos, se presentan en la sección 3.9.

Los equipos pueden originar granos de café trillados, mordidos y rayados, que afectan la viabilidad de la semilla y en algunos casos, se induce en el café una doble raíz o doble germinación del embrión. Para Mackay, citado por Sierra (165), algunos daños mecánicos causados al embrión tales como fractura y colapso, solo se notan después de haber germinado el grano y se manifiestan en anomalías

¹¹ Preparado por Álvarez G., J. Ingeniería Agrícola, Cenicafé .

como semillas separadas, tejidos cicatrizados, restricción de crecimiento de la planta, posición desigual de los cotiledones, raíces primarias e hipocotilos divididos o atrofiados y raíces atrofiadas, torcidas, con puntas en forma de rombo y de aspecto blando.

Es bien conocida la susceptibilidad de la semilla de café a la pérdida de la capacidad y vigor de germinar por el efecto de los daños mecánicos. Se ha demostrado que el exceso del manejo mecánico durante el transporte hidráulico con motobombas, puede provocar lesiones que disminuyen la viabilidad de la semilla por estar el embrión muy expuesto a la superficie del grano (166).

La bifurcación de la semilla consiste en la división de la raíz en dos ramales o en dos brazos que tienen forma de horquilla, situación que es corrientemente observada en el momento de conseguir “chapolas y fósforos”. Este fenómeno puede ser ocasionado por daños mecánicos y por sobredosis de productos químicos. Sierra (165) en su trabajo de evaluación de pérdida de calidad de la semilla de café durante el beneficio, encontró que las semillas que sufrieron daño mecánico en su almendra redujeron significativamente su capacidad germinativa. Las semillas rayadas por acción de la camisa en la despulpadora redujeron su capacidad germinativa desde 89,6% hasta un 50,5% y las semillas mordidas disminuyeron su capacidad germinativa de 89,6% hasta 40,4%.

Dadas las grandes ventajas del desmucilaginado mecánico y la gran conveniencia de procesar industrialmente las semillas de café producidas en los centros de producción de Federacafé, se efectuaron varios ensayos para investigar el posible daño a la semilla durante su procesamiento.

Se utilizaron en Cenicafé, Módulos BECOLSUB 600, 1000 y 3000 (Sección 3.10.6 y 3.14), siguiendo las recomendaciones de operación así: velocidad de la despulpadora de 160 rpm, velocidad del desmucilaginator de 860 rpm; relación agua - café pergamino seco de 0,8L/kg. Se realizaron pruebas en distintos días; en cada prueba se tomaba una muestra de 1kg al momento de ser despulpada y de la misma prueba se tomaba una muestra de 1kg ya desmucilaginata. Se seleccionaban granos de café con pergamino sano.

La viabilidad se midió a partir de la prueba de germinación que consistió en trillar manualmente los granos de café pergamino, desinfectarlos en una solución de 2,5g de Difolatán y 0,6g de Benlate por litro de agua donde se sumergieron por media hora. Se pusieron a germinar sobre papel húmedo colocado en una bandeja plástica puesta en la oscuridad, a temperatura ambiente por 35 días, al cabo de los cuales se realizó el conteo de las semillas que germinaron normalmente, (Figura 11). Las determinaciones de viabilidad se efectuaron a partir de dos repeticiones de la siembra de 50 semillas por bandeja y se expresaron como porcentaje de germinación.

Para determinar el daño por doble raíz y por raíz bifurcada, se contaron las semillas que presentaban uno u otro defecto en el mismo momento de realizar la lecturas

para germinación. En la Tabla 8 se muestran los promedios generales obtenidos de las distintas pruebas en cuanto a la viabilidad de la semilla de café, cuando es sometida a los tres tipos de BECOLSUB existentes. Para el modelo BECOLSUB 600 se realizaron 19 pruebas, para el BECOLSUB 1000 se hicieron 7 pruebas y para BECOLSUB 3000, 5 pruebas; en total se efectuaron 2.100 lecturas.

A partir de estos datos se observa que la **viabilidad de la semilla** expresada en porcentaje de germinación, fue muy alta en los tratamientos seleccionados: por despulpado (98,3%) y por desmucilaginado (98,9%), procedente del proceso BECOLSUB, lo que indica que la semilla puede ser procesada por este equipo en sus tres diferentes tamaños, con un resultado promedio de pérdidas de viabilidad de solo el 1,7 y 1,1%, respectivamente.

Respecto a la evaluación del daño por doble raíz por efecto del despulpado y del desmucilaginado en los tres modelos BECOLSUB existentes, utilizando las mismas muestras anteriores (Tabla 9) se observó como el tratamiento de despulpado para el BECOLSUB 600 registra daño hasta de 1,0% de las semillas, mientras que para los BECOLSUB 1000 y 3000 los daños son solo de 0,57 y 0,6 %, respectivamente, considerados como muy bajos.

Es común encontrar raíz bifurcada cuando la semilla se somete a excesos mecánicos, pero también por el mal uso de químicos en la preparación de la cama del germinador se puede inducir este desorden. Se evaluó el daño mecánico (raíz bifurcada) causado a la semilla al ser sometida al proceso BECOLSUB en sus tres diferentes modalidades. En la Tabla 10 se consignan los datos obtenidos.

En los tres tipos de módulos BECOLSUB el daño es del 0,25%, en promedio; el daño se aumenta por la acción del desmucilaginado para cada uno de los modelos de BECOLSUB, obteniéndose un promedio general de daño de 1,08%, lo que indica el poco efecto que esta tecnología causa en las semillas. Se concluye, por



Figura 11. Germinación normal de las semillas de café obtenidas por desmucilaginado mecánico.

Tabla 8. Promedios de los valores de germinación de la semilla obtenida en diferentes modelos BECOLSUB.

Tratamientos	BECOLSUB 600 % germinación	BECOLSUB 1000 % germinación	BECOLSUB 3000 % germinación	Promedios % germinación
Despulpado	96,7	99,4	98,8	98,3
Desmucilaginado	99,1	98,9	98,8	98,9

Tabla 9. Porcentaje de daño de doble raíz causado por diferentes modelos BECOLSUB utilizado para despulpar y desmucilaginar mecánicamente la semilla de café.

Tratamientos	BECOLSUB 600 %	BECOLSUB 1000 %	BECOLSUB 3000 %	Media %
Despulpado	1,0	0,57	0,6	0,72
Desmucilaginado	0,8	0,85	0,2	0,62

tanto, que la semilla de café puede ser procesada utilizando los módulos BECOLSUB sin que ocurran disminuciones de viabilidad, ni pérdidas por doble raíz y raíz bifurcada mayores de un 2%.

Estos resultados indican claramente que el desmucilaginador efectúa un **delicado proceso mecánico al retirar el mucílago** del café, en especial, porque es bien sabido que el embrión del grano es externo y fácilmente susceptible de daño mecánico.

Generalmente se acepta que en el deterioro de la calidad del café lo primero que se pierde es su viabilidad y el vigor, aún se mantengan las excelentes calidades de su bebida.

Se entiende que el mismo daño observado depende del efecto mecánico del desmucilaginado el cual se debe principalmente a fuerzas cortantes producidas entre los fluidos y los granos, y no por fricción y colisiones entre ellos (Sección 3.10.2.).

Tabla 10. Porcentaje de raíz bifurcada causado por diferentes modelos BECOLSUB utilizados para el despulpado y el desmucilaginado mecánico de la semilla de café.

Tratamientos	BECOLSUB 600 %	BECOLSUB 1000 %	BECOLSUB 3000 %	Media %
Despulpado	0,21	0,14	0,4	0,25
Desmucilaginado	0,63	1,43	1,2	1,08

Los resultados positivos de esta investigación han sido comprobados en la producción comercial de semillas con desmucilaginado mecánico de café durante seis años, en la Subestación de Cenicafé, el Rosario, Antioquia.

2.6. RECOMENDACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DE LA CALIDAD DEL CAFÉ Y DEL MEDIO AMBIENTE ¹²

Para evitar el deterioro de la calidad del café en el beneficio convencional y al utilizar el desmucilaginado mecánico se deben seguir las siguientes recomendaciones generales:

- Mantener limpios los elementos, equipos y tanques del beneficiadero.
- Evitar retrasos en el despulpado.
- Iniciar el secado del café en el menor tiempo posible; lo ideal es comenzar inmediatamente se cosecha. El café es un producto perecible y su deterioro se inicia a las pocas horas de cosechado.
- No mezclar cafés de diferentes días durante la fermentación y evitar sobrefermentaciones.
- Hay que tener en cuenta que la fermentación mencionada en el proceso del beneficio del café, se refiere solamente a su efecto en el mucílago y se realiza en el sistema de beneficio tradicional sólo para facilitar su lavado. El grano no debe fermentarse. La fermentación de los granos ocurre si se dejan durante más de un día sin someterlos al secado. El grano fermentado es un defecto que puede anular su valor comercial.
- Se deben beneficiar sólo granos maduros; los granos verdes dan acidez astringente indeseable; los granos sobremaduros ocasionan sabores agrios y los granos negros sabor acre y carbonoso.
- Si se utiliza el desmucilaginado mecánico no deben procesarse granos verdes, ni recuperarse granos guayabas viejos. El desmucilaginado mecánico permite, en forma general, eliminar parte de los granos negros y deteriorados triturándolos y evacuándolos por la malla troquelada. De otra parte, la mayor parte de los granos verdes resultan trillados debido a la falta de mucílago y pueden retirarse fácilmente mediante zarandas planas, después de secos.
- No deben repasarse cafés guayabas de otros días de cosecha, debido a que la larga permanencia del grano con la pulpa origina pergamino manchado y propicia sabores indeseables en la bebida.

¹² Preparado por Puerta, G. I. y Oliveros, T., C. E. Química Industrial e Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

- Es necesario verificar que haya sido retirado totalmente el mucílago para evitar la presencia de pergamino manchado y la bebida producida tenga sabor agrio.
- Al lavar el café se debe utilizar agua limpia en la mínima cantidad posible, para conservar el medio ambiente y la calidad del café.
- El secado debe comenzarse inmediatamente después del lavado. No se recomienda amontonar cafés con diferentes humedades. Es importante controlar la humedad final del café pergamino para que no supere el 12% ni se sobreseque por debajo del 10%, en todas las secciones del secador.
- Debe almacenarse el café en lugares secos y a temperaturas moderadas (65% a 70% de humedad relativa, 10 a 12°C); así se reduce al máximo la acción metabólica, se evita la aparición de hongos y toxinas y se puede mantener la germinación hasta por un año. El lugar de almacenamiento de café debe estar libre de reactivos químicos, fertilizantes, concentrados para animales, combustibles o cualquier otro producto que expida olores que puedan ser absorbidos por el café.

CAPÍTULO 3

Beneficio Ecológico del Café



BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ

El beneficio ecológico, como lo define y promueve Cenicafé, consta de varios elementos o componentes. Para que el concepto de beneficio ecológico sea exitoso, todos sus elementos deben estar proyectados, instalados y operados de acuerdo a especificaciones técnicas estrictas, ya que es fácil perder todo el concepto ecológico y de calidad si no se efectúan cada una de las operaciones siguiendo las especificaciones técnicas, con precisión. En general se recomienda que las personas encargadas de proyectar y construir todas las obras y delinear las operaciones, sean técnicos especializados.

Como el beneficio ecológico del café por vía húmeda puede ser un proceso continuo (a excepción del secado), que consta de varias etapas unitarias para transformar la cereza del café en café pergamino seco, se hace necesario el dimensionamiento estimando de manera adecuada las capacidades de cada uno de los procesos y disponer de sistemas de transporte adecuados para llevar, en primer lugar, la materia prima desde los lugares de cosecha hasta el beneficiadero y transportar, en segundo lugar, el café en sus diferentes estados y también los subproductos, de una etapa a otra, dentro del beneficiadero.

Para realizar el transporte de forma que el impacto ambiental sea mínimo, se requiere:

- Disminuir al mínimo los requerimientos de agua o eliminarla, si es posible, utilizando transportadores por gravedad o mecánicos.
- Recircular el agua estrictamente necesaria para el transporte, en caso de que el uso de ésta resulte indispensable, sin dejarla descomponer para que no altere la calidad del café.
- Evitar los daños al ecosistema, como por ejemplo, los causados al suelo en la construcción de carreteras dentro de las fincas.

3.1. MANEJO DEL CAFÉ EN CEREZA ¹³

El café debe ser recolectado con el mayor cuidado. En particular, se recomienda recolectar solamente los **granos maduros** en forma oportuna, ejecutando los pases

¹³ Preparado por Sanz, U., J. R. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

necesarios y evitando quebrar las ramas. Recientemente, FEDERACAFÉ ha recomendado incrementar el número de pases en la recolección del café para evitar al máximo la permanencia innecesaria de frutos maduros en el árbol, que sirven de alimento y de sustrato para la reproducción de la broca del café.

Debe planearse la cosecha diaria de manera tal que tan pronto se termine, se pueda iniciar lo más rápido posible el beneficio. **El café en cereza es un fruto perecedero que se deteriora rápidamente; el método más apropiado y económico para detener el deterioro consiste en disminuir su humedad mediante el secado.**

3.1.1. Transporte del café cereza del campo al beneficiadero

El transporte del café cereza al beneficiadero puede hacerse de diferentes maneras: en el hombro de los recolectores, en el lomo de bestias (ganado mular o caballar), en automotores de diferentes capacidades, en cafeductos, y utilizando cables aéreos de gravedad o accionados por motores.

3.1.1.1. Transporte del café cereza por cafeductos

La contaminación de las aguas puede iniciarse en la etapa de transporte del café cereza desde el cultivo al beneficiadero, si se utilizan **cafeductos**,¹⁴ práctica utilizada en algunas regiones de Colombia.

Cenicafé y el Comité de Cafeteros de Antioquia, realizaron estudios para evaluar ésta técnica y posiblemente, contribuir a la disminución de los consumos de agua y de su contaminación. Se realizó una investigación con el fin de determinar las cantidades de agua mínimas para transportar café cereza por cafeductos (128), utilizando diferentes grados de inclinación de la tubería PVC sanitaria: 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 26 y 28° y distintos diámetros, 7,62, 10,16 y 15,24cm (3, 4 y 6 pulgadas). Cada prueba se repitió tres veces.

Durante la investigación se encontraron las relaciones que determinan las capacidades de transporte y en particular, se demostró que con inclinaciones entre 2 y 20°, con respecto a la horizontal, la capacidad de transporte es independiente del diámetro de la tubería utilizada en el cafeducto y que el criterio de selección de un diámetro mayor, depende de la cantidad de impurezas, livianas y pesadas que pueda poseer el café cereza recolectado. Para las inclinaciones de 25, 26 y 28° se observó que con el aumento del diámetro aumenta la capacidad de transporte.

¹⁴ **Cafeductos** son sistemas de transporte del café en cereza dentro de tuberías cerradas de PVC, con ayuda del agua y de la gravedad proporcionada naturalmente por las pendientes del terreno. En estos sistemas, el agua se contamina sensiblemente y no se recircula, por las dificultades técnicas y los altos costos.

3.1.1.2. Transporte del café cereza por cable aéreo de gravedad

Los transportadores por cable aéreo de gravedad son una alternativa ecológica y de reducción al esfuerzo humano en el transporte motorizado o humano, de sacos de 60kg en zonas de ladera, donde normalmente los suelos se presentan húmedos y demasiado lisos. El transportador por **cable aéreo de gravedad** consiste en un cable de acero (Figura 12), apoyado en dos soportes, sobre el cual se mueve una carga desde un punto elevado hasta un punto ubicado en un nivel inferior, utilizando la energía potencial por la diferencia de alturas.

Con el fin de determinar los parámetros que gobiernan este tipo de transportadores para movilizar bultos de café cereza colgados de un dispositivo polea-gancho, se fabricó en Cenicafé (126) un banco de pruebas consistente de un cable suspendido entre dos torres de acero, al cual se podía variar su pendiente entre 5 y 20% y las flechas máximas entre el 4 y el 8%.

En los transportadores de cable aéreo por gravedad se define como **cuerda** (C), a la longitud de la recta que une los puntos de carga y descarga; **pendiente** (m), a la relación que existe entre la distancia vertical (Y) y la distancia horizontal (X) entre los puntos de carga y descarga, expresada en porcentaje (%); **deflexión** (f), a la distancia vertical que existe entre un punto del cable y la cuerda; y, **flecha máxima** (y), a la relación que existe entre la deflexión máxima y la cuerda, expresada en porcentaje (%).

La investigación consistió en determinar las mejores combinaciones de flechas y pendientes que no requirieran dispositivos de frenado en la descarga, utilizando dos tipos de cojinetes en las poleas: bujes en bronce fosforado y rodamientos rígidos de bolas. Con pendientes entre 10 y 12,5% y flechas de 4 y 5%, la polea de bujes en bronce fosforado tuvo excelente desempeño transportando sacos de 60kg de café cereza. Con pendientes superiores al 15% se requiere de dispositivos de frenado en la descarga. Con la misma carga y la misma polea, las flechas de 6 y 8% no mostraron características recomendables por la presencia de ondas que evitaron la estabilidad del sistema de transporte.

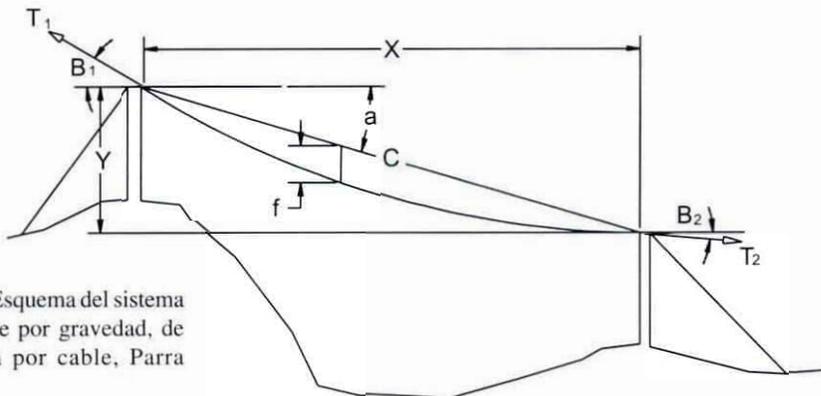


Figura 12. Esquema del sistema de transporte por gravedad, de café cereza por cable, Parra (125).

Cuando se utilizó una polea con rodamientos rígidos de bolas y carga de 60kg de café cereza, se hizo necesario el uso de dispositivos de frenado en todas las combinaciones; para lograr la velocidad cero en el lugar de descarga, con este tipo de poleas, se propusieron flechas menores que la mínima estudiada (4%). Con base en los resultados obtenidos, se recomienda que para el transporte por cable aéreo de gravedad se debe:

- Realizar un plano topográfico detallado y seleccionar la altura de las dos torres.
- Seleccionar adecuadamente el cable.
- Diseñar las estructuras que soportan el cable.

El diámetro mínimo de cables de acero para transportadores de café cereza por cable aéreo de gravedad, en las condiciones que se enumeraron, debe ser de 12,70mm (1/2") para longitudes hasta 300m. Por cada 120m adicionales, deben agregarse 3,17mm (1/8").

Las torres que sostienen el cable deben diseñarse a flexo-compresión, debido a que las tensiones máximas en el cable T_1 y T_2 tienen componentes verticales y horizontales. Parra (126) determinó en su estudio las ecuaciones necesarias para el adecuado diseño.

3.1.1.3. Transporte del café cereza por cable aéreo motorizado

De igual forma que el sistema de transporte por gravedad, y con el mismo objetivo ecológico y de mitigar el esfuerzo humano, en Cenicafé se diseñó y construyó un transportador mecánico de café cereza por cable aéreo (129) para el transporte de seis sacos de café de 60kg mediante tracción, en una vagoneta metálica desde un punto inferior a otro de mayor altura. El proyecto de transporte por cable incluyó trayectos rectos y curvos. En ese estudio se definieron todas las ecuaciones de diseño de las estructuras, de los cables, de los apoyos mecánicos y en general, de todos los elementos importantes del sistema.

3.1.2. Transporte de café cereza por gravedad dentro del beneficiadero

El transporte por gravedad es un sistema ecológico, y en muchas oportunidades, el más sencillo y económico. No obstante, algunas veces existen muy buenas infraestructuras antiguas, ya construidas, o el café se recibe portando objetos duros como piedras y metálicos, y resulta impracticable modificar los sistemas para poder utilizar la gravedad como medio de transporte, por el número y complejidad de las obras civiles necesarias, o por el daño que se le ocasiona a los equipos.

El transporte del café por gravedad exige algunos requerimientos técnicos especiales, relacionados con las propiedades físicas del café y de la superficie con que estén en contacto. Para garantizar de que se utilice transporte por gravedad sin problemas de represamiento del material, se obtuvieron los **ángulos de desliza-**

miento natural del café en diferentes estados (116), sobre diferentes superficies, comúnmente utilizadas en la construcción de beneficiaderos. En la Tabla 11 se presentan los resultados.

3.1.3. Tolva seca para la recepción del café cereza

Para el mejor control de la operación global del beneficiadero, de la calidad de la materia prima y del café obtenido, y para poder calcular con propiedad el rendimiento (Capítulo 5) es muy importante pesar el café cereza previamente caracterizado, individualizando las medidas según los lotes de donde proceda, antes de iniciar y después de terminar su transformación.

Las tolvas (Figura 13), pueden ser construidas en madera, o en madera recubierta por láminas de aluminio. El ángulo formado entre sus paredes y el plano horizontal (el piso) debe de ser de 45 a 50° o sea, tener una pendiente igual o superior al 100%. Esta pendiente también se debe mantener en los ductos que conducen las cerezas a las despulpadoras, especialmente en los casos de que el recibo se encuentra fuera del beneficiadero, para aprovechar la gravedad. En estas tolvas se puede recibir el café transportado en sacos o a granel. Si es a granel se debe disponer de elementos

Tabla 11. Ángulos de deslizamiento en grados, para el café en diferentes estados y sobre distintas superficies*

Superficie	Estado del café				
	Cereza	Despulpado	Lavado	Pergamino seco	Almendra
Madera cepillada con fibra perpendicular al flujo	33,0	30,1	50,4	21,3	24,2
Madera cepillada con fibra paralela al flujo	32,2	33,8	47,2	24,2	26,6
Madera tosca con fibra perpendicular al flujo	36,5	38,0	51,3	50,2	29,7
Madera tosca con fibra paralela al flujo	37,2	38,0	50,2	52,4	25,2
Tubería PVC de 6"	26,1	15,1	31,0	19,8	18,8
Metal	31,8	16,7	33,8	29,2	21,8
Alfagrés	37,2	17,2	42,6	45,6	31,8
Concreto	28,8	35,8	49,2	57,2	45,0
Mayólica	31,8	19,8	41,3	44,1	29,7

* Para efectos prácticos, los datos obtenidos de la Tabla 11 deben multiplicarse por un factor empírico que varía entre 1,20 y 1,50 dependiendo de lo crítico de la aplicación; por ejemplo, para garantizar la descarga completa de las tolvas incluyendo el material que se encuentra en las aristas, el factor debe ser del orden de 1,40; para transporte en toboganes cortos (hasta 2m), del orden de 1,25; para toboganes medianos (entre 2 y 8m), del orden de 1,35; y para toboganes largos (entre 8 y 15m), del orden de 1,50. Adicionalmente se han usado con éxito toboganes metálicos para la descarga por gravedad de pulpa hasta las fosas, con una inclinación de 45°.

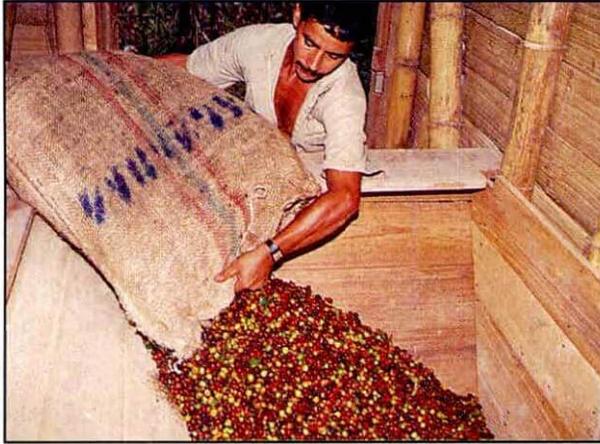


Figura 13. Tolva seca para la recepción del café cereza.

facilitadores para la descarga de las cerezas desde un vehículo (camión, volqueta, etc.) a la tolva. El ducto de descarga de la tolva seca puede construirse en forma circular, utilizando un tubo de 6 pulgadas de diámetro, o en forma cuadrada, de 20 centímetros de lado. El ducto debe disponer de una compuerta o guillotina para controlar manualmente el flujo del grano.

Es altamente deseable que la tolva que recibe el café cereza (cc) (Figura 41, parte superior) y lo alimenta a las despulpadoras, funcione completamente sin agua, de forma que el despulpado pueda ser efectuado en la misma forma. La forma más sencilla y la más recomendada para los pequeños caficultores es la de utilizar la tolva seca (Figura 13), en la cual se depositan las cerezas sin agua, previo el control para detectar objetos duros en el café.

En fincas con producciones inferiores a los 3.750kg (300@) de café pergamino seco al año, el recibo se puede efectuar en la tolva de la despulpadora, a la cual se le aumenta frecuentemente su capacidad prologándole las paredes, mediante tablas de madera o láminas metálicas. Normalmente se llena la tolva con el café y se dejan en espera los bultos restantes.

La **capacidad de la tolva** se calcula aproximadamente para el 70% del día pico. Generalmente se construyen en forma de tronco de pirámide invertida, acopladas a un ducto superior (paralelepípedo) conformado por las paredes de la tolva, de sección rectangular, y se localizan por encima de las despulpadoras, en un piso superior o fuera del edificio del beneficiadero.

Las dimensiones de una o varias tolvas (N) pueden determinarse con la ayuda de las Tablas 12 y 13, que presentan el volumen total (V) expresado en metros cúbicos, con alturas totales de 1,2m y 1,4m, en función de las longitudes de las tolvas (A) y (L) expresadas en metros. Si la tolva posee un volumen adicional en forma de paralelepípedo, se debe aumentar este volumen simplemente multiplicando la sección por la altura.

Tabla 12. Dimensiones y capacidad de tolvas de 1,2m de altura, para el recibo de café en cereza.

N=1			N=2		N=3		N=4		N=5		N=N	
A	L	V	L	V	L	V	L	V	L	V	L	V
0,4	1,0	0,96	2,0	1,93	3,0	2,89	4,0	3,86	5,0	4,8	$2,0+(N-2)$	$0,96+(N-1)\times 0,965$
0,5	1,2	1,29	2,2	2,4	3,2	3,52	4,2	4,64	5,2	5,8	$2,2+(N-2)$	$1,29+(N-1)\times 1,115$
0,6	1,4	1,63	2,4	2,87	3,4	4,12	4,4	5,36	5,4	6,6	$2,4+(N-2)$	$1,63+(N-1)\times 1,245$
0,7	1,6	1,96	2,6	3,31	3,6	4,67	4,6	6,02	5,6	7,4	$2,6+(N-2)$	$1,96+(N-1)\times 1,355$
0,8	1,8	2,26	2,8	3,71	3,8	5,15	4,8	6,60	5,8	8,0	$2,8+(N-2)$	$2,26+(N-1)\times 1,455$
0,9	2,0	2,53	3,0	4,04	4,0	5,56	5,0	7,07	6,0	8,6	$3,0+(N-2)$	$2,53+(N-1)\times 1,515$
1,0	2,2	2,74	3,2	4,30	4,2	5,87	5,2	7,43	6,2	9,0	$3,2+(N-2)$	$2,74+(N-1)\times 1,565$
1,1	2,4	2,87	3,4	4,47	4,4	6,06	5,4	7,66	6,4	9,3	$3,4+(N-2)$	$2,87+(N-1)\times 1,595$
1,2	2,6	2,92	3,6	4,53	4,6	6,13	5,6	7,74	6,6	9,3	$3,6+(N-2)$	$2,92+(N-1)\times 1,605$

N = número de tolvas.

A = ancho de la tolva, (m).

L = largo de la tolva, (m).

V = volumen de la tolva, (m³).

Tabla 13. Dimensiones y capacidad de tolvas de 1,4m de altura para café cereza.

N=1			N=2		N=3		N=4		N=5		N=N	
A	L	V	L	V	L	V	L	V	L	V	L	V
0,4	1,0	1,2	2,0	2,3	3,0	3,5	4,0	4,66	5,0	5,8	$2,0+(N-2)$	$1,16+(N-1)\times 1,165$
0,5	1,2	1,6	2,2	2,9	3,2	4,3	4,2	5,64	5,2	7,0	$2,2+(N-2)$	$1,58+(N-1)\times 1,355$
0,6	1,4	2,0	2,4	3,6	3,4	5,1	4,4	6,59	5,4	8,1	$2,4+(N-2)$	$2,02+(N-1)\times 1,525$
0,7	1,6	2,5	2,6	4,1	3,6	5,3	4,6	6,98	5,6	8,7	$2,6+(N-2)$	$2,46+(N-1)\times 1,675$
0,8	1,8	2,9	2,8	4,2	3,8	6,5	4,8	8,32	5,8	10,1	$2,8+(N-2)$	$2,91+(N-1)\times 1,805$
0,9	2,0	3,3	3,0	5,2	4,0	7,2	5,0	9,07	6,0	11,0	$3,0+(N-2)$	$3,33+(N-1)\times 1,915$
1,0	2,2	3,7	3,2	5,7	4,2	7,7	5,2	9,72	6,2	11,7	$3,2+(N-2)$	$3,70+(N-1)\times 2,005$
1,1	2,4	4,0	3,4	6,1	4,4	8,2	5,4	10,3	6,4	12,3	$3,4+(N-2)$	$4,03+(N-1)\times 2,075$
1,2	2,6	4,3	3,6	6,4	4,6	8,5	5,6	10,7	6,6	12,8	$3,6+(N-2)$	$4,20+(N-1)\times 2,125$
1,3	2,8	4,4	3,8	6,9	4,8	8,8	5,8	10,9	6,8	13,1	$3,8+(N-2)$	$4,44+(N-1)\times 2,155$
1,4	3,0	4,5	4,0	6,7	5,0	8,8	6,0	11,0	7,0	13,2	$4,0+(N-2)$	$4,49+(N-1)\times 2,165$

N = número de tolvas.

A = ancho de la tolva, (m).

L = largo de la tolva, (m).

V = volumen de la tolva, (m³).

Para instalaciones grandes, en las cuales se deben utilizar equipos mecánicos, se recomienda el uso del tornillo sinfín (Sección 3.13.), bandas, o cualquier medio no hidráulico. De esta forma se garantiza que la pulpa no presente agua adicional y retenga la máxima cantidad de mucílago (Sección 3.17.).

Como segunda opción, en casos de muy difícil aplicación del transporte mecánico para beneficiaderos grandes o para modificar beneficiaderos existentes de gran capacidad, o cuando la calidad del café no es la mejor, se puede considerar el **manejo hidráulico adecuado** de las cerezas para transportar el café cereza y retirar los objetos pesados y los flotes, incluyendo los granos excesivamente brocados. Para estos casos, el uso del agua puede ser lo más recomendable desde el punto de vista económico, dadas las grandes ventajas particulares que representa el transporte, la

clasificación y la eliminación de piedras y elementos duros utilizando este medio. En estos casos es indispensable la **recirculación del agua** en la operación diaria y el diseño adecuado de los tanques, ductos de transporte y del sistema hidráulico, en general. La cantidad de agua necesaria en estos casos no debe sobrepasar $0,4\text{m}^3$. Si se manejan grandes cantidades de café cereza el consumo específico de agua puede considerarse completamente despreciable. El agua utilizada en un día no puede reutilizarse al día siguiente.

Es indispensable, en éste segundo caso, retirar completamente el agua que escurre en la misma tolva de alimentación del café cereza mediante uno o dos pisos de fondo perforado, (Figura 74) antes del despulpado. Este es el procedimiento que se utiliza en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma (CBEA) (Sección 3.19.). De esta forma se minimiza drásticamente el uso de agua se clasifica el café y se retiran los objetos pesados y leves hidráulicamente y la mayoría de los granos altamente brocados. En este sistema se incluye un canal semisumergido, con muy buenos resultados.

Para que el segundo procedimiento funcione adecuadamente es necesario que antes de circular el agua, la tolva o tolvas de alimentación de la(s) despulpadora(s) siempre debe(n) encontrarse llena(s) de café cereza. De esta forma el agua tiene el menor espacio libre para desplazarse y entra directamente en la masa de café en donde se **disipa su energía** al ser forzada a pasar por el espacio intergranular de las cerezas, hasta donde descansan en el fondo de lámina perforada. De esta forma se logra una buena separación; la adición de una segunda etapa con doble fondo, en serie, complementa el retiro de prácticamente toda el agua presente en el café. Es necesario hacer un mantenimiento y limpieza periódica para evitar que se obstruyan los pisos perforados.

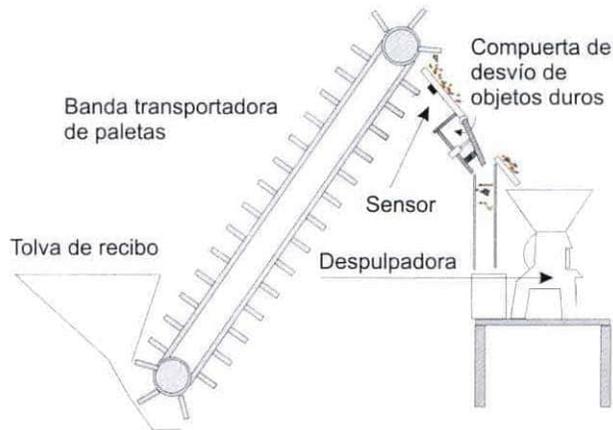
Una alternativa para el manejo mecanizado del café en cereza, consecuente con los modernos desarrollos de la tecnología BECOLSUB, y para eliminar la construcción convencional del segundo piso para lograr el transporte por gravedad, consiste en la utilización de transportadores de paletas para alimentar la tolva de la despulpadora, como se indica en la Figura 14. Adicionalmente, se estudian en Cenicafé métodos alternativos, incluyendo los electrónicos (1), **para retirar los objetos duros, como piedras y objetos metálicos del café en cereza, antes de entrar a la despulpadora.**

3.2. DESPULPADO DEL CAFÉ ¹⁵

Entre la pulpa y el pergamino de los granos de café maduros se encuentra el mucílago, un líquido gelatinoso con viscosidad y humedad apropiados para que mediante la acción de fuerzas que presionan el grano en las despulpadoras, ocurra el despulpado que separa los granos de café de la pulpa, sin adición de agua.

¹⁵ Preparado por Álvarez, G. J., y Oliveros, T. C. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

Figura 14. Utilización de transportador de paletas para alimentación de despulpadoras (incluyendo las que conforman los módulos BECOLSUB) y posible separación de objetos duros, mediante captación de señales electrónicas.



El uso de agua en el proceso de despulpado se consideraba necesario en los sistemas de beneficio convencionales, para obtener café de buena calidad. El despulpado sin agua era practicado por algunos pequeños caficultores en Colombia, pero esta técnica era considerada propia del atraso y carencia de los mínimos requerimientos técnicos necesarios para el adecuado beneficio del café.

Estudios realizados en Cenicafé (3), comprobaron la posibilidad de **despulpar el café sin agua** (Figura 15), utilizando las despulpadoras de cilindro horizontal y una vertical (modelo PENAGOS 255C), sin que se afecte la capacidad del proceso y la calidad de los granos despulpados, en las cuatro variables: pulpa en el grano, grano sin despulpar, grano trillado y grano mordido.

Para liberar a los granos de su envoltura exterior (pericarpio o pulpa) es necesario romper las fibras que la conforman mediante esfuerzos de tensión (longitudinales y transversales) y de cizallamiento. Estos esfuerzos se generan al comprimir las cerezas en el espacio conformado por una placa fija (denominada pechero) y una superficie móvil que puede ser la camisa de un cilindro o el diente de un disco.



Figura 15. Despulpadoras de eje horizontal, operadas sin agua.

Los canales del pechero, fuera de propiciar la separación de los granos de la pulpa, se disponen de forma inclinada para permitir el transporte hacia los orificios de salida y simultáneamente, el retiro de la pulpa del flujo de los granos por el efecto de arrastre de los resaltos afilados de la camisa o dientes de los discos y por la acción de la fuerza centrífuga suministrada por la rotación del cilindro

El proceso de despulpado de la cereza madura se presenta en una curva típica de fuerza aplicada vs. deformación (Figura 16). En este caso la ruptura de la pulpa se inicia cuando la carga aplicada es de 60 Newton (N) y la deformación de alrededor de 2,5mm (punto A). El proceso de ruptura de la pulpa continúa, las semillas comienzan a ser expulsadas y se da inicio a un nuevo proceso de compresión de las semillas en el cual se alcanzan valores de carga próximos a 80N y deformación de 4mm (punto B). El **proceso de compresión** puede causar en las semillas, especialmente en las de gran tamaño, deformaciones superiores a las que éstas pueden soportar sin sufrir daños estructurales (1,0mm) y que se reflejan al final del proceso de beneficio en los granos aplastados, veteados y decolorados, entre otros.

Las cerezas verdes son materiales mas rígidos que ofrecen gran resistencia al despulpado y consecuentemente, pueden no ser despulpadas y soportar cargas superiores a 200N, como se muestra en la Figura 17. Un alto porcentaje de estos materiales resulta con **daño mecánico** al pasar por la despulpadora. Los granos verdes y secos presentes en la masa de café cereza contribuyen a incrementar notoriamente la potencia requerida para accionar las despulpadoras.

Un aporte de importancia para la práctica del beneficio ecológico, por parte del Comité Departamental de Cafeteros de Antioquia y la Empresa Privada de ese departamento, es el desarrollo de una **despulpadora de disco** (Figura 49) que trabaja sin agua. Si se utiliza este equipo, se puede permitir la presencia de algunos objetos duros en el café cereza depositado en la tolva seca, principalmente piedras, que son triturados sin causar daños apreciables a los discos. No es este el caso de las despulpadoras de camisa horizontal tradicional, que son muy sensibles a los daños por presencia de los objetos duros.

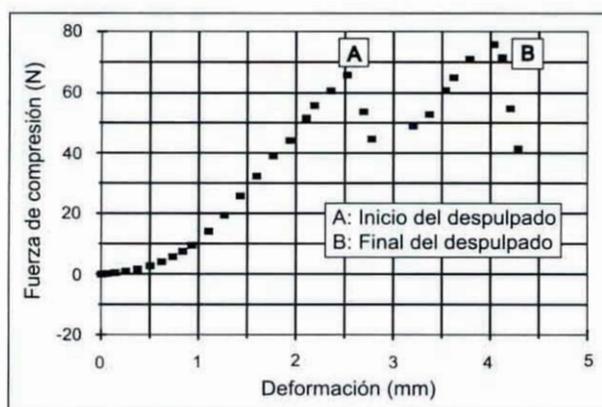
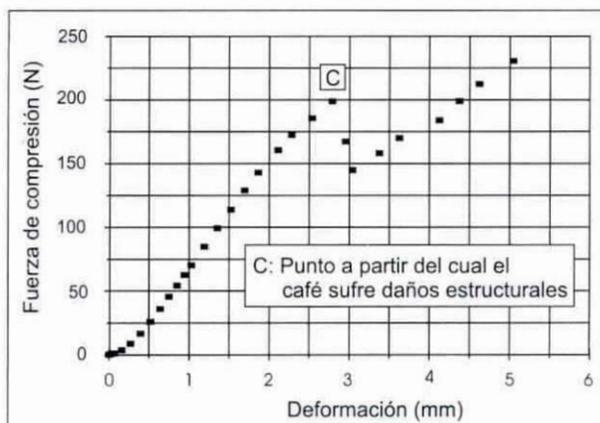


Figura 16. Comportamiento de una cereza madura de café sometida a compresión entre placas paralelas.

Figura 17. Comportamiento de una cereza verde de café sometida a compresión entre placas paralelas.



3.3. DESPULPADORA DE CAFÉ ACCIONADA A PEDAL

Como alternativa al uso de la fuerza manual del caficultor para accionar las despulpadoras, Cenicafé diseñó un sistema de despulpado utilizando máquinas despulpadoras convencionales accionadas por un mecanismo de bicicleta consistente en pedales y transmisión de potencia por cadena (Figura 18). Los detalles de construcción y lista de materiales necesarios se detallan en la publicación: Avances Técnicos de Cenicafé No 168 (4).

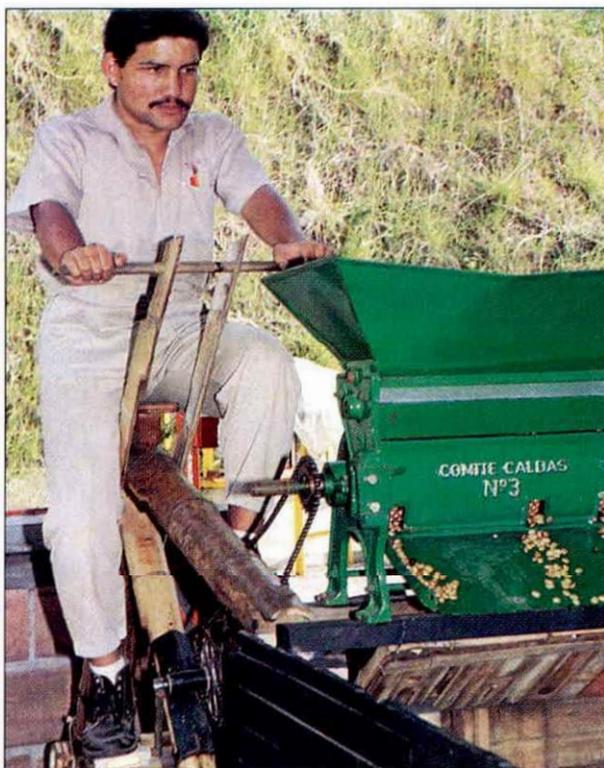


Figura 18. Despulpadora Nº 3 (tradicionalmente accionada por un motor de 1 hp) movida a pedal.

A la despulpadora del montaje a pedal se le aumentó la rotación en el eje alimentador de 42 a 82 rpm, modificando la relación tradicional de los piñones del eje del cilindro y el eje alimentador. Este cambio exige más torque, porque hay mayor alimentación del café cereza y no permite su accionamiento manual.

Mediante análisis estadístico realizado a una prueba con ocho repeticiones en la cual se comparó el proceso de despulpado efectuado manualmente con relación al nuevo sistema de accionamiento a pedal, se obtuvo un aumento de capacidad de 224 a 534kg de café cereza por hora. Las características de calidad del café despulpado estipuladas por la norma ICONTEC (85) se cumplieron para los dos tratamientos, en los cuales no hubo diferencias significativas y el esfuerzo efectuado por el operador de la despulpadora a pedal fue fácilmente soportable para un operario de la zona cafetera.

3.4. DISMINUCIÓN EN LAS PÉRDIDAS POR DESPULPADO

En estudio reciente contratado por el Comité de Cafeteros de Caldas (51) que incluyó 5.112 visitas a fincas durante la cosecha principal de 1995, se concluyó que las pérdidas en el despulpado representan en promedio, el 3,7% de la producción del departamento. Se registraron municipios con pérdidas en el despulpado del 9,0; 6,7; 6,5; 6,1 y 5,7%. Éstas ocurren principalmente por la sobrepresión que los granos reciben en la despulpadora durante su tránsito a través de los canales de los pecheros. Esta estrechez puede ser debida al mal diseño, mal estado, mala calibración y/o mal manejo de las despulpadoras, o a presencia de granos demasiados grandes y a granos que no se alinean adecuadamente dentro de la despulpadora, entre otras razones.

Cenicafé, adelantó estudios de optimización del equipo DESLIM (Sección 3.10.) para evitar este tipo de pérdidas con muy buenos resultados; se encontró que las sobrepresiones se pueden evitar simplemente aumentando la altura o la profundidad de los canales de los pecheros en 1 milímetro “descalibrando la despulpadora”, de forma que todos los granos fluyeran más libremente, con menos obstáculos, disminuyendo o eliminando las sobrepresiones y por tanto, **el daño mecánico**. En contraparte, como resultado de ésta alteración, se aumentó la proporción de granos sin despulpar, lo cual no constituyó ningún problema, según los resultados, porque el desmucilagador fácilmente despulpó los granos que no habían sido despulpados, sin afectarse su desempeño.

Al adicionar estas pérdidas debidas a la mala calibración de las despulpadoras, a los valores típicos de ahorro de pérdidas por el uso del desmucilagador mecánico, se puede contabilizar la eliminación total del orden del 8% de la producción cafetera mediante la correcta utilización del módulo BECOLSUB.

3.5. CALIBRACIÓN DE LAS DESPULPADORAS DE LOS MÓDULOS BECOLSUB ¹⁶

Para lograr el correcto funcionamiento de un módulo para beneficio ecológico del café es necesario operarlo en los rangos recomendados para los flujos de café cereza y de agua. El flujo de café en una despulpadora es afectado por la velocidad de rotación del cilindro, por el tipo de dosificador (dimensiones y la presencia de álabes en su superficie, en algunos modelos), por la calidad del café y principalmente, por la distancia libre entre el agitador y la platina (denominada cuchilla).

En el proceso de calibración de una despulpadora de cilindro horizontal se realizan las siguientes actividades:

- Se pesan generalmente 2 ó 3 muestras de 5 a 10kg de café cereza.
- Se toma una cereza de la tolva de la máquina al azar y se coloca en posición longitudinal en el espacio libre entre la cuchilla y el agitador.
- Se aflojan los tornillos que sujetan la cuchilla y se desplaza ésta hasta una distancia ligeramente superior a la mayor dimensión transversal de la cereza (13,5mm ancho promedio de una cereza).
- Se activa el motor de la despulpadora y se registra el tiempo que toma el despulpado del café depositado en la tolva.
- Dependiendo del valor de rendimiento obtenido, se cierra o se amplía la separación entre la cuchilla y el agitador y se repiten los pasos anteriores.

La calibración de una despulpadora, que es un proceso delicado en el cual hay que parar la máquina, se debe repetir al menos cada semana para lograr el mejor desempeño del módulo BECOLSUB, debido a que el tamaño de las cerezas, que en una misma finca varía de un lote a otro por diferentes factores (la edad de los árboles, entre otros), puede afectar el rendimiento de la máquina. En algunas despulpadoras se observan variaciones importantes en su desempeño por efecto de la calidad de la materia prima, lo cual afecta el desmucilaginado mecánico del café.

Con el fin de facilitar la calibración de las despulpadoras de cilindro horizontal, en Cenicafé se desarrolló un dispositivo mecánico (Figura 19), con el cual se puede variar la separación entre el agitador y la cuchilla **sin detener la máquina**. El mecanismo, diseñado inicialmente para una despulpadora 1 ½ del BECOLSUB 100, consiste de una compuerta en lámina de hierro de 3,18mm (1/8") de espesor, la cual posee dos apoyos soldados a un eje doblado de 10mm de diámetro. Este eje, roscado en un extremo se desplaza a través de un buje de hierro soldado a la estructura de la máquina. El elemento de regulación es una perilla de bronce de 5,08cm (2") de diámetro, que sirve de tuerca para la rosca, y está soportada por un buje de hierro también soldado a la estructura. Al girar, la perilla desplaza el eje acoplado a la compuerta regu-

¹⁶ Preparado por Oliveros, T. C. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

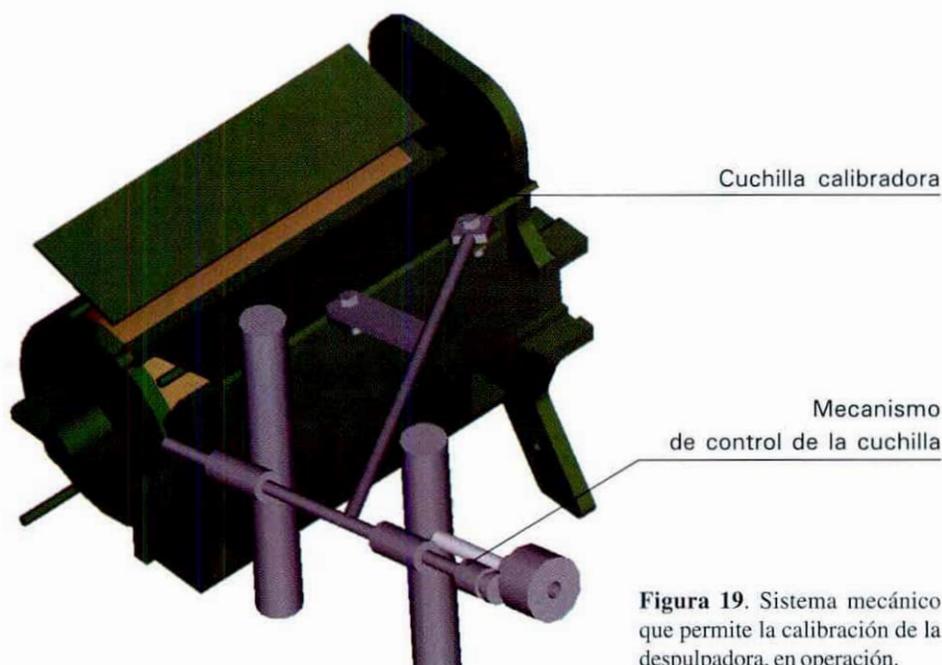


Figura 19. Sistema mecánico que permite la calibración de la despulpadora, en operación.

lando la entrada de café a la zona de despulpado. El mecanismo posee una contratuerca para fijar el punto de calibración que se desee en la máquina.

Este mecanismo puede ser diseñado para las máquinas de cilindro horizontal utilizadas para el beneficio del café. Con él se puede calibrar la despulpadora de cilindro horizontal en cualquier momento, forma rápida, sin detener su marcha, y ajustar el rendimiento del módulo BECOLSUB a la calidad de café cereza que se tenga. Gracias a este dispositivo, en el pico de cosecha, con el café de mejor calidad, se podrá operar el equipo a la mayor capacidad posible y en ocasiones, al inicio de cosecha o en épocas de sequía, a la capacidad adecuada para obtener café pergamino húmedo de buena calidad.

3.6. CLASIFICACIÓN DEL CAFÉ CON ZARANDAS ¹⁷

En diferentes investigaciones de Cenicafé se ha demostrado que utilizando el sistema de beneficio convencional es posible obtener café Tipo Federación (Figura 20), usando zarandas y tanques de fermentación del mucílago convencionales. Las zarandas deben ubicarse en el recibo del café despulpado para retirarle a los granos buenos la pulpa, los elementos extraños y los granos que no fueron despulpados. Las pasillas separadas pueden ser procesadas por otra despulpadora calibrada en forma especial, o por máquinas repasadoras o desmucilaginosos, para extraer los granos buenos. Las zarandas alternativamente pueden ser utilizadas también antes del despulpado, o después de que el grano pergamino haya sido secado.

¹⁷ Preparado por Álvarez, H. J. R. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

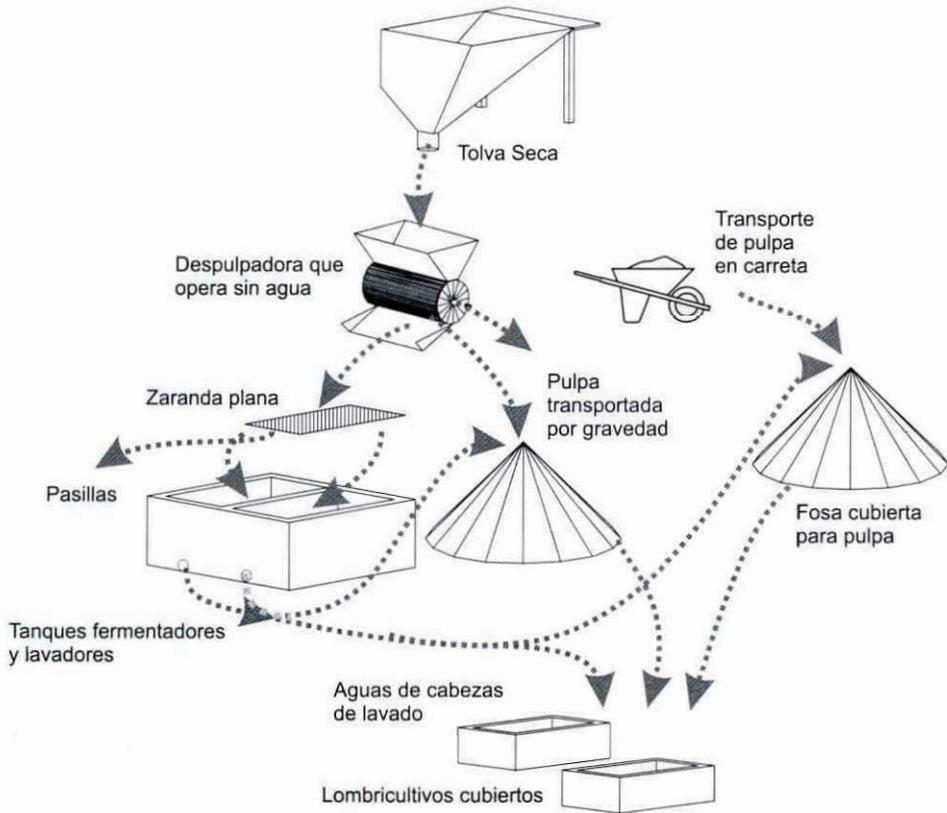


Figura 20. Esquema general del beneficio ecológico en el cual se utilizan zarandas y tanques de fermentación del mucilago tradicionales.

Las zarandas planas (Figura 24), se utilizan convencionalmente para pequeñas producciones y las zarandas cilíndricas de varillas, para mayores producciones (Figuras 65 y 66). En estas últimas y para evitar que los granos queden aprisionados entre las varillas, se puede utilizar un rodillo limpiador de cerdas que continuamente los retira; el rodillo se acciona con la misma zaranda. Este procedimiento evita la utilización de agua que comúnmente se usa con este fin.

Torres (172) concluye en su trabajo que una zaranda plana colocada después del despulpado fue suficiente como **sistema único de clasificación** en el beneficio. En particular, con la sola zaranda plana se logró retirar aproximadamente el 43,3% de las pasillas como se muestra en la Tabla 14 y en la Figura 21. Se complementa esta labor de clasificación durante el lavado en los mismos tanques de fermentación retirando manualmente los materiales flotantes por medio de dispositivos sencillos como una malla ó colador, con lo cual se obtiene un café pergamino seco de buena calidad, esto es, ajustado a las normas de compra de café establecidas por FEDERACAFÉ.

Tabla 14. Porcentaje de pasillas de café retiradas en la zaranda plana ubicada después de la despulpadora.

Prueba número	Pasilla inicial %	Pasilla final %	Pasilla retirada %
1	13,1	5,8	55,7
2	15,3	9,9	35,2
3	17,7	10,7	39,7
4	11,9	6,6	44,4
5	12,3	6,8	44,8
6	11,0	6,5	40,8
7	14,6	7,6	48,1
8	10,7	5,67	46,9
9	14,7	10,3	29,9
10	10,8	5,7	47,2
Promedio	13,2	7,6	43,3

En la Tabla 15, Álvarez (11) presenta los resultados de la evaluación de la calidad física del café procesado en un beneficiadero construido en Cenicafé para pequeños caficultores (Figura 24). Se trabajó en dos tipos de tanques de fermentación, el tanque tradicional y el tanque tina (186, 192), que presenta como novedad la modificación de las esquinas rectas del fondo, mediante rellenos de concreto, para formar unas superficies curvas y facilitar el manejo de las palas de agitación para el lavado y la disminución en el consumo del agua. Se utilizó una zaranda plana para retirar impurezas y los granos sin despulpar.

Se observa que los porcentajes de granos guayabas, media cara, pelados y las impurezas presentan valores muy bajos, lo cual permitió clasificar el café obtenido como café tipo Federación, en los dos tipos de tanques.

Los diferentes modelos de la tecnología BECOLSUB se construyen con una zaranda cilíndrica opcional (Figuras 22, 65 y 66), que clasifica el café, separando los

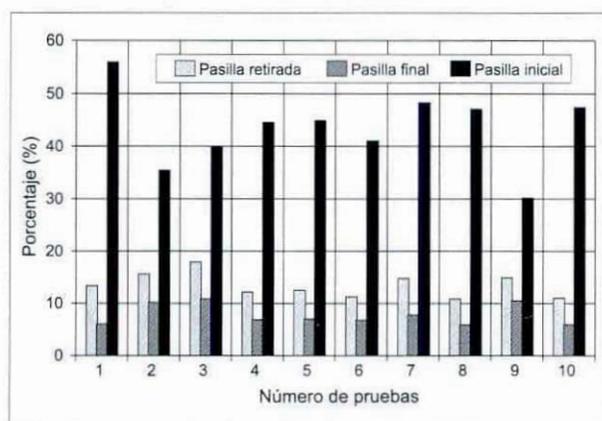


Figura 21. Porcentaje de pasillas en el café despulpado, retiradas en la zaranda plana.

Tabla 15. Calidad física del café procesado en el beneficiadero para el pequeño caficultor de Cenicafé (13).

Tanque tradicional				Tanque tina			
Clasificación de los granos separados							
G*	MC	P	I	G	MC	P	I
%	%	%	%	%	%	%	%
0,19	1,28	0,68	0,59	0,09	1,28	0,69	0,65
0,09	0,75	0,68	0,61	0,17	1,45	0,92	0,74
0,48	1,56	1,46	0,75	0,34	2,59	0,80	0,81
0,11	1,25	1,08	0,47	0,21	1,56	0,88	0,59
0,38	0,77	0,83	0,47	0,32	1,04	1,20	0,66
0,13	0,89	0,58	0,57	0,12	1,13	0,79	0,54
0,10	0,70	0,90	0,65	0,13	1,10	0,84	0,65
0,13	1,33	1,29	0,52	0,50	1,12	1,36	0,62
0,17	0,92	1,33	0,85	0,03	0,72	1,76	0,53
0,00	1,06	1,27	0,42	0,08	0,64	1,29	0,54
0,20	1,92	0,96	0,54	0,00	1,17	1,21	0,41
0,35	1,39	1,47	0,75	0,36	0,97	0,83	0,51
0,07	0,72	1,20	0,61	0,40	1,73	1,31	0,69
Promedio de valores:							
0,20	1,1	1,08	0,60	0,23	1,24	1,15	0,91

G = Granos Guayabas.

MC = Granos Media Cara.

P = Granos Pelados.

I = Impurezas.

granos de mejor calidad de los granos inferiores, de la pulpa y de materiales extraños al café, por el principio físico de las diferencias de tamaño. Son especialmente útiles cuando la calidad del café cereza es deficiente. La utilización de la zaranda puede ayudar a una mejor presentación del café pergamino pero el rendimiento del café en el beneficio se reduce (Capítulo 5).

La recomendación de Cenicafé de **no utilizar agua** en la clasificación de los diferentes estados del café y en particular, la eliminación del uso de canales de correteo y semisumergidos, induce en primera instancia a utilizar zarandas clasificadoras eficientes que funcionen sin agua, principalmente cuando la materia prima es de mala calidad.

La zaranda es opcional en el módulo BECOLSUB porque se ha demostrado que sin ella y contando con materia prima de buena calidad, es posible obtener café Tipo Federación. La explicación de este hecho se fundamenta en que el equipo DESLIM, (Sección 3.10.) es en sí un elemento clasificador, capaz de pulir granos buenos al retirarles la pulpa seca adherida, destruir los granos defectuosos que no tienen buena estructura física, y expulsar los que presentan dimensiones muy pequeñas.

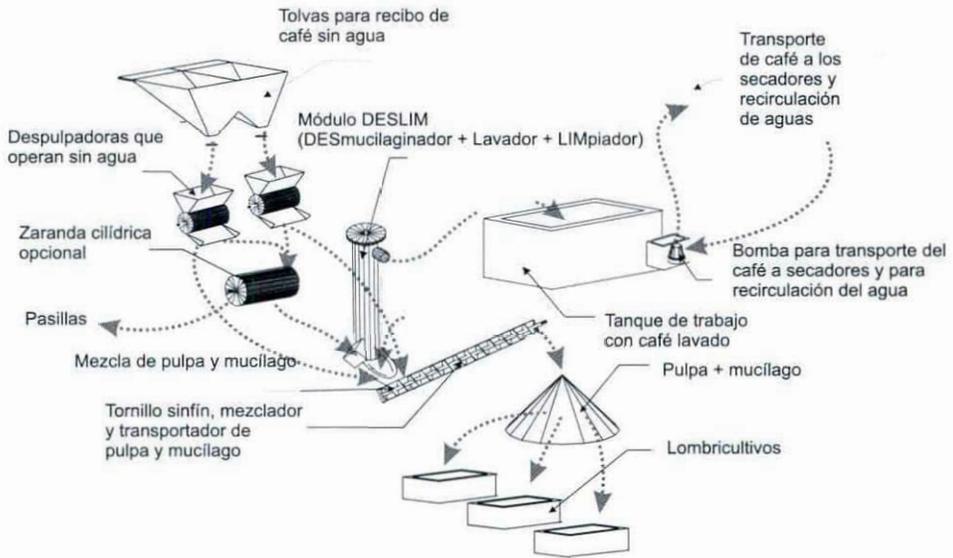


Figura 22. Esquema general del sistema de beneficio utilizando la tecnología BECOLSUB.

De otro lado, en el beneficiadero de Cenicafé se han utilizado las zarandas planas y cilíndricas con gran eficiencia para **separar los granos almendras** después de secados en los secadores de torre, IFC (Intermitentes de Flujos Concurrentes) (Figuras 23 y 104), mejorando notablemente la calidad del café. Este proceso de separación se constituye en una muy buena opción que no utiliza agua, para separar los granos brocados, verdes, y en general pasillas, que pueden perder su frágil pergamino por la acción combinada del desmucilagador, el manejo hidráulico y el secado, en los cuales los granos continuamente están en movimiento.



Figura 23. Zaranda para separar granos almendras, impurezas y subproductos, después de secado.

3.7. FERMENTACIÓN DEL MUCÍLAGO

El mucílago del café contiene 15% de sólidos en la forma de un hidrogel coloidal insoluble en agua, sin estructura celular; los sólidos presentes en éste tienen un 80% de ácidos pécticos y 20% de azúcares.

Durante la fermentación ocurren múltiples reacciones bioquímicas que permiten después de 10 a 18 horas que el mucílago se disuelva en agua. La fermentación natural del mucílago (y no del grano) sólo es necesaria para permitir el buen lavado del café. El término correcto, por tanto, se refiere a la fermentación del mucílago. Si se demora el secado, la fermentación del café ocurre, causando un defecto grave.

El proceso de fermentación convencional es uno de los procesos más críticos durante el beneficio húmedo, en lo que se refiere a la conservación de la calidad del café y por tanto, debe controlarse cuidadosamente el tiempo del proceso evitando la ocurrencia de sobrefermentación que origina aromas y sabores a vinagre, piña madura, cebolla, rancio y nauseabundo.

La eliminación de la fermentación es ampliamente deseable por razones de calidad, de disminución de espacio e infraestructura utilizada en el beneficiadero y también porque durante las reacciones bioquímicas de respiración y de difusión de sólidos del grano al agua, se pierde en promedio 1,5% de la materia seca del grano (Sección 5.4.).

En general, es muy deficiente el control de calidad del proceso de beneficio en las fincas y frecuentemente los caficultores finalizan el proceso de fermentación del mucílago antes o después del punto recomendado, el que a su vez depende de varios factores y no es fácil de precisar. De esta forma es muy común obtener cafés mal lavados, lo cual dificulta el buen secado o cafés fermentados. Las dos posibilidades originan graves defectos de calidad.

3.8. LAVADO DEL CAFÉ CON MUCÍLAGO FERMENTADO

Es práctica común la utilización los tanques de fermentación para simultáneamente lavar y clasificar el café (Figuras 24 y 27). Recientemente también se ha demostrado que es posible utilizar los mismos dispositivos para minimizar el consumo de agua (192) mediante el procedimiento de **cuatro enjuagues**. La técnica representada en la Figura 24, consiste en aplicar al café con el mucílago fermentado el agua necesaria para cubrir completamente los granos y remover vigorosamente la masa. El agua del primer enjuague se vacía y se reemplaza con agua limpia, repitiéndose el proceso durante tres veces más; en el primer enjuague se concentra el 66% de la materia orgánica del mucílago y en los dos primeros enjuagues se encuentra el 90%. Si se dispone de estas aguas adecuadamente y se despulpa y se maneja la pulpa sin agua, la contaminación potencial puede controlarse en aproximadamente



Zaranda plana

Tanque tina

Figura 24. Lavado del café por agitación manual en el tanque tina. La zaranda plana clasifica el café despulpado.

el 85%. De ésta forma se logran consumos de agua globales de 4,5L/kg cps. Si el tanque es pequeño, la remoción la puede hacer el caficultor con una pala.

Para practicar el lavado de cuatro enjuagues en beneficiaderos, (Figuras 24, 26, 27, 29 y 52), se debe utilizar una bomba de circulación de café para transportarlo de un tanque a otro. El lavado optimizado en el mismo tanque se ha venido utilizando comercialmente por varios años en Cenicafé, en pequeñas fincas cafeteras (Sección 8.1.) y en la Subestación de Cenicafé Maracay en el Quindío (Figuras 52 y 53).

La práctica del lavado utilizando **canales de correteo** (36, 95, 172, 182), (Figura 25) ha sido tradicional en nuestro país, principalmente para pequeños caficultores, pero también se ha utilizado por medianos y grandes. Por mucho tiempo se consideró que si el café no se lavaba mediante este método no era viable su comercialización. Además, si se usa éste, es posible separar café de buenas características, el



Figura 25. Lavado del café con mucilago fermentado en canales de correteo, mediante agitación manual.

cual es muy deseado por los compradores, para mezclarle pasillas (con valores aproximados del 5%) y aún así, obtener café de la máxima clasificación, tipo Federación.

El proceso de lavado se consigue con agitación vigorosa, utilizando la fuerza manual y palas especiales, del café dispuesto en canales de 0,3 ó 0,4m de ancho, con longitudes que varían entre 10m y 40m (preferencialmente rectos). Mediante la combinación de compuertas y considerables caudales de agua (del orden de 20L por kilogramo de café pergamino seco) que no es recirculada, se obtienen cafés de diferentes calidades en forma de gradiente de calidad a lo largo del canal. El de primera, más cercano a la entrada del canal. Los flotes y granos de mala calidad salen del canal transportados con el flujo del agua. Además de la desventaja del alto consumo de agua, el proceso es una tarea dispendiosa que utiliza gran cantidad de mano de obra y en éste pueden perderse apreciables volúmenes de café de buena calidad (hasta un 19%) que escapan con los granos separados. Cenicafé consideró desde el inicio, como un reto de investigación, conseguir igualmente café de muy buena calidad como en el canal de correteo, pero evitando las pérdidas y eliminando el uso excesivo de mano de obra y tiempo de lavado, además, disminuyendo al máximo el consumo del agua.

3.9. LAVADO Y TRANSPORTE DE CAFÉ CON BOMBA SUMERGIBLE ¹⁸

Las bombas sumergibles (Figuras 26 y 27), son muy utilizadas para el lavado y transporte del café con mucílago concentrado proveniente de su fermentación en los beneficiaderos convencionales de medianos y grandes productores.



Figura 26. Motobomba sumergible utilizada para el lavado y transporte del café.

¹⁸ Preparado por Sanz U., J. R. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.



Figura 27. Lavado del café durante su transporte con motobomba, utilizando cuatro enjuagues.

Estas, son en general **bombas centrífugas** que están conformadas por un conjunto de álabes rotatorios dentro de un alojamiento o carcasa, los cuales suministran energía centrífuga a un fluido o a una suspensión. El resultado es el transporte del fluido o la suspensión, de un lugar a otro, a través de una tubería cerrada.

El lavado en **canales semisumergidos** (36, 95) (Figura 28), se realiza conjuntamente con la clasificación del café con mucílago fermentado, en canales de 0,20m de ancho, sección rectangular, longitudes entre 2 y 3m, con ranuras en el fondo del canal separadas entre sí aproximadamente 0,5m. El café es transportado a través del canal por medio de una bomba sumergible. El café de buena calidad atraviesa las ranuras, debido a su mayor densidad. La capacidad aproximada del proceso es

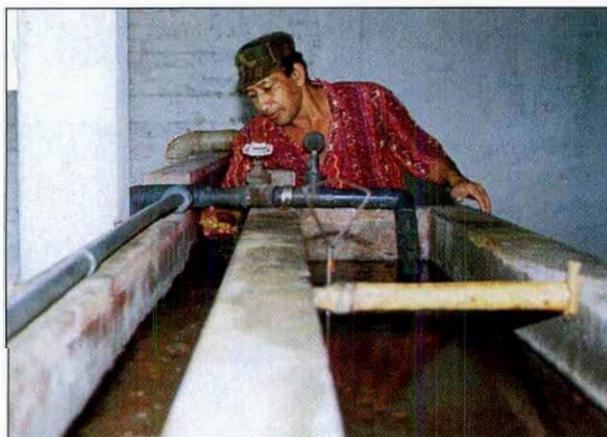


Figura 28. Canal semisumergido utilizado para el lavado y clasificación tradicional del café pergamino.

de 7.000kg de cps por hora y el consumo de agua, cuando no se hace recirculación, es de 6,4L/kg de cps. No se recomienda utilizar agua completamente recirculada ya que al tratarse de un sistema de lavado, el agua adquiere cada vez mayores concentraciones de mucílago y otras materiales indeseables, y no es posible lavar adecuadamente el café. La eficiencia del lavado sin recirculación del agua, es del orden del 90%.

El sistema de **transporte con bomba sumergida** se puede adaptar a un equipo DESLIM, para transportar el café lavado a los secadores. Aunque este dispositivo utiliza agua, la adición de la energía mecánica hace posible el transporte hasta lugares más elevados en los cuales se puede ubicar un separador agua-grano (5), (Figura 29), para retornar el líquido utilizado hasta la bomba nuevamente, lográndose así disminuir el consumo específico de agua.

En la Figura 29 puede observarse el esquema de un circuito típico de lavado y transporte del café a un secador con recirculación de agua. Si el café proviene del desmucilagador DESLIM, o sea ya lavado, el volumen de agua necesario para el transporte al secador es de tan solo la capacidad del tanque donde se ubica la bomba más el volumen de las tuberías, que en un beneficiadero grande no debe sobrepasar $0,3\text{m}^3$. El **consumo específico del agua de recirculación, o sea el agua utilizada por kilogramo de café pergamino seco en un día de operación normal, puede ser despreciable**. Si el café no está lavado es necesario adicionarle, en forma parcial, agua limpia en alguna sección del circuito. En este caso debe permitirse al sistema el desalojo continuo de un caudal equivalente de agua con mucílago.

El funcionamiento adecuado de un sistema de lavado y transporte de café pergamino, utilizando una motobomba y un circuito hidráulico con recirculación de agua, debe ser diseñado adecuadamente. La potencia de la bomba seleccionada debe ser suficiente para vencer las resistencias de la gravedad, de la fricción de los tramos de

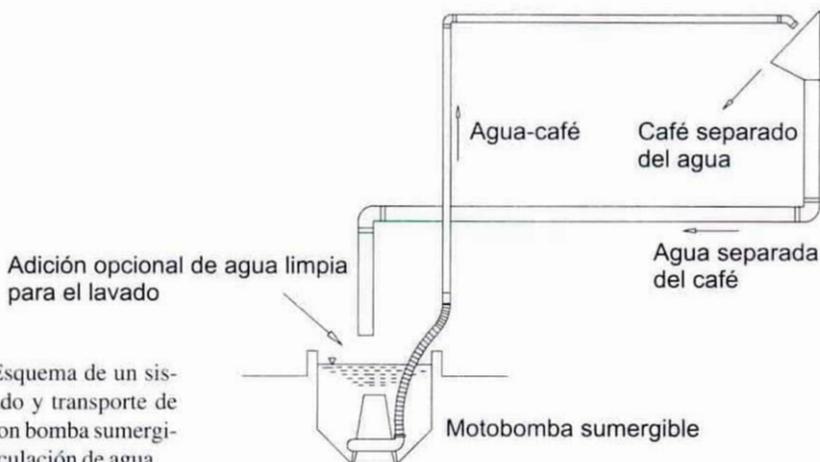


Figura 29. Esquema de un sistema de lavado y transporte de café lavado con bomba sumergible, con recirculación de agua.

tubería vertical y horizontal, y de los accesorios de conexión que se oponen al flujo de la mezcla agua y café.

Al transportar esta mezcla con una bomba sumergible, las pérdidas de presión se incrementan considerablemente en comparación con el manejo de agua solamente. En Cenicafé se realizó un estudio para determinar las pérdidas de presión cuando se variaba la concentración de café en el agua y el efecto del aumento de ésta sobre el daño mecánico en el producto (165, 166). Se encontró que para el transporte hidráulico de café por una tubería vertical de 76,2mm de diámetro (3") con velocidades de flujo de la mezcla entre 1,0 y 1,7m/s, las **pérdidas de presión** pueden predecirse con muy buena precisión utilizando la ecuación < 1 >.

$$(h_f)_v = 0,417738V^{0,1976} C^{0,6964} \quad < 1 >$$

En donde:

- $(h_f)_v$ = Pérdidas de presión para la mezcla, m c.a./100m.
- V = Velocidad media de la mezcla, m/s.
- C = Concentración de café, volumen aparente de café/volumen de agua.

Para el transporte hidráulico de la mezcla agua-café por tubería horizontal de 76,2mm (3") de diámetro con velocidades entre 1,5 y 2,5m/s, las pérdidas de presión pueden predecirse con buena precisión por la ecuación < 2 >

$$(h_f)_h = h_f - 0,1244 + 1,60497C \quad < 2 >$$

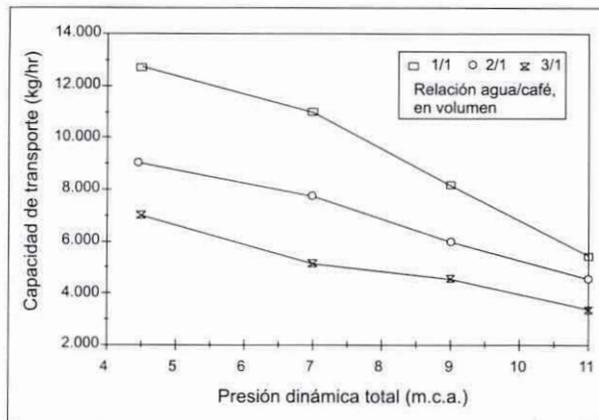
En donde:

- $(h_f)_h$ = Pérdidas de presión para la mezcla, m c.a./100m.
- h_f = Pérdidas de presión con agua sola, m c.a./100m.
- C = Concentración de café, volumen aparente de café/volumen de agua.

Se determinó, además, que las pérdidas de presión ocurridas en codos y acoples en T, en tubería PVC de 76,2 mm de diámetro expresadas en longitud equivalente de tubería recta, pueden considerarse como iguales a la longitud equivalente de estos mismos accesorios cuando se transporta agua solamente.

Adicionalmente se realizó una **curva característica** de la bomba sumergible utilizada en los ensayos, marca IHM, modelo HWH 10-21-3 de 0,746 kw (1 hp) (Figura 30). Para éste fin se utilizaron diferentes concentraciones en volumen (volumen de agua/volumen aparente de café).

Figura 30. Curvas características de la bomba sumergible marca IHM modelo HWH 10-21-3 de 1 hp, al transportar café lavado.



3.10. DESMUCILAGINADO MECÁNICO, LAVADO Y LIMPIEZA DEL CAFÉ. EQUIPO DESLIM¹⁹

El mucílago cubre al pergamino (Figura 31), con espesor que varía desde 0,4 mm (en la cara plana del grano) hasta 2,0 mm (en la parte convexa). Representa el 22%, en peso del café despulpado y el 13% del peso de la cereza²⁰. El mucílago contiene agua, sustancias pécticas, azúcares reductores y no reductores, celulosa y cenizas (Tabla 16).

Pulpa
Capa de mucílago
Almendra

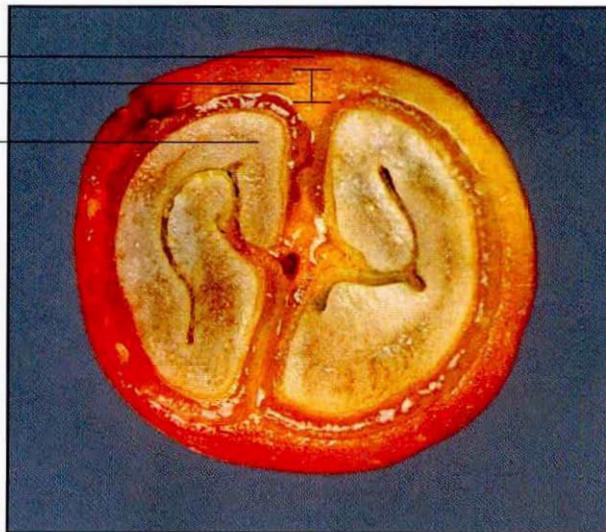


Figura 31. Corte transversal de una semilla de café despulpado ilustrando la distribución y el tamaño relativo del mucílago.

¹⁹ Preparado por Oliveros T., C. E. y Sanz U., J. R. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

²⁰ Valor promedio obtenido en 50 lotes de café cereza. Cada muestra (500g de cereza) se despulpó y se descartaron los flotes y los granos verdes y secos que no se despulparon. El mucílago se retiró por medio de enzimas (menos de 30 minutos), los granos posteriormente se lavaron y se dejaron escurrir en las condiciones del laboratorio (20°C y 75% de humedad relativa) durante 10 minutos.

Tabla 16. Composición química del mucílago del café. Tomado de Ríos (149)

Tratamiento	Azúcares reductores % b.h.	Total azúcares % b.h.	Grasa % b.s.	Fibra % b.s.	K %	Ca %	Mg %	Mn %	Fe %
Café seleccionado *	4,31	6,68	1,04	6,91	1,07	0,22	0,07	0,005	0,026
Café sin seleccionar **	4,28	7,40	1,10	6,58	1,27	0,23	0,08	0,006	0,033

* Solamente cerezas maduras y pintonas

** Café de recolección normal

3.10.1. Eliminación del mucílago

En los **café denominados suaves** el mucílago se retira antes del inicio del secado. En la mayoría de los países productores de esta calidad de café, el mucílago se elimina por medio de la fermentación natural y el lavado posterior. Cuando esta labor se realiza con buen control²¹ y el secado se ejecuta bajo condiciones adecuadas, se obtienen cafés con pergamino limpio y de alta calidad en taza.

Sin embargo, en muchos casos hay poco ó ningún control en la finca, especialmente cuando la producción es baja y el café despulpado de varios días se reúne en un mismo tanque. Estas condiciones normalmente dan origen a cafés de mala calidad con sabor a fermento, lo cual ocasiona importantes pérdidas económicas, debido a que los cafés son rechazados por los compradores.

El desmucilaginado mecánico permite obviar los problemas antes mencionados, dependiendo de la tecnología utilizada para la eliminación y el manejo del mucílago.

El café pergamino desmucilaginado se **lava directamente en el desmucilagador** tipo DESLIM (Sección 3.10.5.), equipo desmucilagador-lavador-limpiador en el que se incluye la sección de lavado en la parte superior, con flujos de grano y de agua en contracorriente. Pueden presentarse una o la combinación de las siguientes condiciones en que el lavado en el propio desmucilagador no sea suficiente para lavar el café a satisfacción, a saber: materia prima de mala calidad y ausencia de zaranda clasificadora en el módulo BECOLSUB (Sección 3.14.); descalibración del equipo, deseo del caficultor de obtener una presentación excelente del grano. Una de las mejores opciones para complementar el lavado en estas circunstancias es la utilización del hidrociclón (Sección 3.11.), o la motobomba durante el lavado y el

²¹ Se considera que hay **buen control** en la etapa de fermentación cuando el lavado se inicia una vez ocurrida la solubilización del mucílago. Esto se detecta tomando una muestra de café, lavándola con agua limpia y frotando los granos entre las manos: cuando el café está a **punto de lavado** los granos exhiben un aspecto rugoso, similar al cascajo. También hay control en la fermentación del mucílago cuando no se mezclan en un mismo tanque cafés de diferente día de cosecha.

transporte y lavado del café entre el tanque y el silo secador (Sección 3.9.), o finalmente un enjuague manual.

3.10.2. Principios del desmucilaginado mecánico del café

Cuando se agita una masa de café despulpado se logra desprender un porcentaje importante de mucílago en pocos segundos (Figura 32). Los fluidos, mucílago más el agua adicionada y las partículas provenientes de la pulpa presente en el café despulpado, restos de granos (inmaduros, atacados por la broca, etc.) y otras impurezas, dan origen a suspensiones altamente viscosas las cuales según Oliveros (113) son de naturaleza altamente pseudoplástica, es decir, su viscosidad se reduce notablemente cuando la tasa de deformación a la que se someten, se incrementa.

Cuando la velocidad de rotación aumenta la **tasa de deformación** a la cual es sometida la suspensión mucílago-café se incrementa, los esfuerzos cortantes que actúan en la vecindad de los granos aumentan y la frecuencia de las colisiones entre granos se incrementan (mayor intercambio de energía), por lo cual la tasa de remoción de mucílago aumenta (Figura 33).

Sin embargo, cuando la velocidad de rotación es muy alta (más de 1.500 rpm, según evaluación con el rotor CENICAFÉ III) los granos tienden a alinearse con la

Sección de lavado

Alto volumen
de mucílago desprendido

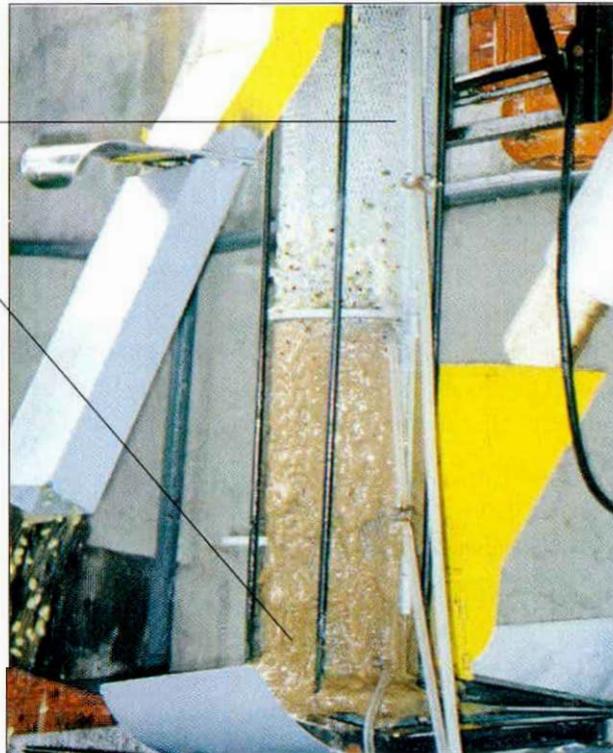


Figura 32. Alto volumen de mucílago desprendido en los primeros instantes del proceso de desmucilaginado mecánico (sección inferior del equipo). Se diferencian las etapas de desmucilaginado (parte inferior) y de lavado con flujos de agua y de grano en contracorriente (parte superior).

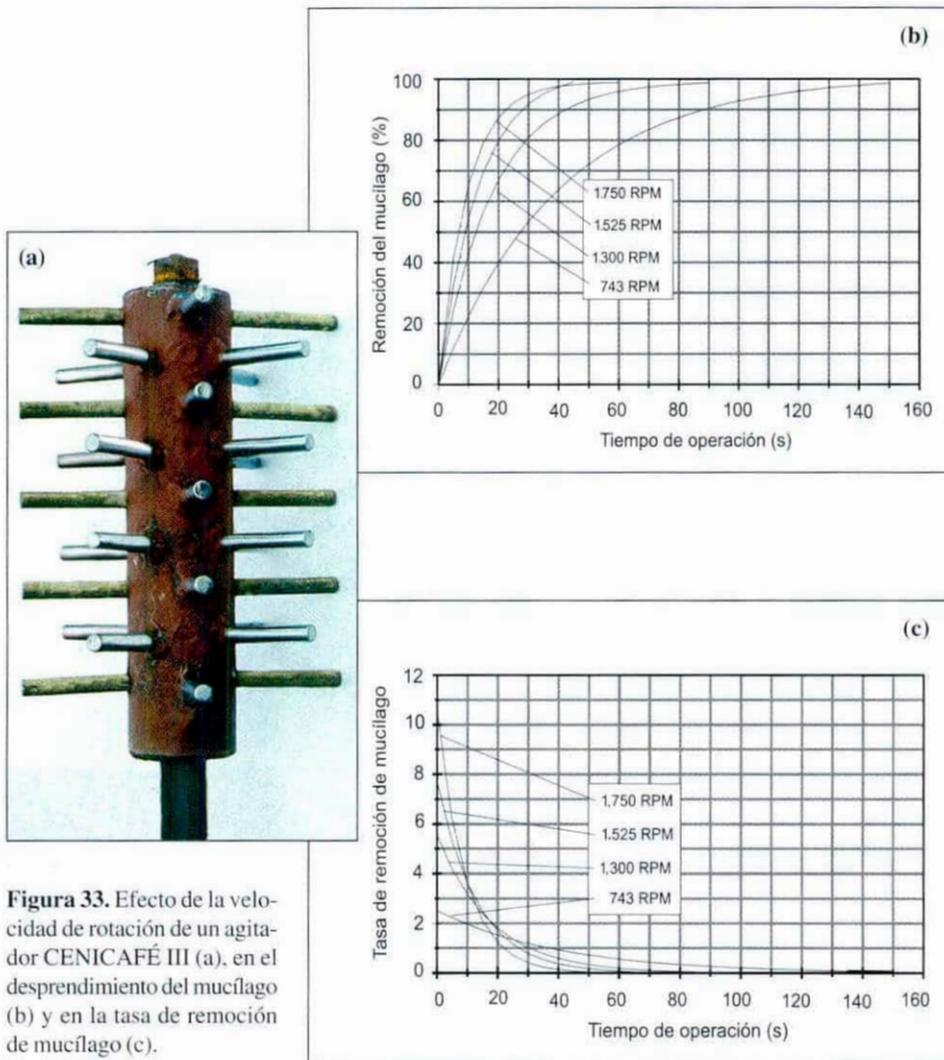


Figura 33. Efecto de la velocidad de rotación de un agitador CENICAFÉ III (a), en el desprendimiento del mucilago (b) y en la tasa de remoción de mucilago (c).

dirección principal del flujo (tangencial) lo cual reduce la frecuencia de las colisiones entre los granos y ocasiona una “aparente” estabilidad en la viscosidad de la suspensión. En estas condiciones la tasa de desmucilaginado se reduce.

En condiciones de alta velocidad de rotación también se puede inducir inestabilidad en el patrón de flujo (aparición de vórtices) que podrían incidir en la tasa de desmucilaginado.

El proceso de desmucilaginado se ve afectado principalmente por : el diámetro del rotor, la velocidad de rotación, el tipo de rotor y la **viscosidad de la suspensión** (Figura 34), (la cual a su vez depende de la velocidad de rotación, de la cantidad de agua utilizada por unidad de producto y de la calidad del café en baba que entra al desmucilaginado).

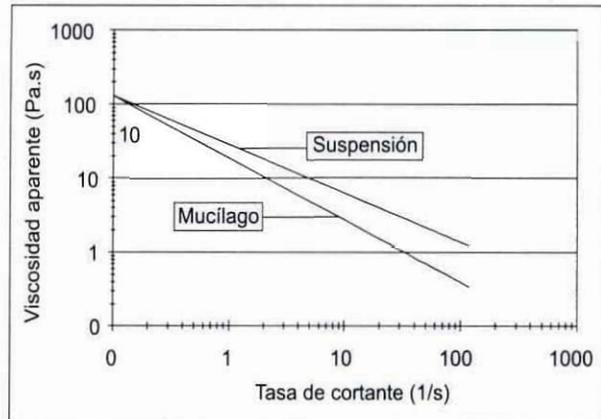


Figura 34. Comportamiento reológico del mucílago del café y de suspensiones mucílago-café en baba.

3.10.3. Desarrollo de equipos para el desmucilaginado mecánico del café en Cenicafé.

Las actividades de investigación sobre el desmucilaginado mecánico en Cenicafé se iniciaron en 1984 (14, 150). Se partió de las experiencias obtenidas en Centroamérica con la tecnología DEMUCIL que combinaba la acción mecánica, suministrada por un agitador y la actividad enzimática provista por una enzima pectolítica. En ensayos preliminares realizados en Cenicafé con la tecnología DEMUCIL se observó que el desprendimiento del mucílago se debía principalmente a la agitación de la masa. Con base en estos resultados se diseñó el primer prototipo denominado DESMULACLA (**DESM**ucilaginator, **LA**vador, **CLA**sificador) (Figura 35).

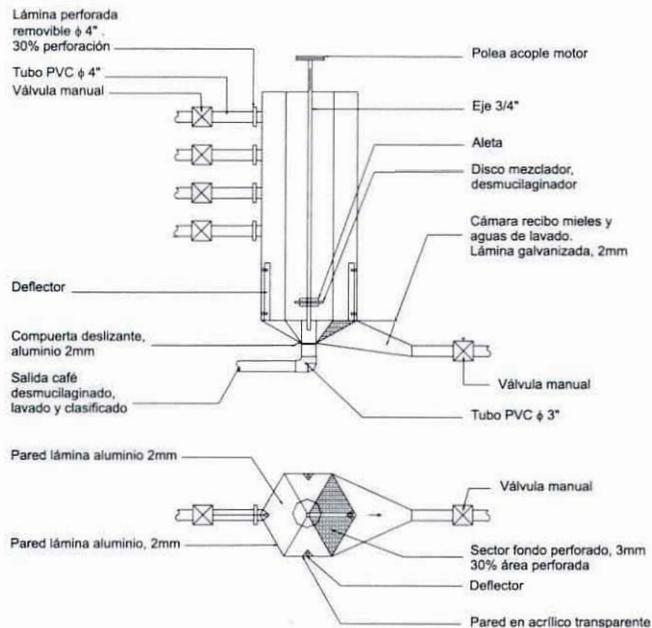


Figura 35. Diagrama del primer prototipo desmucilaginator, lavador, clasificador de café, DESMULACLA, diseñado (150), construido y evaluado en Cenicafé en 1984 (14).

El agitador utilizado en el DESMULACLA constaba de un disco de acrílico de 180 mm de diámetro y 10mm de espesor con cuatro perforaciones de 50mm de diámetro cada una. En cada cara del disco se encontraban colocadas en cruz, cuatro paletas de aluminio de 50mm de longitud. La altura total del agitador era 40mm; éste se encontraba en el centro de una cámara de sección hexagonal de 250mm de lado. La relación diámetro de rotor/diámetro del tanque (considerando un círculo inscrito de 500mm de diámetro) era 0,36. La altura total de la cámara era 1.320mm.

Los resultados obtenidos en la evaluación del DESMULACLA, presentados en la Tabla 17, mostraron un efecto importante de la velocidad de agitación en el rendimiento al operar el equipo por tandas. Sin embargo, a medida que se incrementó la velocidad de rotación se observó un incremento notorio en el daño mecánico. El mejor desempeño obtenido con el DESMULACLA fue muy inferior al obtenido en Cenicafé con un desmucilagador Pinhalense²² (112).

El bajo desempeño del DESMULACLA fue atribuido al patrón de flujo generado por el agitador. Los granos solamente se someten a fuerte agitación cuando están próximos al rotor; cuando éstos se alejan del rotor se aumenta la distancia entre ellos y se reduce el número de colisiones (intercambios de momentum). En estas regiones la tasa de remoción de mucílago es menor.

Con el fin de obtener un patrón de flujo más uniforme en toda la cámara de desmucilagado se construyó un prototipo denominado CENICAFÉ-B-I (Figura 36).

Tabla 17. Parámetros obtenidos en la evaluación del desempeño del desmucilagador prototipo DESMULACLA.

Velocidad de rotación RPM	Capacidad kg café en baba / h*	Potencia W/(kg café en baba / h)**	Consumo de agua L/kg de cps
400	20	38	8,64
500	26	30	6,75
60	32	24	5,78

* Calculado con base en el tiempo para remover el 95% del mucílago. Equipo operando por tandas.

** Fue estimado considerando solamente la potencia instalada (0,74 kw) y la capacidad del equipo. No se consideran las pérdidas en la transmisión de la potencia, en la conversión de energía eléctrica a energía mecánica, ni las pérdidas en la agitación de la masa (debidas a la disipación viscosa).

²² El equipo consta de un rotor, similar al utilizado en extrusores de alimentos, el cual gira en el interior de una carcaza construida en lámina con perforaciones oblongas. El desmucilagado ocurre debido a la acción de esfuerzos cortantes aplicados en el espacio libre entre el rotor y la carcaza. Se utiliza agua a presión para mantener limpia la cara interior de la carcaza y para retirar de la máquina el café desmucilagado. El equipo utilizado tiene capacidad para 900kg/h de café despulpado y es accionado por un motor de 7,46kW (10 hp).



Figura 36. Desmucilagador por agitación con rotor tipo CENICAFÉ-B-I.

El equipo CENICAFÉ-B-I constaba de un rotor similar al utilizado en el equipo ELMU, fabricado en Centroamérica. El rotor tipo múltiple “paddle” de un eje de 2,54cm de diámetro (1”), construido en acero 1030, de 40cm de longitud, con barras de bronce latón de 15,0cm de longitud y 0,95cm de diámetro colocadas perpendicularmente al eje y separadas 5,0cm entre centros. El rotor estaba colocado en el centro de una cámara de PVC de 15,4cm de diámetro interior, con dos hileras de barras de bronce latón de 5,9cm de longitud y 0,95cm de diámetro, que actuaban como promotoras de esfuerzos y reguladores del flujo. En medio de éstas giraban las barras del agitador. El rotor era accionado por un motor de 0,74kw (1,0 hp). El modelo CENICAFÉ-B-I se operaba por tandas de 4,5kg de café en baba.

En ensayos preliminares realizados con el prototipo CENICAFÉ-B-I se observó una remoción del 95% del mucílago en 6 minutos. El prototipo se evaluó y su mejor desempeño se comparó con el obtenido con el equipo Pinhalense. Los resultados correspondientes al promedio de 10 ensayos se consignan en la Tabla 18.

Los valores de la Tabla 18 muestran progresos notorios en la reducción del daño mecánico y en el consumo de agua; sin embargo, no se logró reducir la potencia

Tabla 18. Desempeño comparativo de diferentes desmucilaginosos evaluados en Cenicafé.

Característica	DESMULACLA	CENICAFÉ-B-1	Pinhalense
Potencia W/(kg de café en baba/h)	24,0	16,4	8,3
Consumo de agua (L/kg de café seco)	5,68	2,5	7,5
Daño mecánico (%)*	1,5	3,5	

* Valor alto (>2,0%) no reportado.

específica con relación al valor obtenido con el equipo Pinhalense (considerado alto para las condiciones colombianas).

Con base en los resultados obtenidos con el prototipo CENICAFÉ-B-I se construyó un equipo de mayor capacidad (para 40kg de café en baba), denominado CENICAFÉ-B-II (Figura 37), el cual se operó por tandas. El rotor del equipo, de 37,0cm de diámetro, constaba de un eje de acero 1030 de 3,75cm de diámetro y 50,0cm de longitud con hileras de barras de bronce-latón (72° entre hileras) de 0,95cm de diámetro y 15,6cm de longitud, espaciadas 24,5mm entre centros. Concéntricamente con el eje del rotor se colocó un tubo de PVC de 15,4cm de diámetro.

La cámara de desmucilaginado constaba de un cilindro de acero de 38,0cm de diámetro en cuyo interior se colocaron hileras de barras de bronce de dimensiones, material y separación similares a las del rotor. El desmucilaginado se producía en la **corona circular** definida por la pared interior de la carcaza y la superficie exterior del cilindro de PVC colocado en el rotor.

El equipo CENICAFÉ-B-II fue posteriormente modificado por Sanz en 1992 obteniendo un **desmucilaginator de flujo descendente con lavado ascendente**, que operaba en **forma continua**, denominado CENICAFÉ-C-I. Básicamente la modi-

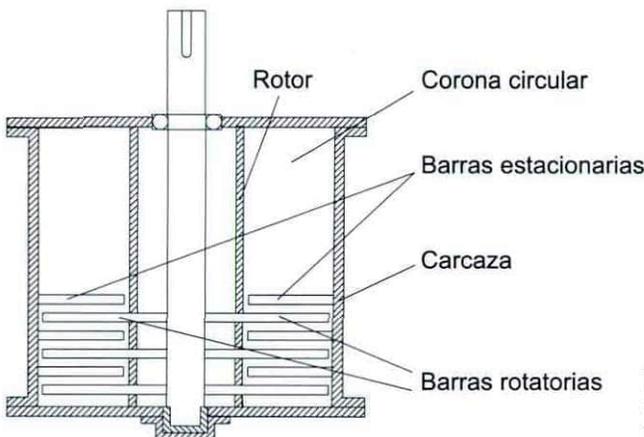


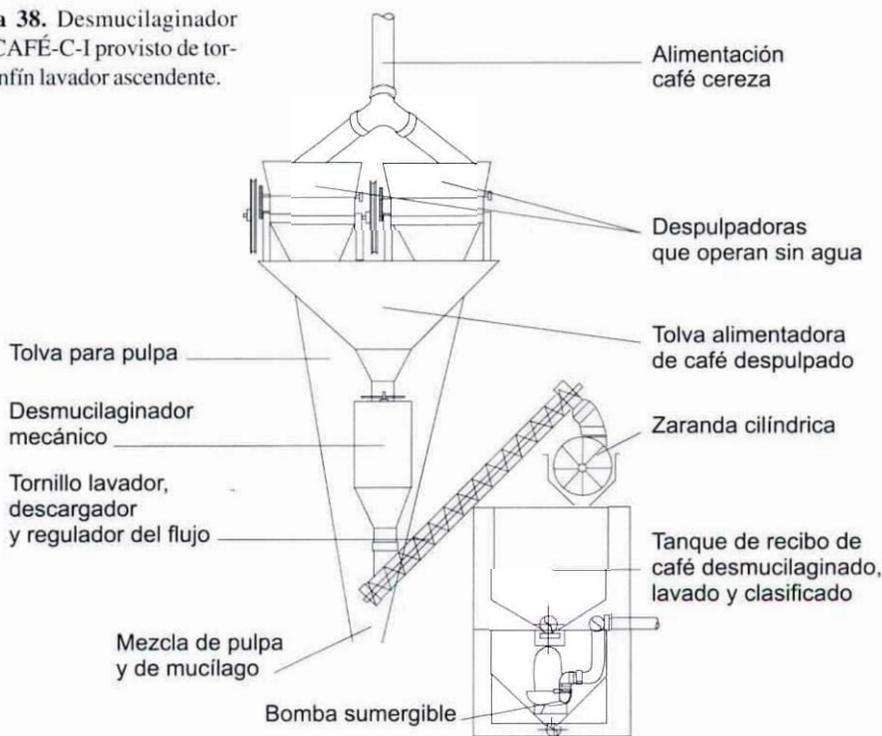
Figura 37. Esquema del desmucilaginator de barras, CENICAFÉ-B-II.

ficación consistió en la adición de un tornillo sinfín²³ colocado en la tolva de descarga del desmucilagador (Figura 38), el cual permitió controlar el tiempo de residencia del café en el desmucilagador y retirar el mucílago desprendido (lavador). La mejor operación del sistema desmucilagador-lavador se obtuvo con una inclinación de 35° del tornillo sinfín.

En la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos en la evaluación del prototipo CENICAFÉ-C-I. Los valores indican un avance importante en el desmucilagado mecánico en los aspectos de mayor importancia para las condiciones colombianas: consumo de potencia/kg de café procesado, consumo de agua/kg de café procesado y daño mecánico. Sin embargo, dos factores motivaron la continuación de los estudios en laboratorio: la eficacia de desmucilagado (92,8%) inferior a la deseada (>95,0%) y el consumo de potencia superior al reportado (75) de 1,80 W/kg de café baba/hora.

El desmucilagador CENICAFÉ-C-II, (164) se diseñó para superar los factores limitantes mencionados y se construyó con un rotor de menor diámetro que el de su predecesor (CENICAFÉ-C-I), 0,20 m de diámetro interno de la carcaza, pero de mayor longitud, 1,20m, (Figura 39). Para aprovechar la fuerza centrífuga generada

Figura 38. Desmucilagador CENICAFÉ-C-I provisto de tornillo sinfín lavador ascendente.



²³ Especificaciones del tornillo sinfín: diámetro externo 156mm, paso 150mm, diámetro del eje 31,75mm, longitud 2m, diámetro de la carcaza 158mm.

Tabla 19. Desempeño comparativo de diferentes desmucilaginosos mecánicos desarrollados en Cenicafé.

Característica	CENICAFÉ-B-I	CENICAFÉ-C-I
Potencia (W/kg café baba/h)	16,50	2,90
Consumo de agua (L/kg de café seco)	2,50	1,00*
Daño mecánico, (%)	1,50	1,19

* Lavado incompleto. No se incluye el agua utilizada para terminar el lavado.

por el rotor en la expulsión de mieles se diseñó una carcaza de 0,20m de altura con perforaciones en forma de rombos la cual se colocó en la parte inferior.

Adicionalmente, se evaluó (164) un equipo utilizado en Colombia como “repasador” de café²⁴, marca COLMECANO. La carcaza de este equipo tenía perforaciones de 4,76mm (3/16") de diámetro para permitir la evacuación de las mieles producidas por la agitación. El eje del agitador estaba inclinado 30° con relación a la horizontal y el rotor (Figura 40) estaba constituido por una serie de piñones de fundición de aluminio, típicamente utilizados en las repasadoras tipo COLMECANO de la industria Antioqueña. En la descarga del desmucilaginoso se colocó horizontalmente un dispositivo con el cual se lograba dar el tiempo de residencia en el desmucilaginoso, 60 segundos para obtener mas del 95% de remoción de mucílago y lavar el café (Figura 41). En la Tabla 20 se presentan los mejores resultados obtenidos en la evaluación de los desmucilaginosos CENICAFÉ-C-I, CENICAFÉ-C-II y COLMECANO.

En términos generales, el mejor desempeño se obtuvo con el desmucilaginoso COLMECANO y con base en estos resultados se construyó el módulo DESMULAC²⁵ (Figura 41), el cual constaba básicamente de dos despulpadoras convencionales de cilindro horizontal con capacidad para 1.200kg de café cereza/h cada una, un conjunto desmucilaginoso-lavador con capacidad para procesar el café en baba procedente de las despulpadoras, un canal semisumergido para completar el lavado y limpiar el café y un tornillo sinfín de 25,4mm de diámetro (4") y 25,4mm de paso, para mezclar el mucílago y la pulpa y posteriormente transportar estos subproductos del beneficio hasta la fosa para su transformación en lombricomposteo.

²⁴ Con la repasadora se busca despulpar granos que por su tamaño, inferior al mínimo requerido para ser despulpado, o por tener la pulpa adherida al pergamino (granos secos, granos atacados por mancha de hierro, etc.) no son despulpados y pasan a formar parte de los cafés de más baja calidad (denominados pasillas en Colombia).

²⁵ Este módulo fue construido en 1992-93 específicamente para evaluarlo y atender el pedido de la cooperativa de caficultores de anserma, de construir una Central de Beneficio Ecológica con la mejor tecnología de Cenicafé.

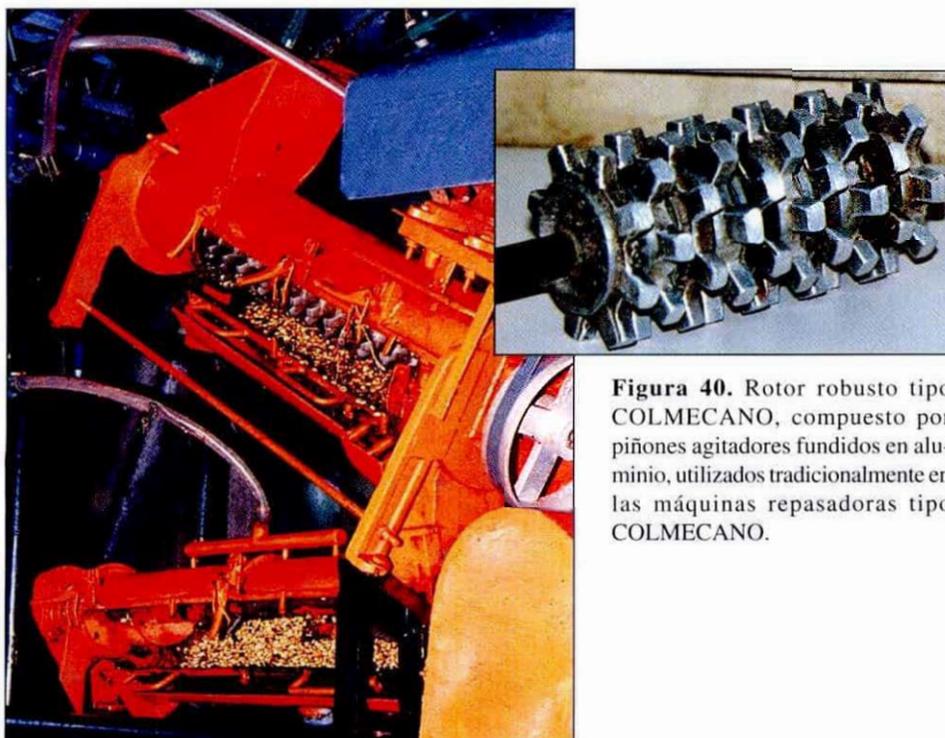


Figura 39. Desmucilagador CENICAFÉ-C-II.

Figura 40. Rotor robusto tipo COLMECANO, compuesto por piñones agitadores fundidos en aluminio, utilizados tradicionalmente en las máquinas repasadoras tipo COLMECANO.

3.10.4. La tecnología DESLIM

Los resultados obtenidos por Ramírez (144) en la evaluación del módulo DESMULAC mostraron que al mezclar el mucílago y la pulpa se podía controlar más del 85% de la contaminación generada en el proceso. Esto se logró gracias a que más del 50% del mucílago se retuvo en la pulpa; solamente se mezclaban las mieles más concentradas provenientes del desmucilagador y del lavador, con la pulpa.

La tecnología DESMULAC se utilizó en el proyecto de la Central de Beneficio Ecológico de Anserma (CBEA) (Sección 3.19.) donde se construyeron dos módulos, cada uno con capacidad para procesar 2.400kg de café cereza/h, similares al de

Tabla 20. Desempeño comparativo de desmucilagadores mecánicos.

Característica	CENICAFÉ-C-I	CENICAFÉ-C-II	COLMECANO
Potencia (W/Kg café baba/h)	2,90	2,51	2,08
Consumo de agua (L/kg de café seco)	1,00	---	2,75
Daño mecánico, (%)	1,19	2,70	1,04

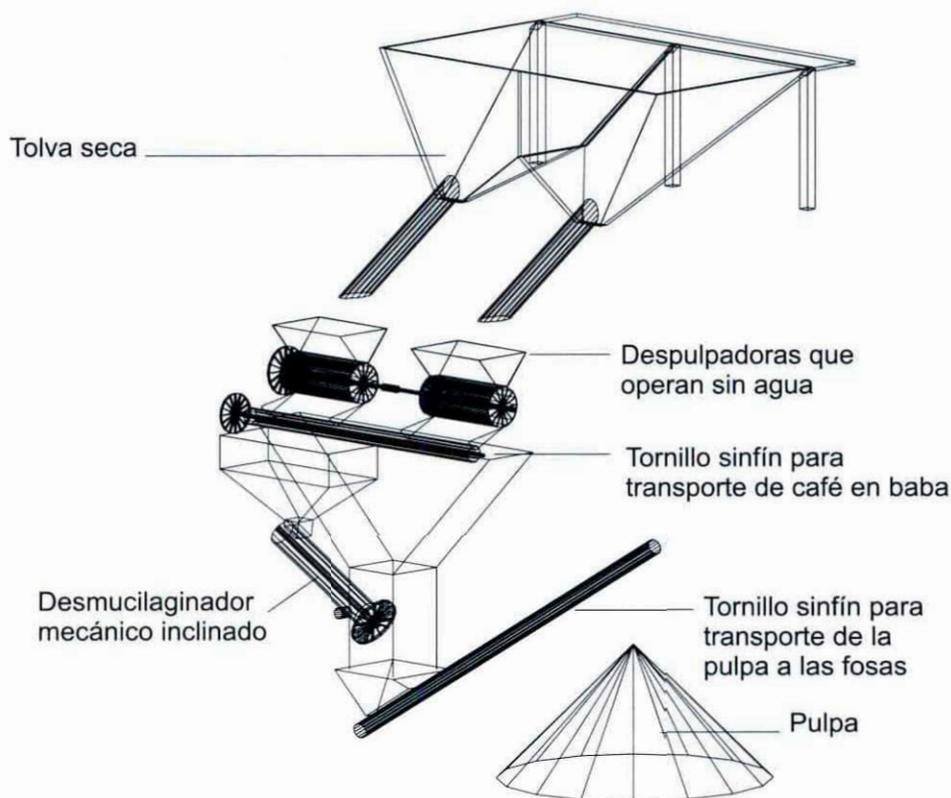


Figura 41. Aspecto general del módulo DESMULAC desarrollado en Cenicafé.

Cenicafé. En las primeras evaluaciones en la CBEA se observó que los mejores resultados, en términos ecológicos, se podrían obtener si se pudiera mezclar con la pulpa todo el mucílago desprendido y las partículas resultantes del desmucilagado; sin embargo, con la tecnología DESMULAC esto no era posible ya que una parte importante de estos materiales estaban altamente diluidos (en la salida del lavador y en el agua del canal semisumergido) y al ser incorporados a los otros efluentes se disminuía la retención en la pulpa (a menos del 30%) y el manejo de la contaminación (a menos del 80%).

El desmucilagador mecánico para café desarrollado por Fukunaga (75), (Figura 42), constaba de dos cámaras verticales de 15cm de diámetro, comunicadas entre sí, en el centro de cada una de las cuales se colocó un agitador construido en barras de acero de 6,35mm de diámetro. Con el fin de incrementar la agitación y producir flujo ascendente de café en cada una de las cámaras, se soldaron varillas de acero de 9,5mm de diámetro a la superficie externa de los agitadores. La velocidad de rotación de los agitadores en la primera cámara fue 860 rpm y en la segunda 1.000 rpm. De acuerdo con el inventor, el café procesado en la máquina necesitaba agua

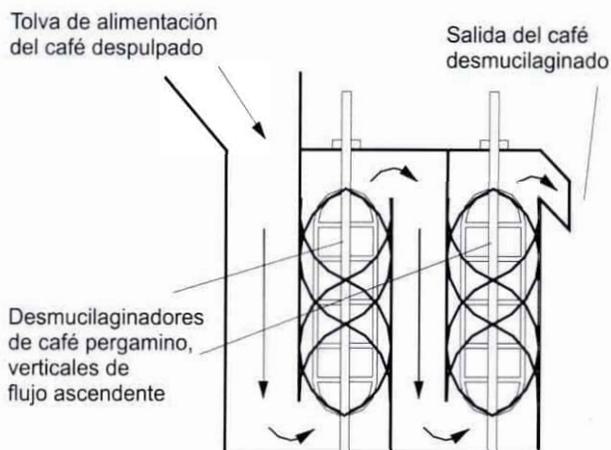


Figura 42. Desmucilagador de café en baba, vertical, de flujo ascendente desarrollado por Fukunaga, 1957 (75).

adicional para el lavado y el daño mecánico causado a los granos era bajo. El consumo específico de agua, sin incluir el lavado posterior, y la potencia específica instalada fueron 0,42L/cps y 2,44W/kg de cps procesado, respectivamente.

La tecnología DESLIM (**DES** mucilagador, **L**avador, **LIM**piador) se desarrolló en Cenicafé principalmente para superar las limitaciones observadas en el equipo DESMULAC de la Central de Beneficio Ecológico de Anserma. Se incorporó el concepto del lavado ascendente empleado por Fukunaga (75) y adoptado por Sanz (164) en el CENICAFÉ-C-I, al desmucilagador COLMECANO dando origen a un desmucilagador de flujo vertical ascendente de granos. Para el efecto se colocó un tornillo sinfín corto en la parte inferior, se modificó la carcasa (para incrementar la expulsión de mieles e impurezas), se varió el diámetro de los agitadores (se pasó de una relación diámetro rotor/diámetro carcasa de 0,659 a 0,614) y se modificó el volumen y la localización de la aplicación del agua.

Con el equipo DESLIM se redujo el consumo de agua de 3,5 a menos de 1,0L/kg de cps y se obtuvieron mieles altamente concentradas, aptas para ser mezcladas con la pulpa. Adicionalmente se simplificó notoriamente la mejor tecnología de beneficio que se tenía (DESMULAC); se eliminaron el lavador, el canal semisumergido, el sistema de recirculación de aguas y un filtro de materiales pequeños, que demandaban motores y una bomba para su operación. Con la tecnología DESLIM y el rediseño del módulo DESMULAC se dio origen a la tecnología BECOLSUB (**BE**neficio **EC**ológico del Café y de los **SUB**productos que se ilustra con detalle en la Sección 3.14.).

En estudios realizados por Oliveros (115) se determinaron dos parámetros importantes para el escalamiento de la tecnología DESLIM: la **tasa promedia cortante aplicada** por el rotor y el requerimiento de potencia. En la selección de los rotors de los desmucilagadores se utiliza el concepto de Tasa Cortante Promedia Aplicada (TCPA) como parámetro para evaluar y comparar equipos en aplicaciones de

agitación (como el desmucilaginado del café). La TCPA para el agitador del equipo DESLIM (construido con agitador tipo COLMECANO (Figura 40) de 13,5cm de diámetro externo, diámetro interno de 9,0cm y 8 alabes de sección trapezoidal de 1,3 cm de espesor) se obtuvo en Cenicafé. En la Figura 43 se puede observar el efecto de la velocidad de rotación en la TCPA en el rango de 500 a 1.300 rpm para un rotor construido con agitadores tipo COLMECANO.

La potencia requerida para accionar un rotor de un desmucilaginator depende de: la longitud (ó número de agitadores) y el diámetro, la velocidad de rotación, la viscosidad de la suspensión café - mucílago y el tipo de rotor. Adicionalmente en el caso de los equipos DESLIM la potencia es afectada sensiblemente por la longitud del espacio anular configurado entre la carcaza o camisa perforada y el diámetro externo del agitador. Para disminuir el efecto del tamaño de ánulo en la potencia, sin sacrificar la eficiencia en la remoción del mucílago, la relación entre el diámetro del rotor y el diámetro de la carcaza se estableció en 0,61.

En la Figura 44 se presenta la **curva de potencia** para el rotor del desmucilaginator DESLIM 3000; el rotor consta de 25 agitadores tipo COLMECANO de 13,5cm. de diámetro externo y 9,0cm de diámetro interno; la carcaza tiene 22,0cm de diámetro y el espacio libre entre la carcaza y el diámetro exterior del rotor (ánulo) es de 4,25cm.

En general, se observa una relación no lineal entre el consumo de potencia y la velocidad de rotación (rpm); a velocidades de rotación inferiores a 1.100 rpm, la potencia para mantener el flujo tangencial (Pt) es notoriamente superior a la potencia para impulsar el café a través del ánulo (Pv). A velocidades altas de rotación (>1.100 rpm) Pv es superior a Pt. La potencia para accionar un equipo DESLIM 3000 a una velocidad específica se puede estimar adicionándole al valor obtenido de la Figura 44, las pérdidas debidas a la disipación viscosa (disipación térmica, 13%) y las pérdidas en la transmisión de potencia (10%).

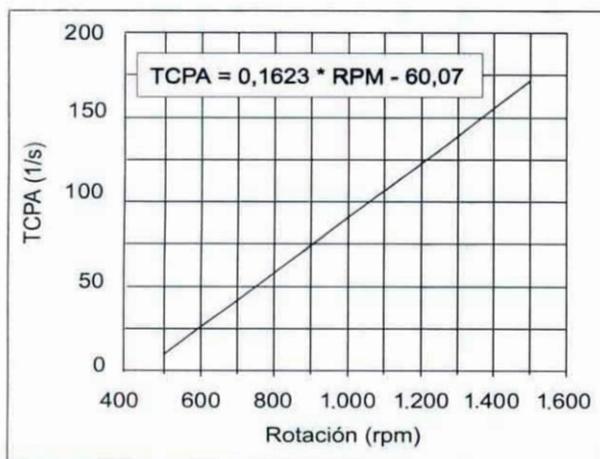
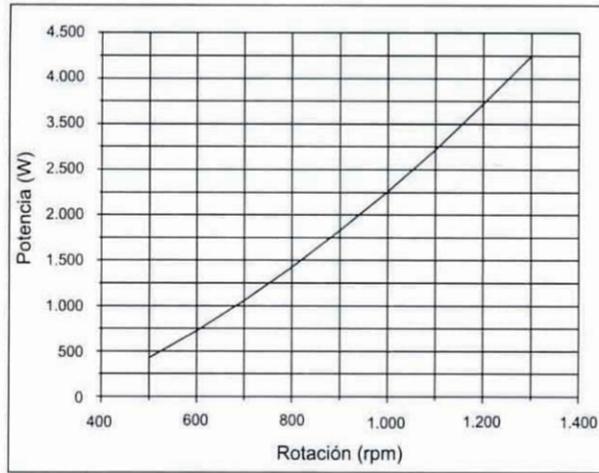


Figura 43. Tasa Cortante Promedio Aplicada (TCPA), por un rotor COLMECANO (Figura 40), con agitadores de 13,5cm de diámetro externo y 9,0cm de diámetro interno.

Figura 44. Efecto de la velocidad de rotación en el consumo de potencia para un equipo DESLIM 3000, operado con alimentación de 1.500kg de café despulpado/h.



La camisa, el tamaño y la forma de las aberturas de la carcasa, afectan notoriamente el funcionamiento de los equipos DESLIM. A través de las perforaciones se expulsa el mucílago y gran parte de otros materiales como restos de pulpa, fracciones de granos, etc., debido al efecto de la fuerza centrífuga. Como el patrón de flujo en un desmucilagador es principalmente tangencial²⁶, las partículas, incluidos los granos, se alinean en esta dirección por lo cual y con fines de limpieza del café, resulta conveniente colocar las aberturas en la dirección tangencial. El tamaño de las aberturas debe permitir solamente la salida de las impurezas, evitando que queden granos pequeños incrustados en ellas; ésto se logra con perforaciones oblongas de longitud mayor a 19mm. y de ancho en el rango de 3 a 3,5mm.

3.10.5. Componentes de los equipos DESLIM

Después de las numerosas evaluaciones en laboratorio y en beneficiaderos comerciales efectuadas por Cenicafé, los equipos DESLIM han sido modificados y optimizados. Las dimensiones principales de los diferentes equipos DESLIM se presentan en la Tabla 23. Sus partes constitutivas esenciales son las siguientes:

3.10.5.1. Carcaza

Es la parte fija de la máquina que por el tamaño, la forma y disposición de las perforaciones (ovaladas de 3,0 a 3,5 x 19 a 25mm, horizontales), separa el mucílago desprendido y las impurezas (pulpa y pergamino, principalmente) de los granos de café (Figura 45).

²⁶ En un equipo DESLIM operando a 900 rpm, la máxima velocidad tangencial de una partícula localizada en el borde del alabe, es $6,36\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ mientras que la velocidad axial, generada por el tornillo sinfín, es $0,0133\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. La velocidad radial en dispositivos de este tipo es muy inferior a la tangencial y a la axial.

La **carcaza** de los desmucilagadores mecánicos DESLIM es de longitud variable de acuerdo con la capacidad. Para resistir los esfuerzos que se generan dentro de los desmucilagadores, el cilindro de lámina troquelada debe estar reforzado. Debe tener en la parte frontal, una puerta de acceso con un sistema de cierre suficientemente fuerte para evitar que se abra durante el trabajo.

En los extremos, unidas por medio del sistema de bridas, se deben instalar dos tapas donde se ubican los rodamientos que soportan el rotor del equipo.

En la parte intermedia y en la parte superior se deben tener **entradas para adicionar el agua** de desmucilaginado y de lavado, respectivamente, dentro de la máquina. Para conseguir un desempeño óptimo respecto al consumo de agua y calidad de desmucilaginado, los valores en los que deben estar calibrados estos caudales están consignados en la Tabla 21.

3.10.5.2. Rotor

La **parte rotatoria** (Figuras 40 y 45), es el dispositivo mecánico que por la velocidad de giro y forma especial se encarga de causar los esfuerzos cortantes a la masa de café, necesarios para el desprendimiento del mucílago que recubre los granos. Está formado por tres tipos de elementos ensamblados en un eje: el alimentador y dosificador, los agitadores y los limpiadores; el eje es de sección circular en los extremos y de sección cuadrada en la parte intermedia.

Para evitar las obstrucciones de la malla perforada de la carcaza se dispone de **limpiadores**, que consisten en cilindros unidos rígidamente a una varilla.

La potencia se transmite por medio de una polea de forma que el rotor gire a una velocidad de 870 rpm. Se dispone de una tolva de alimentación para proporcionar continuamente el café despulpado al desmucilagador mecánico. Mediante un ducto de descarga se conduce el café desmucilaginado hasta el secador u otro dispositivo de limpieza complementario como un hidrociclón u otro sistema de lavado. Esta etapa es necesaria si la materia prima es de muy mala calidad.

Tabla 21. Características principales de los tres modelos DESLIM para desmucilagar mecánicamente el café.

Características	Capacidad. - kg cc/h				
	100	300	600	1000	3000
Longitud del Rotor, m	0,40	0,50	0,53	0,70	1,00
Potencia, kw	0,37	0,59	0,89	1,34	4,92
	(0,50)	(0,80)	(1,2 hp)	(1,8 hp)	(6,6 hp)
Agua de desmucilaginado, L/min	-	-	1,00	1,75	3,75
Agua Lavado, L/min	0,40	0,80	1,00	1,75	3,75

cc = café cereza.

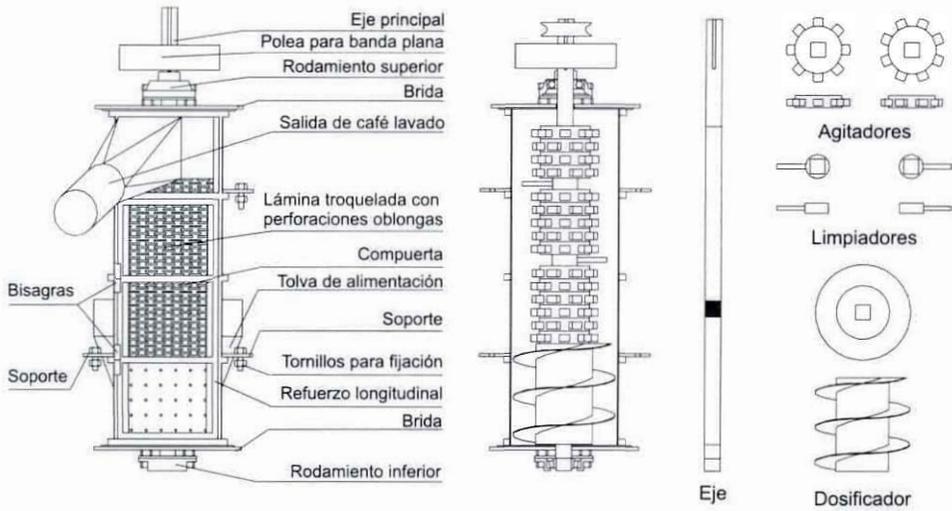


Figura 45. Esquema general, principales componentes y elementos de los equipos DESLIM para desmucilaginar café.

El mucílago y materiales que salen por las perforaciones de la carcaza se mezclan con la pulpa en el equipo BECOLSUB.

3.10.6. Características de los desmucilaginosos de flujo ascendente, DESLIM

El 95% de las fincas cafeteras colombianas tienen cultivos de café de menos de 3ha. En cada hectárea se producen, en promedio 925kg, (74@) de cps por año. De las 866.000 fincas registradas en la Encuesta Cafetera de 1.997, un poco más de 10.000 predios tiene extensión superior a 10ha y menos de 100 fincas tienen mas de 50ha sembradas en café. La tecnología para el beneficio ecológico del café con manejo de los subproductos (BECOLSUB) ha sido diseñada teniendo en cuenta **la estructura cafetera colombiana**. En la Tabla 22 se presenta la oferta existente de la tecnología BECOLSUB para diferentes rangos de producción anual.

Tabla 22. Niveles de producción anual de café (ton y @ cps/año) y módulos BECOLSUB apropiados.

Modulo DESLIM	Rango de producción, ton	(@) cps/año*
100	Menor de 12,5	(Menor de 1.000)
300	12,5 a 18,8	(1.000 a 1.500)
600	18,8 a 37,5	(1.501 a 3.000)
1.000	37,5 a 75,0	(3.001 a 6.000)
3.000	Mayor de 75,0	(Mayor de 6.000)

* Valores obtenidos considerando días pico de 2,0% y 2,5%, seis horas de operación en el día pico y conversión cereza a seco de 5,0.

A continuación se presentan las características específicas de cada uno de los diferentes modelos de la tecnología DESLIM.

3.10.6.1. Modelo DESLIM 100

El equipo DESLIM 100 incluido en el módulo BECOLSUB 100 (Figura 46), consta de un rotor con 16 agitadores de aluminio inyectado, de 92mm de diámetro, que gira a 870 r.p.m. en el interior de una carcaza de 12,8cm de diámetro interno (relación diámetro rotor a diámetro de carcaza de 0,718). El rotor está soportado por dos rodamientos, el superior, tipo "chumacera" de pared y el inferior de rodillos cónicos. El tornillo sinfín impulsor del café tiene 136,7mm de diámetro externo y 85,9mm de diámetro interno, 40mm de paso y altura total de 87mm; está construido en acero inoxidable calibre (1/8). La camisa también está fabricada en acero inoxidable calibre 18, con perforaciones de 3,1mm x 19,0mm; el ancho de las nervaduras horizontales y verticales es de 3,2mm y 2,9mm, respectivamente.

En el modelo DESLIM 100 solamente se le suministra agua en la parte superior, esencialmente para el lavado del café. Para permitir el mejor aprovechamiento del agua suministrada no se perforó el tercio superior de la camisa. El agua requerida para la adecuada operación del equipo (0,4L/min) se suministra por medio de un tubo de 5,95mm de diámetro interno (15/64") colocado en la parte superior del DESLIM en el lado opuesto a la descarga de los granos desmucilaginados y lavados.

Para la operación del módulo BECOLSUB (desmucilaginador, despulpadora y tornillo sinfín) se utiliza un motor de 0,74kW (1,0 hp). Para accionar el desmucilaginador se requieren 0,44kW (0,6 hp). Otras dimensiones de importancia de este módulo y de los siguientes se presentan en la Tabla 23.

3.10.6.2. Modelo DESLIM 300

Para necesidades de procesamiento de 12,5 hasta 18,8ton (1.000 hasta 1.500@) de cps/año se diseñó el desmucilaginador DESLIM-300 (Figura 47) utilizando la metodología para escalamiento de rotores propuesta por Oliveros *et al.* (115). La carcaza de 60cm de altura se construyó en PVC de 156mm (6") (es posible utilizar otro material como el acero inoxidable, calibre 18, o el aluminio de 2,0mm de espesor, siempre y cuando se mantenga el mismo diámetro interior) con perforaciones oblongas perpendiculares al eje del rotor, de 3,5 x 25,0mm. El rotor, que gira a 870 rpm, consta de un alimentador de tornillo sinfín de 145mm de diámetro, altura de 130mm y paso de 40mm, 22 agitadores de 8 álabes construidos en aluminio inyectado (que garantiza larga duración) con 60mm de diámetro interior y 92mm de diámetro exterior. El rotor está soportado sobre dos rodamientos localizados en la carcaza: el superior es rígido de bolas, tipo FY, para eje de 19,05mm (¾") de diámetro y el inferior, de rodillos cónicos, referencia 30203. Para la protección del rodamiento inferior (de la acción de las mieles y del agua utilizada para el lavado del equipo al



Figura 46. Imagen virtual del modelo BECOLSUB 100; lograda por computador.

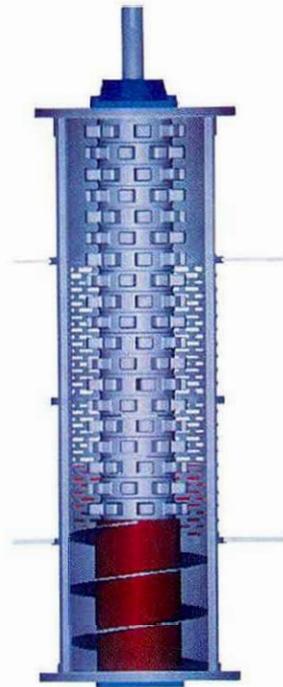


Figura 47. Imagen virtual interior del equipo DESLIM 300, se observa el eje central, tornillo sinfín, carcasa y agitadores.

final de la jornada) se diseñó un alojamiento para el rodamiento de tal manera que quede 63mm por encima de base inferior.

Al igual que en el DESLIM 100, solamente se suministra agua para el lavado del café (0,80L/min), en un solo punto localizado en la parte superior. Para permitir un mejor aprovechamiento del agua, en el DESLIM 300 no se perforó el tercio superior de la carcasa. De esta forma el agua de lavado, que se mueve en dirección opuesta a la del grano, se aprovecha para lavar el café durante buena parte de su recorrido.

Para la operación del módulo (desmucilagador, despulpadora y tornillo sinfín) se utiliza un motor de 1,34kW (1,8 hp). En la eventualidad de que se utilicen dos motores, se requiere uno de 0,75kW (1 hp) para la despulpadora y el tornillo sinfín y otro de 1,2 hp para el desmucilagador.

3.10.6.3. Modelo DESLIM 600

El equipo DESLIM 600, con capacidad para 600kg de cc/h, consta de un rotor con 10 agitadores tipo COLMECANO de 13,5cm de diámetro externo y 9,0cm de diámetro interno, separados (centro-centro) 28mm. Por medio de un tornillo sinfín de 20,5 cm de diámetro interno, 10,2cm de paso y 20,0cm de longitud, colocado en

Tabla 23. Características técnicas de los equipos DESLIM y los módulos BECOLSUB 100, 300, 600, 1000 y 3000 (kg de café cereza/hora).

PARÁMETRO	MÓDULO				
	100	300	600	1000	3000
Altura total L (mm)	400	600 a 650	540 a 610	700 a 800	1000
Diámetro interior (mm)	132 a 135	158 a 162	213 a 216	213 a 216	213 a 216
Altura alimentador sinfín (mm)	80	129 a 135	140 a 160	200	200
Paso alimentador (mm)	26 a 30	40 a 42	44 a 51	64	64
Diámetro hélice alimentador (mm)	112 a 115	138 a 142	193 a 196	193 a 196	193 a 196
Tolerancia entre					
Alimentador y camisa (mm)	10	10	10	10	10
Entradas de agua (un)	1	1	2	2	3
Caudal de agua (l/min)	0,4	0,8	1,6	3	8
Agitadores (un)	16	21	10	15	25
Agitadores-limpiadores	no tiene	2	2	2	4
Dientes agitadores (un)	8	8	8	8	8
Diámetro agitadores (mm)	92	92	133 a 137	133 a 137	133 a 137
Espesor agitadores (mm)	18	18	24 a 26	24 a 26	24 a 26
Largo diente agitador-limpiador (mm)	34 a 36	34 a 36	34 a 36	34 a 36	34 a 36
Largo diente agitador (mm)	17 a 18	17 a 18	17 a 18	17 a 18	17 a 18
Ancho diente agitador (mm)	14,8 a 15,4	14,8 a 15,4	20 a 22	20 a 22	20 a 22
Altura diente agitador (mm)	9,8 a 10,2	9,8 a 10,2	14 a 15	14 a 15	14 a 15
Espesor (calibre) camisa (inoxidable)	1,2 (18)	1,2 (18)	1,2 (18)	1,2 (18)	1,2 (18)
Ancho perforaciones camisa (mm)	3 a 3,5	3 a 3,5	3 a 3,5	3 a 3,5	3 a 3,5
Largo perforaciones camisa (mm)	> de 19	> de 19	> de 19	> de 19	> de 19
Separacion horizontal entre perforaciones (mm)	mayor a 3	mayor a 3	mayor a 3	mayor a 3	mayor a 3
Separación vertical entre perforaciones (mm)	> de 3	> de 3	> de 3	> de 3	> de 3
Longitud lado del eje (mm)	19,05	19,05	31,75	31,75	31,75
Potencia con o sin zaranda (hp)	1	1,8	3	4,8	6,6
Longitud zaranda varillas/lámina troquelada (mm)	no tiene	400/400	550/660	900/950	1100/1400
Diámetro zaranda (mm)	no tiene	300	400	400	400
Separación entre varillas (mm)	X	8,5	8,5	8,5	8,5
Velocidad eje desmucilagador (rpm)	870 a 880	870 a 880	870 a 880	870 a 880	870 a 880
Velocidad zaranda (rpm)	X	20 a 30	20 a 30	20 a 30	20 a 30
Velocidad tornillo sinfín pulpa-mucilago (rpm)	160 a 180	160 a 180	160 a 180	160 a 180	160 a 180

la parte inferior del equipo, se impulsa el café en dirección ascendente por la acción del tornillo sinfín localizado en la parte inferior (Figura 45). El agua requerida en el proceso se suministra en la parte intermedia de la cámara de desmucilagador (0,8L/min) y en la parte superior del equipo (0,8L/min). Debido al flujo ascendente con expulsión de mucílago e impurezas a través de la camisa y a la disposición del agua el café resulta lavado y limpio, listo para continuar el proceso de beneficio. El rotor gira a 870 rpm.

3.10.6.4. Modelo DESLIM 1000

En el modelo DESLIM 1000 (Figura 48) se utiliza un rotor similar al del modelo anterior pero con 15 agitadores tipo COLMECANO. El agua utilizada (3,0L/min.) se aplica en dos sitios: en la mitad de la altura de la cámara y en la descarga (1,5 L/min en cada uno). El rotor gira a 870 rpm y es accionado por un motor de 2,4 hp. En los módulos BECOLSUB 1000 se requiere un motor de 4,8 hp para accionar la despulpadora, el desmucilaginador y el tornillo sinfín.

3.10.6.5. Modelo DESLIM 3000

En el equipo DESLIM 3000 (Figura 49) se utiliza un rotor con 25 agitadores similares a los anteriores, girando a 870 rpm. La carcaza también es del mismo diámetro (0,222m). Cuando se alimenta con el café en baba proveniente del despulpado de 2.400kg de café cereza/h, sin clasificación ni limpieza previas de la cereza, se requiere un motor de 4,8 hp. Si el rendimiento del despulpado es de 3.000kg de cereza/h se requiere un motor de 6,6 hp. El agua, 8,0L/min, en el caso de 2.400kg de cereza/h, se distribuye en iguales cantidades en tres lugares localizados en el tercio inferior, medio y superior de la cámara de desmucilaginado.

En la Tabla 23 se presentan, en forma muy detallada, las características de cada uno de los elementos constituyentes de los equipos DESLIM y algunas características de los módulos BECOLSUB, para los modelos 100, 300, 600, 1000 y 3000kg de café cereza por hora.



Figura 48. Desmucilaginador modelo DESLIM 1000, constituyente de un equipo BECOLSUB, construido por la industria nacional.



Figura 49. Modelo DESLIM 3000 con despulpadora de doble disco y capacidad de 2.500kg café cereza/hora.

3.10.7. Desempeño de la Tecnología DESLIM

En la Figura 50 se presentan los valores promedios de calidad del café pergamino obtenido con un equipo DESLIM 600, comparado con el beneficio convencional con fermentación. Se retiraron los granos verdes y secos del café en cereza utilizado en las evaluaciones; al café en baba se le retiraron los granos sin despulpar y parte de la pulpa utilizando una zaranda. El café obtenido por los dos métodos resultó de alta calidad física. **El daño mecánico** intrínseco, debido al equipo solamente, fue muy bajo ($< 0,2\%$). El consumo específico de agua también ($0,96\text{L/kg}$ de café seco) y la relación potencia instalada/capacidad observada fue de $3,68\text{ W/}$ (kg de café despulpado/h). Similares resultados se han obtenido con los modelos DESLIM 1000 y DESLIM 3000.

Al café procesado en los equipos DESLIM fue necesario retirarle los flotes antes de llevarlo al secador; en el caso de fincas pequeñas esta operación se realiza agregando agua limpia al café hasta cubrirlo con una lámina de 10cm y los flotes se retiran

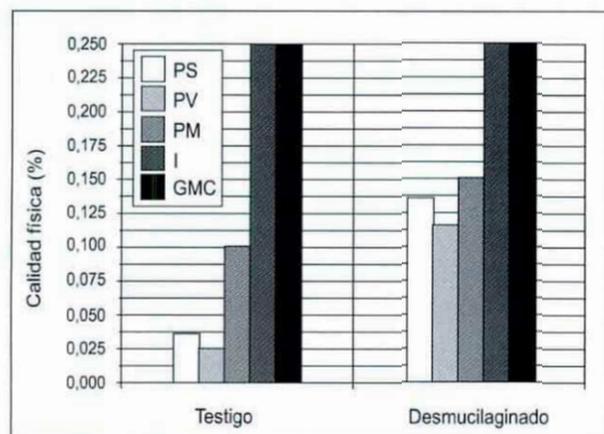


Figura 50. Calidad física del café obtenido (PS = pergamino seco; GMC = grano mediacara; PV = pergamino verde; I = impurezas; PM = pergamino monstruo), con el equipo DESLIM 600.

utilizando un recipiente perforado. En fincas grandes se utiliza una bomba para transportar el café hasta los secadores y los flotes se retiran en el tanque de la bomba y las restantes impurezas por medio de otros dispositivos como el hidrociclón.

En las operaciones con agua para limpiar el café pergamino se genera **contaminación** en los niveles mostrados en la Figura 51. Los valores de DQO²⁷/litro de agua utilizada, para el primer enjuague, que puede ser suficiente si el equipo está operado correctamente, aunque intrínsecamente altos, son muy inferiores a los observados en las aguas mieles resultantes del beneficio con fermentación natural tradicionalmente arrojadas a las quebradas o a los ríos (>30.000mg de DQO/litro). Los valores de DQO/litro para el segundo enjuague (a veces necesario por la mala calidad del café) son notoriamente inferiores a los del primer enjuague. En la Figura 51 también se presentan los valores de DQO/litro en el caso del procesamiento de 3.000kg de café cereza de mala calidad (alto contenido de granos brocados, secos y guayabas), con tecnología BECOLSUB e hidrociclón (Sección 3.11.) con recirculación de aguas. En este caso la concentración de partículas removidas en el hidrociclón, aumenta la carga orgánica de las aguas utilizadas (8.500mg DQO/L). El consumo específico de agua es relativamente bajo (0,12 L/kg de cps).

Finalmente, con la tecnología BECOLSUB desarrollada en Cenicafé, se logra conseguir las siguientes **ventajas** con relación al proceso convencional con fermentación natural:

- Reducción importante en el consumo específico de agua (< 1,0L/kg de cps).
- Mejoramiento notorio en el rendimiento (Capítulo 5) café cereza: café seco, por la recuperación de cerezas maduras y pintonas que por su tamaño y/o por fallas en la calibración de las máquinas no resultan despulpadas y de cerezas con almendras normales pero con la pulpa adherida al pergamino debido a problemas fitosanitarios, como la mancha de hierro. En evaluaciones de los equipos DESLIM

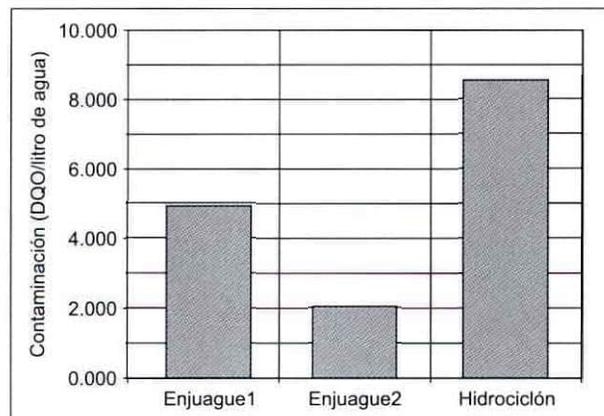


Figura 51. Contaminación generada por la utilización del agua posterior al proceso de desmucilaginado en equipos DESLIM, para la eliminación de los flotes e impurezas.

²⁷ DQO = Demanda Química de Oxígeno.

se han observado conversiones de cereza a seco en el rango de 3,8 a 4,5 mientras que con la fermentación natural las conversiones fueron superiores a 4,4.

- Manejo de mas del 50% de la contaminación generada por las mieles resultantes del proceso gracias a la retención de un porcentaje mayor del 50% de estos efluentes al mezclarlos con la pulpa, utilizando un tornillo sinfín (proceso BECOLSUB). Si el despulpado y el transporte de la pulpa hasta los sitios de transformación se realizan sin agua, se puede evitar más del 90% de la contaminación que tradicionalmente ha ocasionado el beneficio húmedo del café.
- Reducción importante en el tamaño y en el costo de la infraestructura requerida para el procesamiento húmedo del café. (Uno de las primeras modificaciones que se hicieron con el equipo DESLIM, fue en la Subestación de Cenicafé Paraguaicito, en el departamento del Quindío en donde funcionaba entre 1993 y 1995, un sistema ecológico de transporte no hidráulico simultáneo de café despulpado y de pulpa a las fosas, por el sistema de cable-disco. La fermentación se efectuaba por el sistema tradicional y el lavado por el sistema de cuatro enjuagues (Figuras 52 y 53).
- Con el módulo BECOLSUB móvil, (Sección 3.18.) se pueden obtener ingresos adicionales por la reducción en el costo del transporte, pues la pulpa y el mucílago



Figura 52. Sistema de zaranda clasificadora, transportador por el sistema cable - disco, 7 tanques de fermentación y lavado mediante motobomba utilizada para el transporte del café. Cenicafé, Paraguaicito, Quindío 1993-1995.



Figura 53. Simplificación del sistema de lavado, limpiando y clasificando del café mediante el módulo BECOLSUB, en una cuarta parte del espacio anterior. Cenicafé, Paraguaicito, Quindío 1996.

go pueden quedar localizados en los lotes para su posterior manejo ecológico y únicamente se transportaría el café lavado a los secadores.

- Simplificación del proceso de beneficio húmedo del café. Cuando la cereza es de buena calidad (menos del 5% de cerezas verdes y secas) se puede obtener café pergamino lavado con menos del 2,0% de guayabas y media cara (granos con más de la mitad de la pulpa adherida a su superficie) y menos del 0,5% de impurezas, listo para el secado. Cuando la cereza no es de buena calidad, situación que normalmente se presenta en Colombia en épocas fuera de la cosecha principal, se puede limpiar el café lavado utilizando dispositivos como el hidrociclón con recirculación de agua, o en el estado de pergamino seco, utilizando zarandas circulares con aberturas de 4,1 a 4,3 mm.

3.11. LAVADO Y CLASIFICACIÓN DEL CAFÉ EN EL HIDROCICLÓN ²⁸

En el proceso de beneficio húmedo del café tradicionalmente se ha utilizado el canal de correteo (CCo) (Figura 25) y el canal semisumergido (CSS) (Figura 28), para lavar el café y retirar los granos vanos, las impurezas y obtener así cafés de alta calidad física. Cuando el CCo y el CSS se utilizan adecuadamente, permiten separar cafés tipo Federación de cafés de calidad inferior ó corrientes (45).

Sin embargo, tanto en el CCo como en el CSS se observan importantes limitaciones como los altos consumos de agua cuando no hay recirculación (más de 15L de agua por kg de café pergamino seco beneficiado) y porcentajes altos (19%) de café bueno junto con las pasillas (95, 172). En consecuencia, se dificulta y encarece enormemente el manejo ecológico de los efluentes, se extiende el tiempo de operación (por el repase) y se ocasionan importantes pérdidas económicas al caficultor.

El hidrociclón, HC (Figuras 54 y 55) es un dispositivo que permite retirar las impurezas del café con alta eficacia y eficiencia; el equipo se alimenta con las partículas bajo presión utilizando una bomba sumergible. La suspensión agua-café, rota alrededor del eje longitudinal del HC formando un remolino exterior descendente que arrastra los granos más densos (café bueno) hacia las paredes, hasta evacuarlos por la parte inferior ó **ápice**. Las partículas de menor densidad (granos verdes, brocados y algunos granos sanos) y de forma aplanada (restos de pulpa), son arrastradas hacia un remolino interior ascendente, el cual los descarga en la parte superior ó **localizador**.

Las **variables geométricas** ó de diseño de un hidrociclón (Figura 54) son: Diámetro principal = D ; Sección de entrada = bxh ; Diámetro del ápice = D_u ; Diámetro del localizador = D_o ; Altura del localizador = h_{lv} ; Altura de la sección cilíndrica = H_{ci} ; Altura de la sección cónica = H_{co} ; Angulo del cono = θ .

²⁸ Preparado por Aristizábal, I. D. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

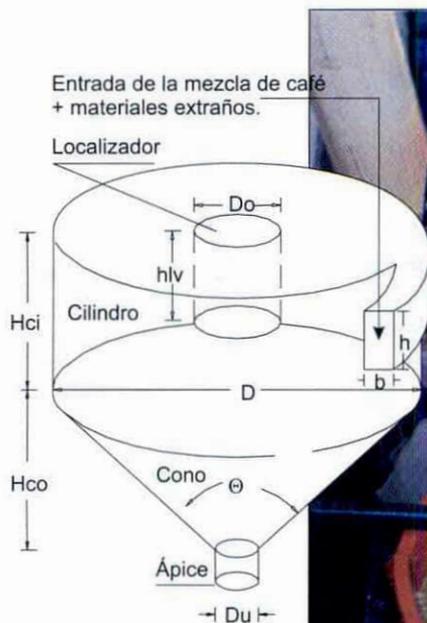


Figura 54. Variables de diseño de un hidrociclón.

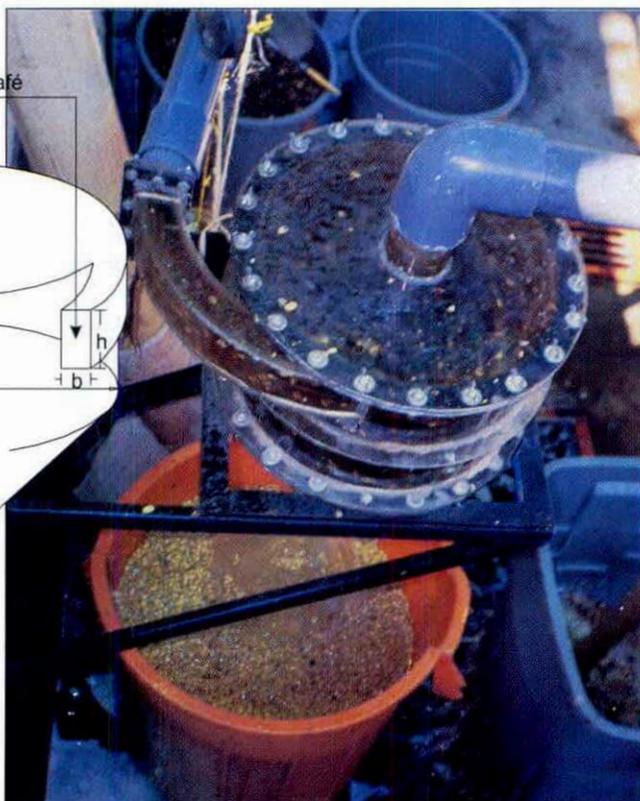


Figura 55. Hidrociclón en operación clasificando café pergamino en Cenicafé.

Las variables de operación que más influyen en el funcionamiento del HC son el caudal y la concentración de la suspensión agua - café. La capacidad del HC depende principalmente de las variables D y H_{ci} , de las características de la motobomba instalada y del flujo de café alimentado al tanque de bombeo (19, 25, 91, 163).

Aristizábal (19) diseñó y evaluó el desempeño de un HC en el lavado y en la clasificación de café procedente de los tanques de fermentación. Las dimensiones del equipo se encuentran en la Tabla 24 y en la Figura 54. En la Figura 55 se muestra el equipo en funcionamiento.

3.11.1. Diseño de un hidrociclón

Para diseñar un hidrociclón se debe conocer el flujo de café por procesar, el caudal de suspensión agua - café que puede transportar la bomba que se utilice y la altura entre el tanque de bombeo y la entrada al hidrociclón. En la Tabla 25 se presentan las dimensiones de hidrociclones para diferentes capacidades de transporte y altura dinámica total de bombeo (H); adicionalmente, se incluyen los valores mínimos de potencia de la motobomba requeridos en cada caso.

Tabla 24. Dimensiones del hidrociclón experimental de Cenicafé para la clasificación del café.

D cm	Di* cm	Du cm	Do cm	hlv cm	Hci cm	Hco cm	θ °
35,0	5,17	3,83	6,30	12,0	21,0	21,0	81,0

* Diámetro equivalente a las dimensiones h y b.

Tabla 25. Dimensiones del hidrociclón para diferentes condiciones de bombeo.

Capacidad kg/h	Caudal L/min	H m	Potencia kw	D cm	Di cm	Du cm	Do cm	hlv cm	Hci cm	Hco cm	θ °
1.500	100	5,0	0,37(1/2 hp)	35,0	5,46	3,34	5,46	14,0	24,0	26,0	62,7
2.200	380	2,5	0,56(3/4 hp)	64,0	8,89	1,90	5,45	25,0	29,0	33,0	81,0
3.000	200	5,5	0,74(1,0 hp)	55,0	8,89	4,37	8,89	22,0	33,0	30,0	80,0

3.11.2. Construcción

El hidrociclón está constituido en su parte superior por un cilindro de diámetro D y en su parte inferior por un cono de ángulo θ : el localizador penetra en el cuerpo del cilindro una distancia hlv, equivalente al 40% del valor del diámetro principal. Se recomienda construir la entrada al hidrociclón en forma de envolvente de sección rectangular (bxh), con el lado mayor paralelo al eje del hidrociclón. La altura del cilindro (Hci) debe ser 2 ó 3 veces la altura de la sección de entrada (calculada en base a Di, diámetro de área equivalente de la sección bxh). La altura del cono (Hco) se elige igual a la altura Hci, o la correspondiente a un ángulo de cono θ entre 60 y 90°. En la parte final del cono, correspondiente al diámetro del ápice (Du), se recomienda acoplar un cilindro del mismo diámetro y de altura de 10cm. Debe evitarse que la descarga superior tenga un efecto sifón. En caso de requerir una conducción por debajo de la descarga inferior, se debe construir una almenara a la salida del HC (19) (Figura 56).

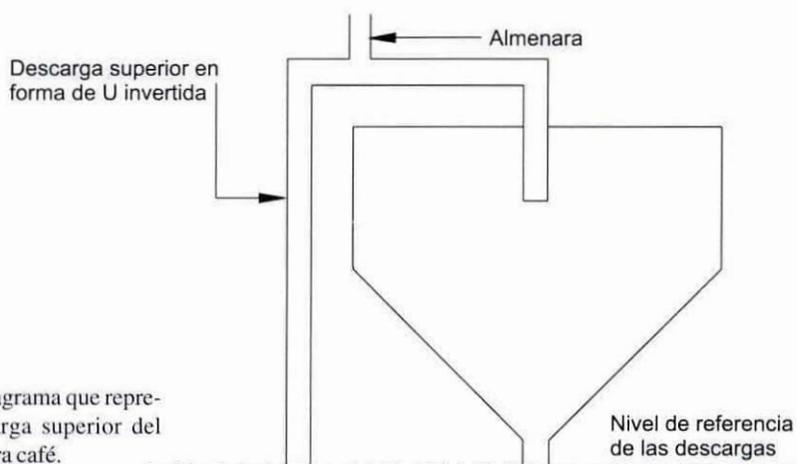


Figura 56. Diagrama que representa la descarga superior del hidrociclón para café.

3.11.3. Instalación y funcionamiento

El hidrociclón se soporta por medio de una estructura construida en ángulo de hierro la cual puede fijarse en la zona húmeda del beneficiadero, cerca al desmucilagador, a los tanques de fermentación, o al tanque de bombeo, de tal modo que el café clasificado pueda almacenarse temporalmente en un tanque de trabajo para ser posteriormente bombeado a la zona de secado. La diferencia de altura entre el tanque de bombeo y la descarga superior del equipo y las pérdidas de presión debidas a la tubería y a los cambios de dirección, deben ser tales que la presión de entrada al HC esté comprendida entre 13,8 y 34,5kPa (2 a 5psi). De esta forma se tiene una descarga en el ápice en forma de abanico con ángulos mayores de 30° respecto a la vertical, lo cual indica que el HC está funcionando correctamente y en consecuencia, se puede obtener café pergamino lavado con bajo contenido de guayabas e impurezas. El caudal de agua evacuado por el ápice, aproximadamente el 30% del total utilizado, se debe retornar al tanque de bombeo. En la Figura 56 se observa como el café clasificado se obtiene por la descarga inferior o ápice.

La descarga del localizador entrega un alto porcentaje de pasillas, granos muy brocados, restos de pulpa, un porcentaje relativamente bajo de granos buenos (12,4%) y el restante 70% del caudal de agua utilizada, el cual debe retornar al tanque de bombeo. Estos materiales pueden ser recirculados fácilmente, obteniéndose una importante recuperación de café bueno (19).

3.11.4. Evaluación del hidrociclón

Los resultados obtenidos de la evaluación comparativa del hidrociclón, (Tabla 26) permiten concluir que este dispositivo presenta las siguientes ventajas con relación al CCo y al CSS: menor consumo específico de agua (se gasta menos agua para clasificar la misma cantidad de café), menores pérdidas de café sano que fluye con

Tabla 26. Desempeño del prototipo de un hidrociclón, diseñado para lavado y clasificación de café pergamino. (19*, 182**, 95****)

Equipo %	Imp. S. %	C.B.S %	Pas. S. %	C.S.P. %	P. + I.	Cap. kg/h L/kg	C.E.A.
HC*	71,6	24,8	28,2	12,4	7,3	1.640	1,9
Cco**	—	23,6	—	18,9	—	450	18,7
CSS***	86,5	—	85,2	19,8	3,2	7.000	3,2

- Imp. S. = Impurezas separadas.
- C.B.S. = Café brocado separado.
- Pas. S. = Pasillas separadas.
- C.S.P. = Café sano en las pasillas.
- P. + I. = Pasillas más impurezas en el café sano.
- Cap. = Capacidad.
- C.E.A. = Consumo específico de agua (litros por kilogramo de café húmedo).

las pasillas, es decir, el porcentaje en peso del café bueno que se separa junto con el material liviano como pasillas, pulpa y otras impurezas por la ineficiencia propia del clasificador es menor en el HC que en el CCo y en el CSS, y mayor eficacia en la separación del café brocado. Aunque el porcentaje de pasillas más impurezas, que aparecen finalmente en el café clasificado por el ápice del HC es del 7,3% en húmedo, este café después de seco queda dentro de las normas como tipo Federación, debido a que las impurezas reducen sensiblemente su peso por su mayor contenido de humedad. En Cenicafé se beneficiaron durante la cosecha principal de 1995, doscientas toneladas de café cereza utilizando despulpado sin agua, desmucilaginado mecánico (desmucilaginador tipo DESLIM) y como sistema clasificador el hidrociclón (Figura 57), con un consumo de agua (con recirculación) promedio de 3,8L por kilogramo de café pergamino seco, obteniéndose alrededor de 40ton de café pergamino seco tipo Federación.

3.11.5. Ventajas de la utilización del hidrociclón

Las principales ventajas que presenta el hidrociclón para limpiar y clasificar café proveniente de procesos de desmucilaginado mecánico ó de fermentación natural, con relación al canal de correteo y al canal semisumergido, son las siguientes:



Figura 57. Operación del hidrociclón acoplado a un módulo BECOLSUB, en Cenicafé.

- Fácil construcción e instalación.
- Se puede construir en lámina de hierro ó en otros materiales sintéticos.
- Las motobombas sumergibles convencionalmente utilizadas en los beneficiaderos permiten poner en funcionamiento el hidrociclón.
- Es de operación continua. Una vez establecidas las condiciones normales de operación del equipo con agua solamente, se puede iniciar el proceso de clasificación del café.
- El café separado como pasilla puede recircularse después de terminar la clasificación del café disponible del día, hasta conseguir una recuperación cercana al 100% del café bueno.
- Ocupa poco espacio y se puede trasladar de sitio.
- Se puede conectar al circuito que transporta el café lavado al secador.
- Es económico, requiere poco mantenimiento y ahorra mano de obra.
- Es el complemento ideal para los desmucilaginosos DESLIM desarrollados en Cenicafé, cuando se dispone de una materia prima con alto contenido de pasillas.
- Es apropiado para el beneficio ecológico del café en los beneficiaderos que utilizan desmucilaginosos DESLIM, ya que se puede utilizar un volumen de agua relativamente pequeño ($< 0,1 \text{ m}^3$) con recirculación.

3.11.6. Desventajas de la utilización del hidrociclón

- Para aumentar su capacidad no basta simplemente aumentar proporcionalmente sus dimensiones; se deben evaluar las características de la bomba y su instalación (Tabla 25).
- Para su óptimo desempeño el equipo exige un flujo constante de café al tanque de bombeo.
- Cantidades instantáneas muy altas de café pueden causar taponamiento del ápice con la consecuente evacuación de todo el material sin clasificar, por la descarga superior.

3.12. TRANSPORTE NEUMÁTICO DE CAFÉ PERGAMINO Y PULPA FRESCA DE CAFÉ

Los transportadores neumáticos son sistemas que utilizan la energía del aire dentro de un ducto para desplazar materiales de un lugar a otro. La fuente de potencia del aire la recibe de un ventilador de alta presión.

En Cenicafé (177) y con el objeto de presentar alternativas al transporte hidráulico de los diferentes estados del café y de la pulpa, se realizaron estudios de transporte

neumático de café pergamino y de pulpa fresca en un sistema de presión positiva utilizando tuberías de PVC de presión, de 107,7mm (4") y 160mm (6") de diámetro. En la Figura 58 se puede observar el esquema de un transportador neumático de presión positiva como el que fue utilizado.

Se encontró que el sistema neumático en tuberías horizontales y verticales de 4" de diámetro resultó apropiado para el transporte del café pergamino lavado seco de agua y seco de la pulpa fresca. El daño mecánico causado en el pergamino en cualquier estado fue pequeño, cuando se transportó café en longitudes menores de 50m y con un máximo de 6 codos.

Los resultados de esta investigación relacionaron el **caudal** y la **presión estática** necesaria para lograr el transporte de los materiales; mediante la combinación de estos datos se hace posible la selección del ventilador apropiado.

En la Tabla 27 se presentan las **velocidades mínimas** del aire requeridas en el transporte horizontal y vertical del café pergamino (recién lavado, seco de agua y seco) y de la pulpa fresca de café.

Figura 58. Esquema de un transportador neumático de presión positiva.

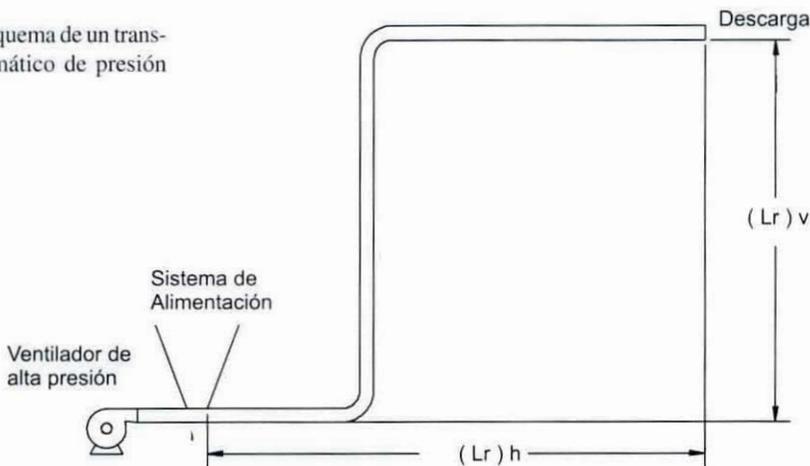


Tabla 27. Velocidades mínimas del aire para el transporte neumático, vertical y horizontal de café pergamino y de la pulpa de café.

Producto	Velocidades mínimas (m/s)			
	Tubería: 160 mm		Tubería: 107,7 mm	
	Transporte horizontal	Transporte vertical	Transporte horizontal	Transporte vertical
Café pergamino recién lavado	17,95	19,74	11,89	13,17
Café pergamino seco de agua	17,06	19,25	11,56	12,83
Café pergamino seco	15,35	17,01	11,09	10,91
Pulpa fresca	15,62	14,43	14,04	11,21

3.13. TRANSPORTE Y MEZCLA DE LA PULPA CON TORNILLO SINFÍN ²⁹

Dentro de la misma filosofía de trabajo de investigación y buscando opciones diferentes al transporte hidráulico de los diferentes estados de café y de la pulpa, se estudió la viabilidad de utilizar el tornillo sinfín para el transporte del café y de sus subproductos en los beneficiaderos de café.

El tornillo sinfín, (Figura 59) es un sistema de transporte que consta de un rotor en forma de hélice continua (tornillo) que al girar, apoyado en sus dos extremos dentro de una carcasa en forma de “U” o en un tubo, imparte movimiento axial al material que en ella se deposite. Este sistema puede ser utilizado particularmente para transportar la pulpa de café sola o mezclada con el mucílago proveniente del desmucilaginado mecánico con bajos consumos específicos de agua (menores que 1 litro por kilogramo de café pergamino seco (cps), como en el desmucilaginado mecánico de flujo ascendente (DESLIM). Este transportador se caracteriza por la sencillez de su construcción, montaje, manejo y mantenimiento, resultando relativamente económico y poco exigente en potencia.

Cuando se utiliza el tornillo sinfín para el transporte y mezcla de la pulpa más el mucílago bien concentrado, se puede obtener una retención del fluido en la pulpa de 56 %. Cuando la adición es solamente por gravedad, en el mejor de los casos la

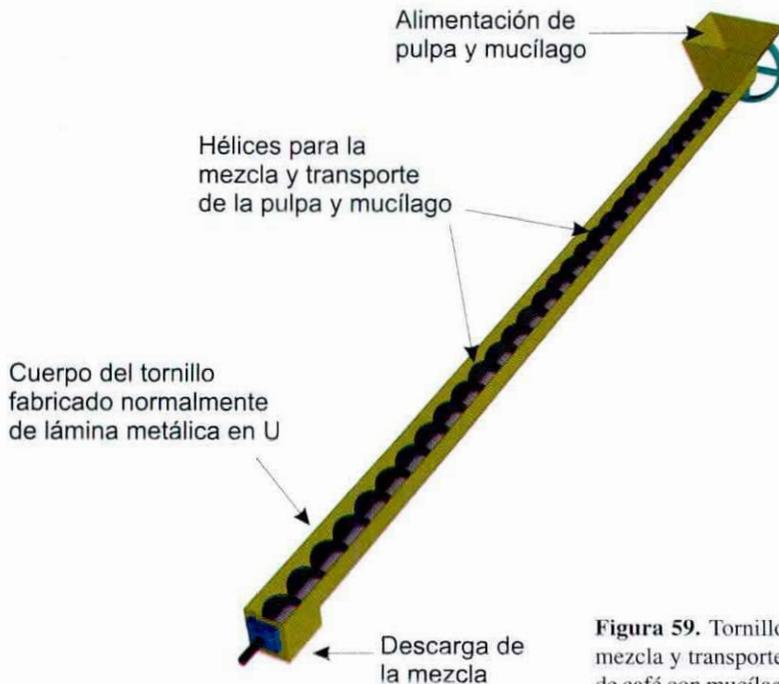


Figura 59. Tornillo sinfín para mezcla y transporte de la pulpa de café con mucílago.

²⁹ Preparado por Sanz U., J. R. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

retención es del orden de 32% (127). Esto hace del tornillo sinfín una pieza fundamental en el beneficio ecológico del café, por vía húmeda, con el cual se logra que la reducción de la contaminación sea mayor del 90% (39, 117, 144).

Si se hace necesario transportar la mezcla a distancias largas, se recomienda realizar la mezcla de la pulpa y el mucílago concentrado en un tramo corto de tornillo sinfín (de 1m) y posteriormente utilizar otro dispositivo en serie, de más bajo precio, como las bandas transportadoras.

Para obtener las dimensiones y características de transportadores de tornillo sinfín para pulpa sola o mezclada con mucílago concentrado, se desarrolló en Cenicafé la siguiente tecnología útil para la utilización del tornillo sinfín para el transporte del café y de la pulpa mezclada con mucílago.

3.13.1. Dimensiones principales

En la Figura 60 se presentan las principales dimensiones del rotor de los transportadores de tornillo sinfín. Se denomina D al diámetro exterior, d al diámetro interior o diámetro del eje, p al paso o avance por vuelta, h a la altura de la hélice, L_e a la longitud efectiva de rosca y L a la longitud total incluyendo la longitud de los apoyos.

3.13.2. Selección del diámetro exterior

Para facilitar la selección del diámetro exterior del tornillo sinfín, se preparó una gráfica (Figura 61), en la cual, en su parte inferior se tienen curvas de tiempo de despulpado en el día pico contra la capacidad de transporte, para diferentes capacidades de beneficiadero en el día pico (Sección 3.16.), calculadas con una velocidad angular en el eje de 180rpm, paso igual al diámetro exterior y una inclinación máxima con la horizontal de 30°. En la parte superior se presenta una curva de capacidad de transporte contra diámetro exterior.

El **manejo de la gráfica** se inicia estimando la cantidad de horas utilizadas para despulpar el café en el día pico; con este valor (en la parte inferior de la gráfica), se

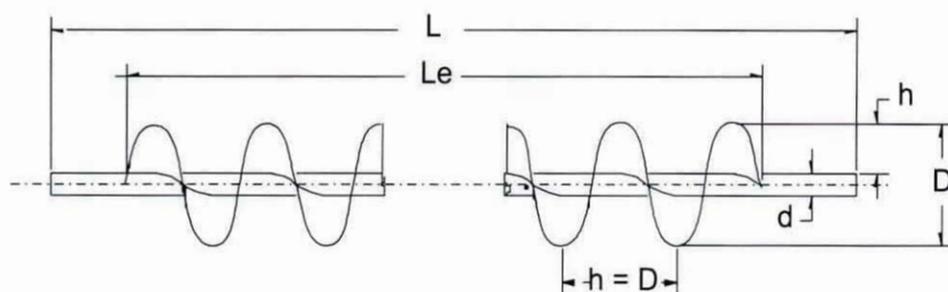


Figura 60. Dimensiones principales del rotor del transportador de un tornillo sinfín.

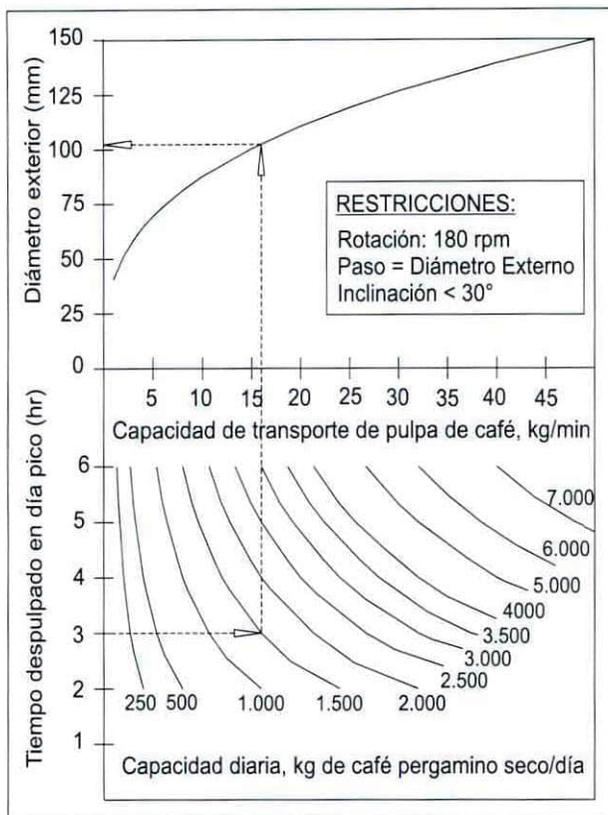


Figura 61. Gráfico utilizado para la selección del diámetro exterior en transportadores de tornillo sinfín para pulpa de café sola o mezclada con mucílago concentrado.

mueve horizontalmente hacia la derecha hasta cortar la capacidad, en kilogramos de cps del beneficiadero en el día pico. Desde este punto se desplaza verticalmente cortando el eje X y la curva superior; el punto de corte con el eje X es el valor de la capacidad de transporte de pulpa requerida y en el punto de corte con la curva superior se desplaza horizontalmente hacia la izquierda hasta cortar el eje Y, donde se obtiene el valor del diámetro exterior del tornillo sinfín. Para efectos prácticos, el diámetro exterior obtenido en este gráfico puede expresarse como diámetro nominal (D_n) en pulgadas, haciendo la conversión por medio de la Tabla 28. La dimensión se debe aproximar el valor al número entero superior³⁰.

Si el tiempo utilizado para desulpar el café cereza del día pico es de 3 horas y el beneficiadero está diseñado para 1.500kg de cps por día, la capacidad del tornillo sinfín debe ser mayor o igual a 16kg/min. Esta capacidad se logra con un tornillo con un diámetro mayor o igual a 102,5mm (4"), paso igual al diámetro, 180 rpm y una inclinación inferior a 30°, como puede observarse en la Figura 61, (líneas punteadas).

³⁰ El sistema Inglés de unidades es más utilizado en el ambiente cafetero que el sistema internacional de unidades.

3.13.3. Cálculo del diámetro del eje y potencia del tornillo sinfín

Debido a que los ejes del rotor de los transportadores de tornillo sinfín son largos, su propio peso causa problemas de flexión y vibraciones indeseables; por esta razón y por economía, es recomendable utilizar tubería galvanizada en lugar de ejes macizos.

El diámetro del tubo a utilizar como eje del tornillo sinfín depende de la longitud y de la potencia que se requiera para moverlo. En la Tabla 28 se presentan los **diámetros** de tubería galvanizada y las **potencias** recomendadas para diferentes longitudes y capacidades. Por los requerimientos tan bajos de potencia, cuando los ejes de las despulpadoras y del tornillo están paralelos se facilita utilizar el mismo motor para accionarlos simultáneamente.

Cuando las longitudes de los transportadores de tornillo sinfín superan los valores indicados en la Tabla 28, se deben utilizar apoyos intermedios. El diseño de estos apoyos debe ser cuidadoso, debido a que una reducción en el área transversal se puede constituir en una reducción de la capacidad y un aumento considerable de la potencia.

3.13.4. Construcción del tornillo sinfín

Un tornillo sinfín se puede considerar como una sucesión de discos (Figura 62), con dimensiones que corresponden a los diámetros exterior e interior del rotor, que tienen que ser cortados en forma radial y unirse unos con otros de manera que formen una especie de resorte helicoidal; posteriormente se estiran sobre un eje.

Tabla 28. Potencias y diámetros de ejes en tubería galvanizada, recomendados para transportadores de tornillo sinfín con pulpa sola o mezclada con mucílago concentrado.

Longitud efectiva, m	Rango de Capacidad, kg/min	Motor Recomendado,		Dn Recomendado,	
		kw, (hp)		mm,	(pulg)
2,00	30	0,30 (0,40)		26,67	(¾)
2,00	30-50	0,67 (0,90)		26,67	(¾)
2,50	20	0,30 (0,40)		26,67	(¾)
2,50	20-50	0,67 (0,90)		26,67	(¾)
3,00	20	0,30 (0,40)		26,67	(¾)
3,00	20-50	0,67 (0,90)		26,67	(¾)
3,50	10	0,30 (0,40)		26,67	(¾)
3,50	10-50	0,67 (0,90)		26,67	(¾)
4,00	10	0,30 (0,90)		33,40	(1)
4,00	10-50	0,67 (0,90)		33,40	(1)
4,50	10	0,30 (0,40)		42,16	(1 ¼)
4,50	10-50	0,67 (0,90)		42,16	(1 ¼)
5,00	10	0,30 (0,40)		42,16	(1 ¼)
5,00	10-50	0,67 (0,90)		42,16	(1 ¼)

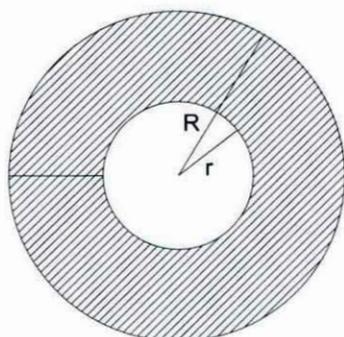


Figura 62. Dimensiones para la construcción de los discos del tornillo sinfín. (R = radio externo; r = radio interno, ver Tabla 29).

Para evitar errores en el montaje se debe tener en cuenta la dirección del lugar de descarga y el sentido de giro que se va a utilizar, para determinar si el rotor tiene rosca izquierda o derecha. El tipo de rosca tiene que ser tomado en cuenta en el momento que se estén uniendo los discos con soldadura.

Las dimensiones que deben tener los discos (Figura 62) se pueden observar en la Tabla 29, donde D_n es el diámetro nominal del rotor, D el diámetro exterior real del rotor (4mm menor que el diámetro interior de la tubería PVC sanitaria), el paso del tornillo $p = D$, d es el diámetro del eje en tubería galvanizada, R es el radio mayor del disco, r es el radio menor del disco y N el número de discos por metro lineal de tornillo.

Después de unidos y estirados los discos sobre el eje de tubería galvanizada, se debe rectificar el paso y la perpendicularidad antes de ser unidos rígidamente con soldadura eléctrica. Cuando se esté aplicando la soldadura se debe tener en cuenta la realización de “cordones” en lugares suficientemente distanciados para evitar

Tabla 29. Dimensiones de los discos para la construcción del rotor del transportador de tornillo sinfín.

D_n mm y	$D = p$ mm	d mm pulgadas(“)	R mm	r mm	N Uds./m
60 (2“)	50,49	26,67	28,88	16,97	18,16
60 (2“)	50,49	33,40	28,44	19,89	18,45
60 (2“)	50,49	42,16	28,05	23,88	18,70
82 (3“)	72,19	26,67	42,52	19,75	12,34
82 (3“)	72,19	33,40	41,72	22,32	12,57
82 (3“)	72,19	42,16	41,00	25,98	12,79
114 (4“)	103,70	26,67	63,13	24,61	8,31
114 (4“)	103,70	33,40	61,83	26,67	8,48
114 (4“)	103,70	42,16	60,57	29,80	8,66
168 (6“)	156,04	26,67	98,65	33,96	5,31
168 (6“)	156,04	33,40	96,64	35,32	5,42
168 (6“)	156,04	42,16	94,56	37,62	5,54

deformaciones por el calentamiento del tubo y en lugares diametralmente opuestos para evitar problemas de desbalanceo.

3.14. BENEFICIADERO ECOLÓGICO CON MANEJO DE SUBPRODUCTOS - MÓDULO BECOLSUB ³¹

El módulo BECOLSUB (BEneficiadero ECOLógico y Manejador de SUBproductos) es una tecnología para el beneficio ecológico del café que integra: el uso de despulpadoras convencionales (Sección 3.2.) para el despulpado del café sin agua, el uso del módulo DESLIM (Sección 3.10.4.) para el desprendimiento del mucílago, el lavado limpieza y clasificación parcial o total del café pergamino, el uso del tornillo sinfín (Sección 3.13.) para la mezcla y transporte mecánico de los subproductos pulpa, mucílago, y materiales extraños al buen café, desalojados del equipo DESLIM, hasta lugares de depósito y, eventualmente, cuando la materia prima es de deficiente calidad, el uso del hidrociclón (Sección 3.11.) para la preparación final del café pergamino (Figuras 63, 64, 65, 66, 67, 68 y 73).

La estructura principal está conformada por dos pórticos en tubería metálica para conducciones eléctricas (tipo conduit). El motor eléctrico (o de gasolina, en el módulo BECOLSUB móvil, (Sección 3.15.) utilizado para mover el desmucilagador mecánico, la despulpadora y el tornillo sinfín, con la capacidad mencionada como se indica en la Tabla 28, se montan en un sistema mecánico para tensión de la banda, con el eje paralelo al eje del desmucilagador.

Tolva seca

BECOLSUB

Tornillo sinfín

Depósito de recolección para el lombricultivo



Figura 63. Módulo demostrativo BECOLSUB, dentro de un beneficiadero construido en guadua, Cenicafé, Chinchiná.

³¹ Tomado del registro de patente No. 95031744, Ministerio de Industria y Comercio de Colombia (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia). "Proceso para la transformación del café cereza a café pergamino lavado que incluye el despulpado sin agua, el desmucilagado, lavado y limpieza del café pergamino y la mezcla del mucílago con la pulpa, mediante la utilización de despulpadora, desmucilagador y tornillo sinfín".



Figura 64. Esquema tridimensional e imagen virtual del módulo BECOLSUB (Beneficiadero Ecológico, con Manejo de Subproductos).

El sistema de reducción de velocidad entre el motor eléctrico y el desmucilagador mecánico (870 rpm), se hace por medio de una transmisión con banda plana³². Se aprovecha la baja velocidad de giro del eje del desmucilagador mecánico para mover la despulpadora y el tornillo sinfín.

Como los ejes del desmucilagador mecánico, de la despulpadora (180 rpm) y del tornillo sinfín (180 rpm), no son paralelos, la transmisión de potencia entre estos se hace por medio de bandas de sección transversal circular³³.

Los cambios de dirección que se presentan en las bandas de sección circular, se realizan por medio de poleas auxiliares (poleas locas) apoyadas en doble rodamiento para disminuir al mínimo las pérdidas por fricción.

La longitud e inclinación de este tornillo depende de la infraestructura donde se va a instalar.

Adicionalmente a lo expuesto, se diseñaron los módulos BECOLSUB provistos de zarandas cilíndricas (Sección 3.6.) opcionales para clasificar los granos despulpados, con el objeto de separar, de los granos normales, los granos que no fueron

³² Las bandas planas usadas en este montaje fueron marca Habasit tipo F-14, formadas por una capa de poliamida, recubierta por ambos lados con caucho de nitrilo acrílico. Cuando se cumple con las recomendaciones exigidas para la instalación de estas bandas, la eficiencia en la transmisión de potencia es superior al 95%. Cualquier cambio en este sistema de transmisión debe tener en cuenta este valor.

³³ Las bandas de sección transversal circular utilizadas en este montaje fueron de Polycord marca Habasit de 15mm de diámetro. Cuando se cumple con las recomendaciones exigidas para la instalación de estas bandas, la eficiencia en la transmisión de potencia es superior al 95%; cualquier cambio en este sistema de transmisión debe tener en cuenta este valor.

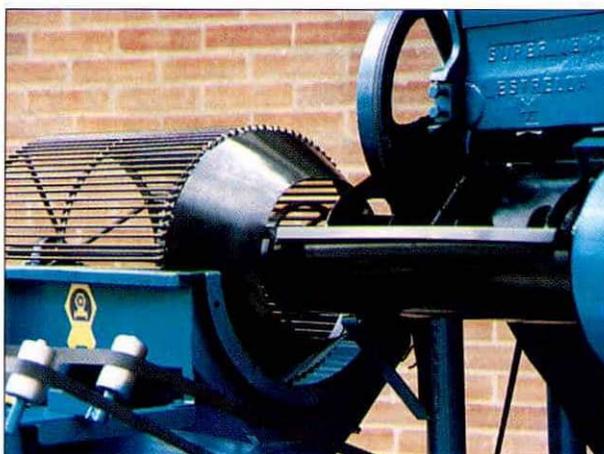


Figura 65. Módulo BECOLSUB, con zaranda cilíndrica para clasificación del café despulpado.

despulpados, como granos guayaba, verdes y en general, elementos mayores que la abertura entre varillas (Figuras 65 y 66).

3.15. MÓDULO BECOLSUB MÓVIL ³⁴

Como una respuesta de Cenicafé a varias inquietudes (en particular de la División Técnica del Comité de Cafeteros de Caldas) de que dado el pequeño espacio y el éxito inicial del módulo BECOLSUB fijo, descrito en la sección anterior, se proyectara un módulo autónomo de energía que pudiera remolcarse por vehículos pequeños, como los camperos de uso popular en la zona cafetera y para propiciar una nueva agroindustria, por la cual nuevos empresarios podrían ofrecer el servicio de beneficio a domicilio, se diseñó y construyó un equipo móvil BECOLSUB (145) con la característica especial de que fuera posible **transportarlo** por la zona cafetera colombiana (Figuras 67, 68 y 73).

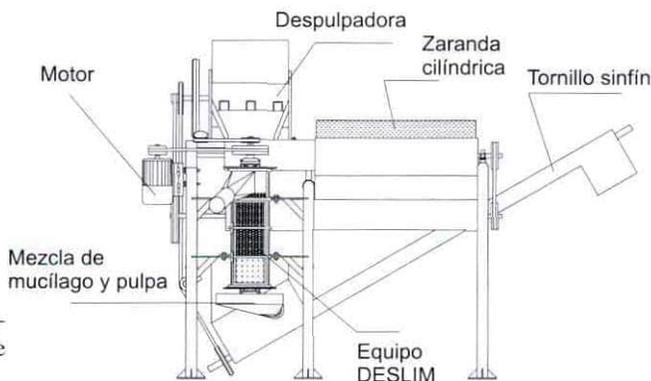


Figura 66. Vista lateral del módulo BECOLSUB provisto de zaranda cilíndrica.

³⁴ Preparado por Ramírez G., C. A. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

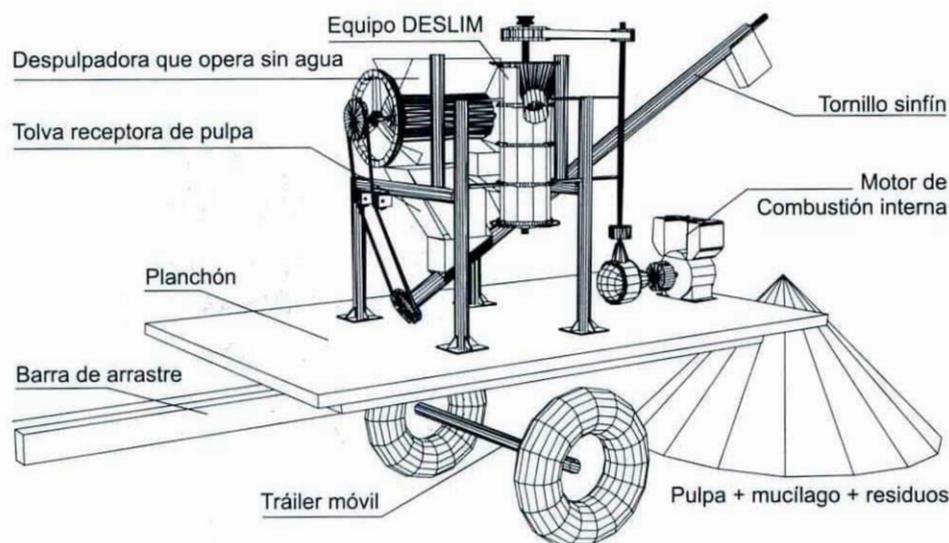


Figura 67. Esquema del Módulo BECOLSUB 600 móvil.

Con el módulo BECOLSUB **móvil** se obtienen ingresos adicionales debido a la reducción en los costos de transporte, pues la pulpa y el mucílago pueden quedar localizados en los lotes de café de la finca para su posterior manejo ecológico y, únicamente, se transporta el café lavado hasta los secadores, transportando así menor peso y aumentando la capacidad de carga, lo cual conlleva a una economía en el consumo de combustible y en la mano de obra requerida.

Un ejemplo da cifras concretas a lo expuesto: si se asume una finca con una producción de 125 ton (10.000@) de cps al año, en el día pico (2% de cc), se recibirían 12.500kg de café cereza, cantidad que exigiría siete viajes de una volqueta con capacidad por viaje de 3m³. Si se beneficia con el módulo BECOLSUB móvil en los lotes, solamente se requerirían 3,9 viajes lo cual significa un ahorro del 45% del volumen de transporte.

El prototipo construido (Figura 68), es el primer modelo BECOLSUB 600 móvil construido por Cenicafé, accionado por un motor de combustión interna de gasolina marca Kohler de 8 hp. Para el transporte de la pulpa con el mucílago se utiliza un tornillo sinfín accionado por el mismo motor. Este conjunto se instaló sobre el planchón de un remolque de dos ruedas; para ello fue necesario introducir un sistema de transmisión de potencia (se utilizó un reductor estándar automotriz), para reducir las revoluciones de salida del motor de 3.600 hasta 1.800 rpm. Por medio de poleas y bandas (plana y redonda) se redujo la velocidad angular hasta 870 rpm, en el eje del desmucilagador. El desempeño del equipo, la calidad del café obtenido (Figura 69), la mezcla de los subproductos (Figura 70) y el control de la contaminación, se discuten en la Sección 3.18.



Figura 68. Módulo BECOLSUB 600 móvil, remolcado por un vehículo campero.

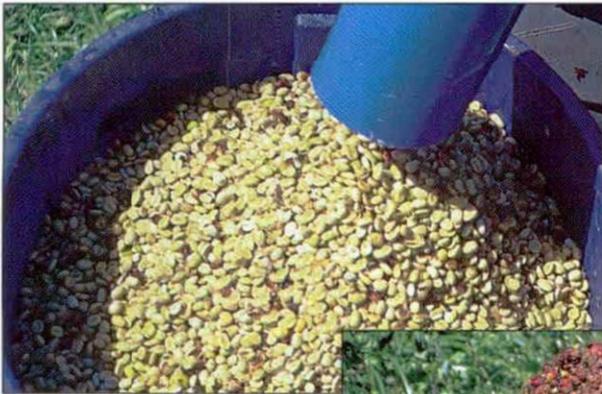


Figura 69. Café de muy alta calidad obtenido con el BECOLSUB móvil.



Figura 70. Pulpa mezclada con mucílago, que debe utilizarse preferiblemente como sustrato en un lombricultivo cubierto.

3.16. SELECCIÓN DE UN MÓDULO BECOLSUB

Con el objeto de facilitar la selección del equipo BECOLSUB con la capacidad adecuada, se presenta la Figura 71 que relaciona la producción anual de la finca expresada en @ (arroba = 12.5kg) de café pergamino seco por año (eje X) con la capacidad del equipo BECOLSUB expresada en kilogramos de café cereza por hora (eje Y) para determinar el número de horas de operación del módulo (parámetro del cuerpo de la gráfica).

La gráfica ha sido construida asumiendo que el día pico de la finca es del 2,5% y que la conversión de café cereza a café pergamino seco es de 5kg de cc. a 1kg de cps (o lo que es igual, de 62,5kg de cc. a una arroba de cps). Si no son éstas las condiciones de la finca, fácilmente se podrán corregir los cálculos, como se indica a continuación:

Mediante un ejemplo se ilustra la **utilización de la gráfica**; si el caficultor espera producir 31.3ton (2.500@) de café pergamino seco al año, operando 6 horas el módulo en el día pico, se localiza el valor de 2.500 en el eje de las X y se sube perpendicularmente hasta cortar la línea de 6 horas de funcionamiento. Desde el punto de corte se desplaza horizontalmente a la izquierda hasta cortar el eje de las Y, y se lee el valor de 640kg de café cereza por hora. El equipo apropiado será un módulo BECOLSUB 600. El tiempo real de operación en el día pico será de 6 horas por la fracción 640/600, o sea, de 6,4 horas

A mayores valores de conversiones de café cereza a café pergamino seco y a mayores valores de los días pico se requerirá, proporcionalmente, un módulo BECOLSUB de mayor capacidad. A menores valores de las variables anotadas se requerirá proporcionalmente menor capacidad.

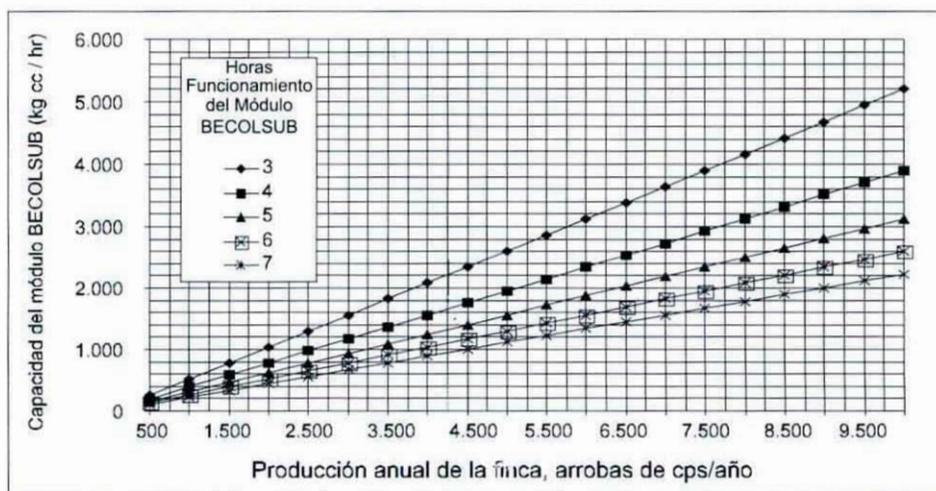


Figura 71. Selección del equipo DESLIM y del módulo BECOLSUB en función de la producción de la finca y del número de horas de funcionamiento del módulo.

De otro lado, a mayor número de horas de funcionamiento del módulo, menor será, proporcionalmente, la capacidad necesaria del módulo.

De esta manera y en el mismo ejemplo anterior, si en la misma finca para otra condición de cosecha, la conversión de café cereza a pergamino seco esperada fuera de 4,2 a 1 y el día pico estimado fuera del 2%, el valor encontrado de 640kg cc/h se debe corregir multiplicando 640 por las fracciones 4,2/5 y 2/2,5 respectivamente, obteniéndose el valor de 430kg de café cereza por hora. La solución es adquirir el mismo Módulo BECOLSUB 600, pero debe ser operado 4,3 horas en el día pico que resulta de multiplicar el valor de 6,4 horas consecutivamente por los fracciones 4,5/5 y 2/2,5.

Las ecuaciones utilizadas en los cálculos de ésta Sección se incluyen a continuación para que el lector pueda utilizarlas independientemente sin necesidad de usar la Figura 71. En la Tabla 30 aparecen las variables necesarias para ejecutar los cálculos, su nomenclatura de las fórmulas y las unidades correspondientes.

Tabla 30. Variables y unidades utilizadas en los círculos para seleccionar el módulo BECOLSUB.

Variable	Unidades	Sigla
Producción finca en @ de café pergamino seco por año	@cps/año	PF@PpA
Día pico en el año, en porcentaje	100 x año/día	DP
Relación de kg (kilogramos) a @ (arobas)	12,5kg/@	RELKa@
Relación de café cereza a café pergamino seco	Decimal	RelCCaP
Producción finca e kilogramos de cps por día	Kgcps/día	PFKPPD
Producción finca, Kilogramos de café cereza por día	KgCC/día	PFKCCPD
Horas de operación del equipo por día	Horas	HorOp
Capacidad horaria necesaria de la unidad BECOLSUB	KgCC/hora	CapB

Los cálculos se efectúan por medio de las siguientes fórmulas:

Producción finca en kilogramos de cps por día.

$$PFKPPD = PF@PpA \times RELKa@ \times DP / 100$$

< 3 >

Producción finca en kilogramos de cc por día.

$$PFKCCPD = PFKPPD \times RelCCaP$$

< 4 >

Capacidad horaria de la unidad BECOLSUB.

$$CapB = PFKCCPD / HorOp$$

< 5 >

3.17. RETENCIÓN EN LA PULPA DE CAFÉ, DEL EFLUENTE LÍQUIDO-SÓLIDO, RESULTANTE DE LOS MÓDULOS BECOLSUB ³⁵

El mucílago generado mediante la remoción mecánica contiene restos de pulpa y otras estructuras del grano que incrementan notoriamente su potencial contaminante: más de 100.000mg de sólidos totales/kg de cps con desmucilaginado mecánico, frente a menos de 40.000mg de sólidos totales/kg de cps en el beneficio convencional; de otro lado, una mayor cantidad de masa potencial contaminante se genera por la acción del desmucilaginado mecánico. La tecnología BECOLSUB, desarrollada en Cenicafé, permite una reducción notoria en el consumo específico de agua (< 1,0L/kg cps) y el manejo ecológico de los subproductos mucílago y pulpa, al mezclarlos, lográndose la retención de más del 50% del mucílago y la reducción de la contaminación en más del 90% (144).

En este estudio (127) se evaluó el efecto del consumo específico de agua (0,4; 0,7 y 1,0 L/kg de cps) y la adición de partículas de cisco de café al mucílago, en la retención de estos efluentes líquidos, utilizando la pulpa como lecho. La mayor retención de mucílago (81%) se obtuvo con el consumo específico de agua de 0,7L/kg de cps y la adición de partículas de cisco (8% en peso). Con este nivel de retención se logró controlar el 96,5% de la contaminación total generada por el beneficio húmedo del café.

El cisco agregado contribuye a reducir la contaminación debido a que absorbe parte del mucílago (35,2 %, en peso) y mejora la capacidad de filtración del lecho (el nivel de sólidos totales presentes en los líquidos drenados en los tratamientos con cisco es el más bajo).

Se hizo la caracterización reológica de las suspensiones obtenidas en los tratamientos utilizando viscosimetría de placas paralelas; en cada efluente líquido se determinó el índice de fluidez, el índice de consistencia y el de comportamiento de flujo. El índice de fluidez aumenta notoriamente con la reducción en el consumo específico de agua y la adición de partículas de cisco (valor máximo de 24,77 Pa); similar tendencia mostró el índice de consistencia. El índice de comportamiento mostró poca variación (mínimo de 0,185) e indicó que los efluentes líquidos son altamente pseudoplásticos. No se observó relación entre el valor del índice de fluidez y el porcentaje de retención de mucílago en el lecho. El drenaje del mucílago se acelera principalmente por la reducción de su viscosidad, debido a la actividad bioquímica propia del mucílago y al calentamiento del lecho (temperatura máxima de 52°C).

En la Figura 72 se presentan los resultados obtenidos en el **control de la contaminación** con los tratamientos utilizados (los valores de la abscisa marcados con un

³⁵ Preparado por Pascuas L., R.T. Becaría de COLCIENCIAS, Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

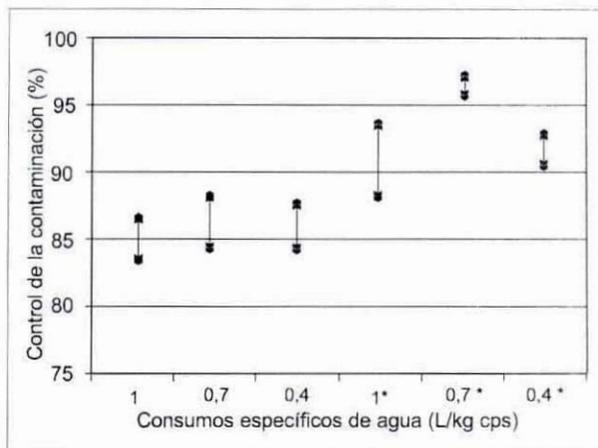


Figura 72. Comparación de porcentajes de control total de contaminación, con adición de cisco de café al mucílago (valores indicados con asterisco).

asterisco (*) indican que en ese tratamiento se le adicionó cisco de café al mucílago, 8% en peso). No se observó, al 5% de significancia, diferencia entre los tratamientos sin adición de partículas de cisco en la variable control de contaminación. En el tratamiento con adición de 8% de cisco al mucílago (en peso) se obtuvo el valor más alto de control de contaminación (96,5%).

Se evaluó la actividad de la lombriz roja californiana, *Eisenia foetida* Savigny, utilizando como sustrato la mezcla pulpa + mucílago + cisco, resultante del tratamiento con mayor retención. Como tratamiento testigo se usó pulpa sola como sustrato. Los resultados obtenidos (Tabla 31) indican que con el sustrato pulpa + mucílago (obtenido con 0,7L/kg de cps y 8% de cisco) se obtienen mayores valores de conversión de lombricompuesto, de incremento en peso de lombriz y de tasa de consumo.

Tabla 31. Actividad de la lombriz roja californiana *Eisenia foetida* Savigny en dos sustratos.

VARIABLE	SUSTRATO	
	Pulpa + mucílago + cisco	Pulpa sola
Conversión de lombricompuesto en base seca, (%)	40,80	18,02
Incremento en peso de lombriz, (%)	14,07	***
Tasa de consumo (g sustrato/g lombriz/día)	0,87	0,77

*** Se presentaron pérdidas en peso de la lombriz.

3.18. EVALUACIONES DE CAMPO DEL MÓDULO BECOLSUB 600 MÓVIL ³⁶

Con la finalidad de evaluar integralmente y en la forma real en el campo, se experimentó con el equipo BECOLSUB 600 móvil (Figuras 67 y 68) mediante siete pruebas en la finca "Calamar Restrepo", ubicada en el municipio de Chinchiná, Caldas, a 1.400 msnm. con temperatura promedio de 20,8°C y una precipitación anual de 2.656mm, en promedio. El proceso se efectuó con café cereza maduro de la var. Colombia. El período de trabajo estuvo entre los días 11 de diciembre de 1996 a 16 de enero de 1997. Se describen a continuación los resultados de las evaluaciones.

3.18.1. Caracterización de los diferentes tipos de café obtenidos

La caracterización de la materia prima y la evaluación de la tecnología BECOLSUB se realizó conforme a la metodología adoptada convencionalmente para Cenicafé en proyectos de investigación, en la evaluación de los prototipos DESLIM y BECOLSUB, según Ramírez (145), Álvarez (6) y Álvarez (10). En las Tabla 32 a 42, se presentan los resultados correspondientes a las diferentes evaluaciones y para cada una de las repeticiones; de esta forma se demuestra la consistencia de los resultados.

Al analizar los valores de la Tabla 32, se observa que las muestras de café contienen un alto porcentaje de grano maduro cosechado (80,3%). Se observa además un porcentaje promedio normal de pasillas (granos guayabas + impurezas).

Los porcentajes de granos verdes (1,29%) y pintones (6,77%) se consideran normales en la recolección de la cosecha, teniendo en cuenta que para esas fechas se

Tabla 32. Caracterización del café cereza recibido. (Muestras de 500g).

Parámetros	Prueba 1 g	Prueba 2 g	Prueba 3 g	Prueba 4 g	Prueba 5 g	Prueba 6 g	Prueba 7% g	\bar{X} g	\bar{X} %
Grano verde	1,85	12,70	11,90	4,65	6,00	3,00	4,55	6,38	1,29
Grano pintón	61,45	44,20	60,90	27,05	22,50	10,65	7,45	33,46	6,77
Grano maduro	416,50	346,00	355,50	376,50	419,00	434,00	430,50	396,86	80,32
Sobremaduro	17,70	77,50	52,00	27,65	33,00	37,00	41,00	40,84	8,26
Guayaba	0,40	20,30	16,50	10,00	15,00	11,10	12,00	12,19	2,47
Impurezas	3,10	3,70	3,85	5,45	4,70	4,80	5,20	4,40	0,89
Peso									
Total muestra %	501	504,40	500,65	451,30	500,20	500,55	500,70	494,11	100,00

\bar{X} = Promedio

³⁶ Preparado Ramírez G., C. A. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

acercaba el final de la cosecha principal. El valor de granos sobremaduros es alto (8,26%) y podría causar problemas en la taza.

Según el análisis mostrado en la Tabla 33, los porcentajes de grano trillado y mordido, que conforman el daño mecánico después de despulpado, son muy bajos (0,01%), cuando se opera la despulpadora sin agua, lo cual está de acuerdo con lo observado en estudios realizados en Cenicafé. El parámetro pulpa en el grano (1,87%) es inferior al valor permitido (2%) por la Norma ICONTEC (85). De lo anterior se deduce un buen funcionamiento de la despulpadora.

En la misma tabla se consigna un daño mecánico de grano verde de 0,12%, (0,08 + 0,04) valor que se considera bajo respecto al porcentaje inicial de grano verde de 1,29%. También se observan porcentajes de grano guayaba normales (2,05%).

De la información de la Tabla 34, se deduce que el **daño mecánico** causado por el desmucilaginado (daño en el desmucilaginado-daño en el despulpado) es realmente muy bajo (valor medio de 0,16%). El daño mecánico proveniente del grano pelado verde, pelado verde partido, pelado verde brocado es sólo de 0,58%, porcentaje que también se considera bajo para el resultado del desmucilaginado final.

El análisis de calidad del café despulpado indica que hay 2,05% de guayabas y mediacaras, los cuales sometidos al desmucilaginado se reducen a 0,75% de guayabas y mediacaras, lo cual indica que en el proceso de desmucilaginado existe **recuperación** del 63,42% de granos guayabas y mediacaras.

Tabla 33. Caracterización del café despulpado (Muestra de 100g).

Parámetros	Prueba	\bar{X}	\bar{X}						
	1	2	3	4	5	6	7%	g	%
	g	g	g	g	g	g	g	g	%
Grano sano	94,40	89,55	92,00	90,95	93,10	94,50	95,00	92,79	92,79
Pelado sano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pelado partido	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Pelado brocado	0,05	0,10	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03
Pelado verde	0,10	0,15	0,15	0,00	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08
Pelado verde partido	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,10	0,04	0,04
Pelado verde brocado	0,05	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
B + *	2,50	2,25	1,30	1,15	0,85	1,45	0,90	1,49	1,49
B + + **	1,60	1,75	0,55	0,60	0,75	0,60	0,50	0,91	0,91
Pulpa en el grano	0,90	1,95	2,75	2,50	2,70	1,20	1,10	1,87	1,87
Guayaba	0,15	3,15	2,60	3,05	1,85	1,40	2,15	2,05	2,05
Impurezas	0,25	0,95	0,55	1,75	0,60	0,80	0,20	0,73	0,73

* Grano medianamente atacado por la broca del café.

** Grano altamente atacado por la broca del café.

\bar{X} = Promedio.

Tabla 34. Caracterización del café desmucilaginado (Muestra de 100 g).

Parámetros	Prueba	—	—						
	1	2	3	4	5	6	7%	X	X
	g	g	g	g	g	g	g	g	%
Grano Sano	91,90	93,70	95,30	95,90	96,00	96,95	97,20	95,28	95,28
Pelado Sano	0,40	0,05	0,25	0,15	0,05	0,05	0,00	0,14	0,14
Pelado Partido	0,00	0,10	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05	0,03	0,03
Pelado Brocado	0,10	0,10	0,10	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,05
Pelado Verde	0,70	0,25	0,20	0,10	0,20	0,15	0,10	0,24	0,24
Pelado Verde Partido	1,65	0,05	0,00	0,15	0,05	0,00	0,05	0,28	0,28
Pelado Verde Brocado	0,05	0,10	0,15	0,05	0,05	0,00	0,00	0,06	0,06
Brocado +	2,40	2,30	1,75	1,40	1,05	1,35	0,95	1,60	1,60
Brocado ++	1,30	0,60	0,65	0,75	0,70	0,35	0,55	0,70	0,70
Pulpa en el Grano	0,45	0,85	0,75	0,55	0,35	0,25	0,45	0,52	0,52
Guayaba y media cara	0,05	1,65	0,70	0,75	0,90	0,70	0,50	0,75	0,75
Impurezas	1,00	0,25	0,15	0,15	0,65	0,15	0,15	0,36	0,36

* Grano medianamente atacado por la broca del café.

** Grano altamente atacado por la broca del café.

\bar{X} = Promedio.

Al observar la **variable pulpa en el grano** después de despulpado (1,87%), y después de desmucilaginado (0,52%), se concluye que hay una disminución del 72,2%, lo cual resulta también muy ventajoso, considerando la calidad física del grano. La diferencia en impurezas obtenida en el proceso de desmucilaginado indica que hay una remoción del 50,69%. En la caracterización de la muestra desmucilaginada se detecta una incidencia de broca de 2,3%, lo cual resulta un porcentaje aceptable si se considera que se deriva de infestaciones de campo.

Al comparar los resultados de la Tabla 35, que se refiere a la **calidad del café pergamino seco**, con respecto a las normas de comercialización de café tipo Federación, se observa que el proceso BECOLSUB móvil permite obtener café perga-

Tabla 35. Caracterización del café pergamino seco proveniente del beneficio en un BECOLSUB móvil (Muestra de 100g).

Parámetros	Prueba	Norma Café tipo Federación	—						
	1	2	3	4	5	6	7%		X
									%
Pelado %	2,00	0,15	0,15	0,15	0,20	0,25	0,20	2,00	0,44
Guayaba %	0,05	0,40	0,15	1,00	0,40	0,30	0,30	3,00	0,37
Broca %	2,00	2,10	1,15	0,95	0,90	0,65	0,40	5,50	1,16
Impurezas %	0,30	0,25	0,15	0,20	0,25	0,15	0,10	5,00	0,20
Humedad % (b.h.)	12,00	10,40	10,10	11,00	11,30	11,10	11,30	10-12	11,03

\bar{X} = Promedio.

mino seco Tipo Federación; los porcentajes en cada uno de los parámetros son inferiores a las normas de recibo y se demuestra una vez más, que la tecnología es apropiada para el procesamiento del café.

En la Tabla 36 se presentan los valores de velocidad angular de los diferentes ejes que caracterizan la calibración y el funcionamiento adecuado del equipo; se observa que velocidad de giro del eje de la despulpadora es más alto que el valor recomendado para éste tipo de despulpadoras (180 rpm).

Los análisis de la Tabla 37 corresponden a las cuatro últimas evaluaciones luego de realizar los ajustes requeridos para conseguir un óptimo funcionamiento del equipo; se observa que el **rendimiento** del equipo, expresado en la transformación del café cereza por hora, fue de 596kg/hora, es decir, igual a la capacidad nominal de diseño de los Módulos BECOLSUB 600.

3.18.2. Rendimientos y desempeños

El consumo de agua suministrado al equipo fue de 1,5L/min, en promedio, (Tabla 38) para un volumen total de consumo de agua por prueba de 31,3L. El consumo específico de agua con respecto al café cereza es de 0,155L/kg cc. Si utilizamos la relación cereza a seco promedio (4,84kg de cereza a seco), se obtiene un consumo específico de agua de 0,75L/kg de cps, valor muy cercano al mínimo logrado (0,6L/kg).

3.18.3. Control de la contaminación con el módulo BECOLSUB 600 móvil

En la Tabla 39 se pueden observar los flujos de agua + mucílago generados por el equipo. Para el análisis de la contaminación generada por el beneficio ecológico del café se evaluaron las muestras de las pruebas Nos. 4, 5, 6, y 7 (Tabla 40).

Tabla 36. Velocidades de giro de los diferentes ejes del BECOLSUB móvil (rpm).

Parámetros	Prueba	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Promedio
Motor gasolina	X	3.600	3.600	3.600	3.600	3.600	3.600	3.600
Eje desmucilagrador	X	984	959	994	975	980	965	975
Eje tornillo sinfin pulpa	X	208	215	210	212	210	205	210
Eje despulpadora	X	218	212	226	218	215	210	216

Tabla 37. Capacidad de proceso del módulo BECOLSUB 600 móvil.

Parámetros	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Promedio
Café cereza procesado, kg	201	208	200	200	202
Tiempo proceso, min	21	23	20	18	21
Cereza/hora, kg	574	543	600	667	596

Tabla 38. Consumo de agua del módulo BECOLSUB 600 móvil.

Parámetros	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Promedio
Agua, L/min.	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5
Café cereza, kg	201,0	208,0	200,0	200,0	202,3
Tiempo operación, min.	21,0	23,0	20,0	18,0	20,5
Total agua proceso, litros (L)	31,50	36,8	30,0	27,0	31,3

Tabla 39. Flujos de agua+mucílago generados por en el BECOLSUB 600 móvil.

Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5		Prueba 6		Prueba 7	
mL	s	mL	s	mL	s	mL	s	mL	s	mL	s	ML	s
800	19,25	620	15,93	560	15,40	750	15	700	15	710	16,52	330	15,58
960	21,77	540	15,20	600	15,29	830	15	730	15	805	17,64	900	15,49
790	16,43	620	15,85	600	15,29	920	15	800	15	800	15,99	1180	15,77
890	16,86	610	15,22	660	15,38			800	15	950	17,56	990	15,51
		700	15,37	580	15,29							1100	15,56
850	19,15	593	15,66	587	15,33	833	15	743	15	816	16,93	900	15,58

Tabla 40. Flujos de agua + mucílago, drenados y análisis de DQO.

Parámetros	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Promedio
Flujo (agua + mucílago)/min	3,33	2,97	2,89	3,46	3,16
Flujo total (agua + mucílago) (L)	70,00	68,39	66,47	79,58	71,11
Total drenados, Litros (L)	17,33	26,15	18,00	13,00	18,62
D.Q.O. mucílago, mg/L	124.000	95.000	136.000	125.000	120.000
D.Q.O. Drenados, mg/L	94.500	112.500	138.000	130.000	118.750
g D.Q.O./kg generados	43,18	31,23	45,20	49,74	42,34
g D.Q.O./kg drenados	8,15	14,14	12,42	8,45	10,79
Contaminación generada, %	7,15	12,41	10,89	7,41	9,47
Contaminación controlada, %	92,85	87,59	89,11	92,59	90,53

En la Tabla 41 se observan los flujos de agua y el mucílago medidos en el equipo al adicionarle 1,5L/min de agua; el valor promedio de la **contaminación** del efluente drenado fue de 118.750mg de DQO/L, muy cercano al valor encontrado por Oliveros *et al.* (121) de 120.000mg de DQO/L. Esto indica condiciones de trabajo similares a los equipos evaluados en las investigaciones de desmucilaginado mecánico en los laboratorios. El valor promedio de la **contaminación controlada** por medio netamente físico fue de 90,5%.

De la Tabla 41 se puede concluir además que con la tecnología BECOLSUB se efectúa una retención física del efluente del 73,6% en volumen y un control físico de la contaminación generada por el beneficio húmedo del café del 90,5%; esto sin tener en cuenta que parte de los drenados de la pulpa se pueden utilizar para el riego de los lombricultivos.

Tabla 41. Control de la contaminación generada, por el módulo BECOLSUB 600 móvil.

Parámetros	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Promedio
Total (mucilago + agua), Litros (L)	70	68,39	68,39	79,58	71,59
Total (pulpa + mucilago), kg	134	136	130	121	130,25
Total drenados, Litros (L)	17,33	26,15	18	13	18,62
Retención en volumen, %	75,24	61,76	73,68	83,66	73,59
Control contaminación, %	92,85	87,59	89,11	92,59	90,53

El promedio del peso del café pergamino seco fue de 41,9kg lo cual significa un rendimiento o relación de conversión de café cereza a pergamino seco de 4,84 a 1, una relación de café lavado a café pergamino seco de 2,08 y 2,33 para la relación de café cereza a café lavado (Tabla 42).

Se obtuvo un **consumo de combustible** (gasolina verde corriente de 85 octanos) de 0,02L/kg de cps. (0,066 galones/@ de cps), que equivalen \$ 5,1/kg de cps (\$ 63,75/@ de cps) (con valores de enero de 1997), en promedio.

3.18.4. Control de la contaminación con el módulo BECOLSUB 1000 móvil

Con un equipo BECOLSUB 1000 móvil, Figura 73, se realizaron 14 evaluaciones distribuidas en cuatro fincas, como se indica en la Tabla 43. 1) Finca “La Palma”, ubicada en la vereda “El Limonar”, municipio de Sasaima, Cundinamarca, a 1.450 msnm, temperatura promedio de 21°C y una precipitación anual de 2.078mm. El proceso se efectuó con café cereza tipo Variedad Colombia maduro. El período de trabajo fue en los meses de noviembre de 1997 y abril de 1998. 2) Finca “Tasmania”,

Tabla 42. Desempeño general de la tecnología BECOLSUB móvil, en el beneficio de café.

Parámetros	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Promedio
Total café cereza, kg	201,00	208,00	200,00	200,00	202,25
Rendimiento café cereza, kg/hr	574,00	543,00	600,00	667,00	596,00
Café desmucilaginado, kg/min	4,73	3,82	3,84	5,28	4,42
Total café lavado calculado, kg	99,33	87,86	76,80	95,04	89,76
Total café lavado pesado, kg	82,50	87,00	85,00	94,00	87,13
Total CPS, kg	39,80	43,00	41,00	43,70	41,88
Rendimiento café cereza a café seco	5,05	4,84	4,88	4,58	4,84
Rendimiento café lavado a café seco	2,07	2,02	2,07	2,15	2,08
Rendimiento café cereza a café lavado	2,44	2,39	2,35	2,13	2,33
Relación agua/kg cps.	0,79	0,86	0,73	0,62	0,75
Consumo combustible, L/ton cps	X	19,40	X	X	18,20
Consumo combustible (gal/@)	X	0,064	X	X	0,06



Figura 73. Módulo BECOLSUB 1000 con el cual se realizaron pruebas de campo en la finca “La Palma”, Cundinamarca.

ubicada en el municipio de Pereira, Risaralda, 3) Finca “La Coralia”, ubicada en el municipio de Pereira, Risaralda a 1.350 msnm, con una temperatura promedio de 21,6°C y una precipitación anual de 1883,3mm, en promedio.

El proceso de beneficio se efectuó con café cereza maduro tipo Variedad Colombia. Se llevó a cabo el trabajo entre los meses de noviembre de 1997 y abril de 1998.

Se efectuaron las siguientes caracterizaciones, siguiendo la misma metodología utilizada para evaluar el módulo BECOLSUB 600 móvil: calidad del café cereza, rendimientos de café cereza a café pergamino seco; capacidad del equipo. Los resultados generales se resumen en la Tabla 43. Se determinó además el control de la contaminación y los resultados fueron similares a los obtenidos con el módulo BECOLSUB 600 móvil.

El rendimiento promedio del equipo fue de 1.157kg. de café cereza/hora. La conversión de cereza a pergamino fue de 5,12 a 1. El consumo de agua por kg de café pergamino seco fue de 0,94L. Se obtuvo un consumo de combustible de gasolina verde corriente de 85 octanos de 13,3L/ton (0,040 galones por arroba) de cps.

Tabla 43. Desempeño general de la tecnología BECOLSUB 1000 móvil.

	LA CORALIA Mitaca (3 pruebas)	TASMANIA Principal (2 pruebas)	LA PALMA Mitaca (3 pruebas)	LA PALMA Principal (6 pruebas)	PROMEDIO
Total café cereza (kg./hora)	1140,52	1186,00	1135,51	1164,27	1156,58
Café desmucilaginado (kg/min.)		9,18		9,18	9,18
Total café lavado pesado (kg)	97,00	255,75	107,83	189,10	162,42
Total cps (kg)	49,5	115,00	46,33	80,33	72,79
Café cereza por prueba (kg)	228,6	623,00	416,33	223,00	372,75
Rendimiento cereza-seco	4,63	5,42	4,82	5,28	5,12
Relación agua/kg. cps	0,88	0,96	0,92	1,00	0,94
café pergamino seco (@)	3,96	9,20	3,71	6,43	5,82
Consumo combustible (L/ton)	11,50	13,30	13,0	13,0	12,10
Consumo combustible gal/@	0,038	0,044	0,043	0,043	0,040

3.19. CENTRAL DE BENEFICIO ECOLÓGICO DE ANSERMA, CALDAS (CBEA) ³⁷

Cenicafé diseñó, construyó y puso en funcionamiento con la colaboración del Comité de Cafeteros de Caldas y de la Cooperativa de Caficultores de Anserma, la CENTRAL DE BENEFICIO ECOLÓGICO DE ANSERMA, localizada en dicho municipio a 1.750 msnm (Figuras 74 y 75).

El objetivo del proyecto es el de **comercializar café cereza** ofrecido por los caficultores de la región, adoptar las mejores tecnologías, introducir conceptos ecológicos en el proceso del beneficio y prestar un excelente servicio al caficultor, principalmente para mejorar sus ingresos y facilitar su gestión de beneficio. El café cereza que se utiliza, producido en diferentes pisos térmicos, proviene de numerosas fincas de la región.

Los trabajos se realizaron como respuesta a la solicitud conjunta de la Cooperativa de Caficultores de Anserma y del Comité Departamental de Cafeteros de Caldas en 1990, de realizar un proyecto con la tecnología que Cenicafé había generado.

En general y como respuesta a la solicitud se formuló el proyecto y se concluyó el montaje de los equipos en 1994, año en el que se iniciaron las evaluaciones. En 1995 se introdujeron los conceptos integrales de los equipos DESLIM y BECOLSUB, de forma que en mayo de 1995, por **primera vez**, se evaluaron satisfactoriamente tres equipos comerciales DESLIM 3000, con consumos de 0,6L de agua por kilogramo de café pergamino seco, con el concepto integrado de control físico de la contaminación. Los equipos, mezclaban el mucílago con la pulpa y con los residuos provenientes de la recuperación de granos guayaba y media cara, produciendo una

³⁷ Preparado por Roa M., G. y Álvarez G., J. Ingeniería Agrícola, Cenicafé, Chinchiná, Caldas, Colombia

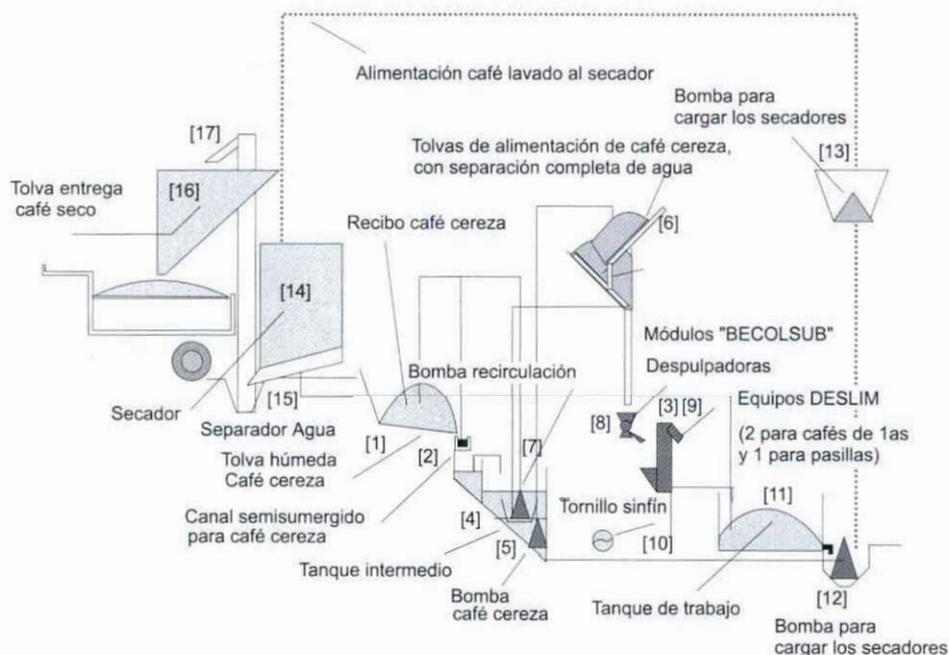


Figura 74. Esquema de la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, Caldas.

mezcla que se utilizó como sustrato para la producción comercial del lombricultivo, la cual se evaluó conjuntamente con dos firmas comerciales (Capítulo 6).

La CBEA se diseñó con el objetivo de controlar la contaminación por medios físicos y también para conseguir una mejor clasificación del café con broca, que se constituía como una amenaza potencial muy grande para la región, particularmente, por el sistema novedoso de comercialización que propiciaría la proliferación del insecto. El proyecto incluyó la clasificación hidráulica de los granos atacados por la broca del café mediante el canal semisumergido para café cereza, que es hasta hoy, junto con el hidrociclón (Sección 3.11.), uno de los mejores medios de separación y

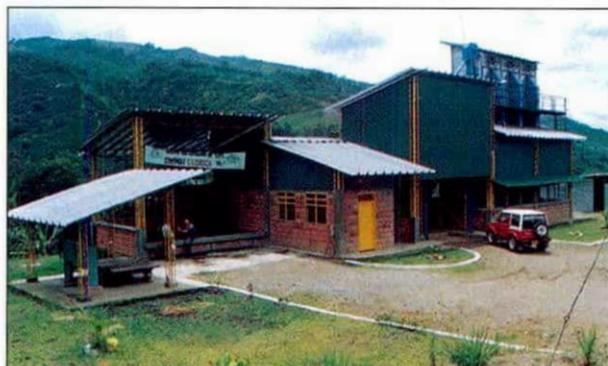


Figura 75. Central de Beneficio Ecológico de Anserma, Caldas.

clasificación de materiales leves, como los granos de café severamente brocados. El método hidráulico permite además la separación de objetos pesados como piedras y tornillos, que podrían arruinar frecuentemente las camisas de las despulpadoras y que significan hasta la fecha un problema serio. Hasta la presente fecha, Octubre de 1999, el sistema de clasificación hidráulico es muy bien aceptado y no incrementa el consumo de agua sensiblemente por unidad de café procesado, por el sistema de recirculación efectuado.

3.19.1. Componentes de la Central de Beneficio de Anserma, Caldas

La Central está constituida de los **elementos** incluidos en la Figura 74. El proceso de beneficio se desarrolla de la siguiente manera:

Se recibe el café cereza en sacos o a granel en una tolva húmeda [1]. El agua de transporte³⁸ conduce el café cereza al canal semisumergido [2] donde se separan y conducen los materiales livianos y el café brocado al módulo BECOLSUB de pasillas [3]. Los granos más densos, que se sedimentan por entre las ranuras del canal, caen al fondo de un tanque intermedio [4], cuyo nivel de agua se controla para utilizar la mínima cantidad y garantizar que la bomba de café cereza [5] no se quede en vacío. El café cereza se transporta hidráulicamente hasta la tolva elevada [6] en donde el agua de transporte se separa por dos fondos falsos perforados dispuestos en serie y regresa por gravedad a una bomba de recirculación confinada en un pequeño tanque de agua [7], la cual reutiliza el agua recibida para la operación de la tolva húmeda de recibo y del canal semisumergido. El café cae, sin agua y por gravedad, a las despulpadoras [8] (Figura 15) de los dos módulos BECOLSUB de cafés de primeras los cuales también se operan en ausencia de agua. Una tolva recibe el café despulpado que alimenta dos desmucilaginosos DESLIM 3000 [9] de cafés de primeras. La pulpa desprendida va a otra tolva que vacía su contenido a un tornillo sinfín [10] que a su vez recibe el mucílago de los tres equipos DESLIM y los transporta a la fosa de pulpa y mucílago (Figuras 76 y 123), [1]. El café desmucilaginado, lavado y limpio se entrega al tanque de trabajo [11] formando un proceso continuo a través de la tolva de café cereza, las despulpadoras y el equipo DESLIM que desmucilagina, lava y limpia. Del tanque de trabajo se lleva, por medio de dos bombas en serie [12] y [13], a dos secadores convencionales de capacidad estática de 7,5 ton (600@) de café pergamino seco. El café pergamino seco se transporta a una tolva de entrega de café seco [16], por medio de un transportador de cangilones convencional [17].

³⁸ Teniendo en consideración de que se decidió utilizar agua como medio de clasificación de los granos atacados con broca, lo más lógico fue también aprovechar las excelentes características del transporte hidráulico y se proyectó, además, demostrar que su uso bien proyectado no implica perjuicio al carácter ecológico del proyecto.

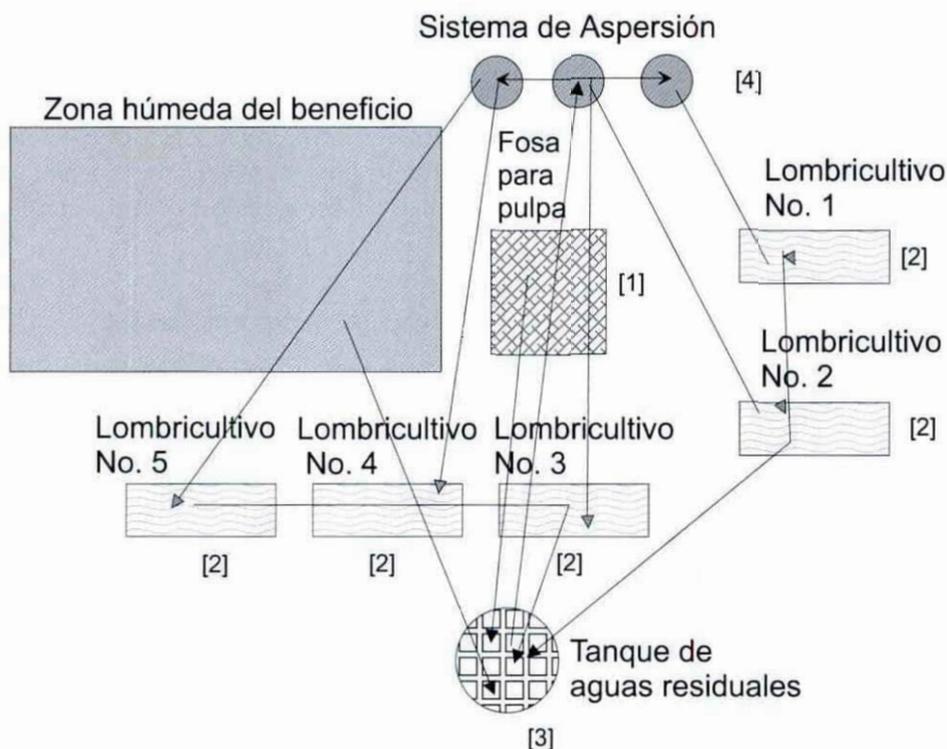


Figura 76. Esquema del manejo de los subproductos pulpa y mucílago en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, CBEA. Caldas.

Se efectuaron además evaluaciones (Sección 4.8.7.) de 3 secadores CENICAFE-IFC, de 5ton (400@) de capacidad, cada uno, obteniéndose resultados parciales muy aceptables en 3 pruebas. En el presente momento se proyectan modificaciones en el sistema de dosificación de la descarga de los granos, para garantizar perfecta uniformidad en los flujos de los granos y la humedad final del café.

El agua de transporte del café a los secadores se recircula gracias al separador de agua-café [15] y a la bomba de los secadores [12] y [13]. También se incorporó a este circuito, un hidrociclón para complementar la clasificación efectuada por los equipos DESLIM.

A pesar que se dispuso de dos bombas de recirculación, de los tanques de depósito y de recirculación y de las tuberías hidráulicas de conexión, el agua necesaria para ocupar todo el circuito es de menos de 3 m³, que se pueden recircular durante las 24 horas de operación de la Central. El consumo de agua por unidad de café pergamino procesado, en caso de que se trabaje con la mitad del día pico, sería tan solo de 0,4L de agua/kg cps, o sea, menos del 10% del total del agua nominal para colocar en funcionamiento todas las etapas del proceso del beneficio.

3.19.2. Manejo de la pulpa, del mucílago y de la lombriz

La pulpa mezclada con el mucílago se transporta mediante el tornillo sinfín a las fosas para la pulpa [1], (Figuras 76 y 123), en donde se almacena por varios meses para alimentar las lombrices (Capítulo 6). El criterio de diseño para estimar la capacidad de estas fosas se basa en que al final de la cosecha principal se llene completamente la fosa y que se encuentre completamente desocupada antes del inicio de la cosecha principal. De esta manera se minimiza el área de almacenamiento, se garantiza el alimento para la lombriz en todo el año, y se uniformiza la producción del abono orgánico.

La pulpa mezclada se transporta manualmente por carreta de la fosa a los lechos de lombricultivo [2], en donde se aplican capas de 4 centímetros de espesor una o dos veces por semana, hasta una altura máxima de 40 cm.

Al final de la jornada diaria todas las aguas se evacuan al tanque de aguas residuales de 30 m³ [3], (Figura 76) de donde se bombean a los lechos de pulpa con lombrices [2]. A este mismo tanque llegan las aguas de drenado de las fosas de pulpa [1] y de los lechos de pulpa y lombrices; una bomba conduce estas aguas a un sistema de irrigación del lombricultivo por aspersión [4]. La contaminación real de la Central de Beneficio se mide por el caudal, y el valor de DQO correspondiente que rebose este tanque y que en el futuro será eliminada por la adopción de los biodigestores anaeróbicos (Capítulo 8). Se estima que este rebose sea actualmente, en término de contaminación, menos del 10% del potencial contaminante total.

3.19.3. Evaluación de la Central

Entre Octubre/95 y Enero/96, se procesaron 670.000kg de café cereza con todos los equipos funcionando, incluyendo las modificaciones de la CENTRAL en la parte húmeda, de los secadores de torre (Sección 4.8.7.) y el manejo del lombricultivo. Con base en ésta evaluación preliminar y con las modificaciones efectuadas, la CENTRAL ha funcionado ininterrumpidamente desde Septiembre 1998 hasta Octubre 1999, atendiendo sin restricciones las demandas de los caficultores y obteniéndose en ella café tipo Federación.

3.19.3.1. Uso del método CERPER en la CBEA

Se consideró desde el inicio de la elaboración del proyecto de la CBEA, que parte fundamental en el éxito de la operación sería la real, justa y oportuna evaluación de la calidad del café cereza que los caficultores entregaran en la Central. Los métodos que tradicionalmente se han utilizado comercialmente para éste fin eran, según evaluaciones preliminares de Cenicafé, de muy dudosa precisión, por lo cual se decidió profundizar en los estudios correspondientes y obtener un método alternativo. Como resultado se obtuvo el método CERPER (estimador de la relación café CEReza a PERgamino) en Cenicafé (8, 79), cuyo desarrollo y evaluación compa-

rativa en relación con el método real de beneficio y con los métodos convencionales se presenta en la Sección 5.5.1.

Los resultados comparativos obtenidos para estimar la relación de café cereza a café pergamino seco mediante la utilización del método CERPER y el método convencional por vía hidráulica, utilizado por la Cooperativa de Caficultores de Anserma, se presentan en la y en la Figura 77.

El rendimiento de 71 evaluaciones (como promedio de los meses de octubre, noviembre y diciembre de 1995) de café cereza para producir café pergamino seco, medido con el método CERPER modificado (Sección 5.5.1.) fue de 5,2 (coeficiente de variación = 7,6%) contra el valor del 5,7 (coeficiente de variación de 10,6%) determinado por medio del procedimiento de flotación utilizado por la Cooperativa.

En la Figura 77 se presentan los valores obtenidos en el período de evaluación; la línea recta corresponde a la relación ideal 1 a 1, los símbolos de cruces representan la evaluación efectuada por la relación de los pesajes antes (café cereza) y después (café pergamino seco) del beneficio. Se observa que existen diferencias notorias entre las dos predicciones y que el **método CERPER se aproxima con mucha exactitud** al sistema real e ideal de la evaluación de la relación cereza/pergamino.

3.19.3.2. Calidad del café cereza y del café pergamino

Café Cereza. En general, el café entregado a la Central en los años de 1995 y 1996 fue de baja calidad (Figura 78), posiblemente porque los caficultores eran muy conscientes de que no sería rechazado ningún tipo de café.

En efecto, el valor promedio de la suma de los granos verdes, pintones, sobremaduros, brocados y pasillas fue del 35%, valor muy superior al esperado (máximo del 15%) para obtener un café Tipo Federación, en un beneficiadero convencional.

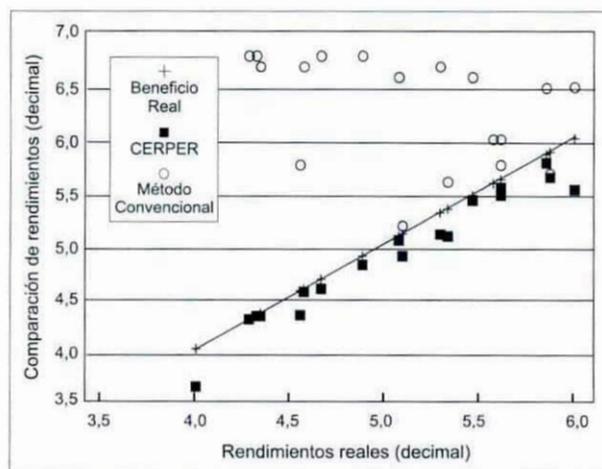
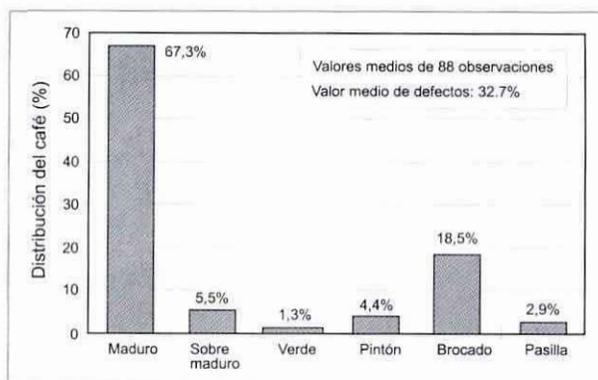


Figura 77. Comparación entre los valores estimados de la relación de café cereza a café pergamino seco mediante el método CERPER y el de flotación. (Total de 71 muestras).

Figura 78. Histograma de la calidad del café cereza recibido en la cosecha principal de 1995 en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, Caldas.



3.19.3.3. Calidad del café pergamino obtenidas por desmucilaginado mecánico

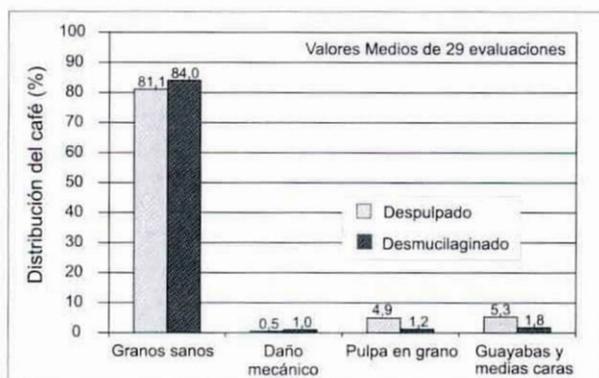
Se observa en las Figuras 79 y 80 el efecto benéfico del desmucilaginado con relación al aumento de la calidad física expresada en granos normales (2,7%, en promedio ponderado); también leves aumentos de los granos trillados y mordidos (1,06%, en promedio ponderado), notoria disminución de los granos sin despulpar (5,9%), disminución de la pulpa en el grano (3,7%) y aumento del porcentaje del grano verde (4,3%).

En la Figura 81 se indica, con base en 29 evaluaciones, la disminución de los granos guayaba y media cara que corresponden a un aumento proporcional de mayor cantidad de grano bueno en el café pergamino.

En la Figura 82 se indica en detalle, el aumento del 0,5% del daño mecánico (grano trillado y grano mordido) por efecto del desmucilaginado mecánico. Este aumento es balanceado muy favorablemente por las mejoras de calidad del grano indicadas anteriormente.

En las Figuras 83 y 84 se observa el alto valor de granos buenos (70%) obtenido del tanque de las pasillas de la CBEA; este hecho, junto con el mejoramiento de los

Figura 79. Influencia del desmucilaginado mecánico en la calidad física del pergamino (Promedio de 29 evaluaciones).



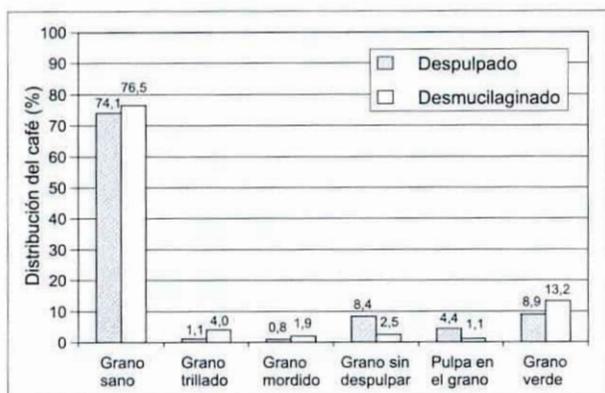


Figura 80. Influencia del desmucilaginado mecánico en la calidad física del pergamino (Promedio de 16 evaluaciones).

granos de primeras, hace de forma general que el efecto benéfico del desmucilaginado mecánico sea el de mejorar el rendimiento del beneficio sensiblemente, en comparación con el beneficio tradicional.

3.19.3.4. Secado del café

El secado del café fue efectuado en forma experimental utilizando 3 secadores de flujos de aire y grano concurrentes, IFC, con aplicación de la energía en forma intermitente. Las características generales de estos secadores demostraron ser muy buenas (Sección 4.8.7.). Debido a problemas de desuniformidad en la dosificación del flujo de granos en la descarga de los secadores, fueron sustituidos temporalmente por secadores convencionales de capa estática de tres niveles.

3.19.3.5. Lombricomposteo ³⁹

En la Central de Beneficio Ecológico de Café, se realizó un estudio (59) con el fin

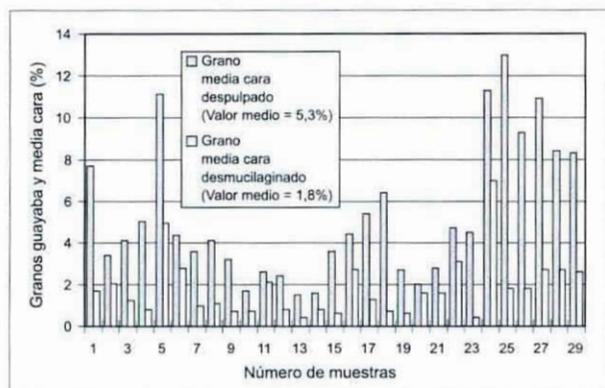
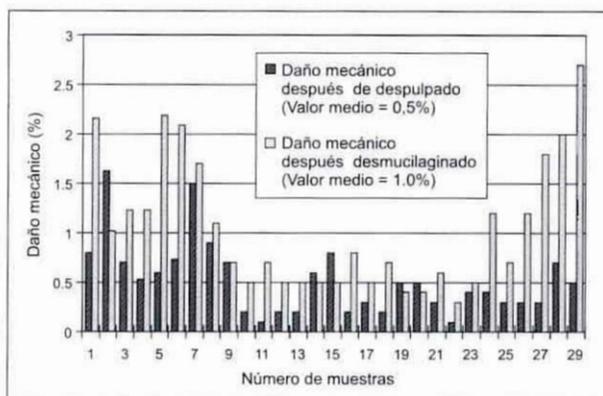


Figura 81. Influencia del desmucilaginado mecánico en la disminución de los granos guayayaba (G) y media cara (MC).

³⁹ Los resultados de ésta investigación permitieron preparar la Sección 6. sobre manejo general de la lombricultura, utilizando la mezcla del mucílago con pulpa.

Figura 82. Influencia del desmucilaginado mecánico en aumento del daño mecánico del café pergamino.



de comparar dos sistemas de lombricultura, para el manejo de la pulpa y el mucílago de café, con la participación de dos lombricultores comerciales, uno de los cuales (BIOAGRO) empleó un sistema en cajas plásticas abiertas por todos sus extremos, mientras que el otro lombricultor (MI JARDÍN) y Cenicafé utilizaron camas construidas en ladrillo y cemento (Figuras 122 a 126). Para ambos sistemas y los tres lombricultivos, se compararon ciclos de funcionamiento, incrementos en la biomasa de lombriz, rendimientos y caracterización en la conversión de pulpa en lombricompost y caracterización de éste. Se calculó el costo de producción de lombricompost en los dos sistemas.

Además, para el sistema en camas se evaluó el volumen de agua residual adecuado para regar periódicamente el lombricultivo. Según los resultados, evaluados a diciembre de 1996 (Tabla 44), se pudo manejar una cantidad de pulpa mezclada con

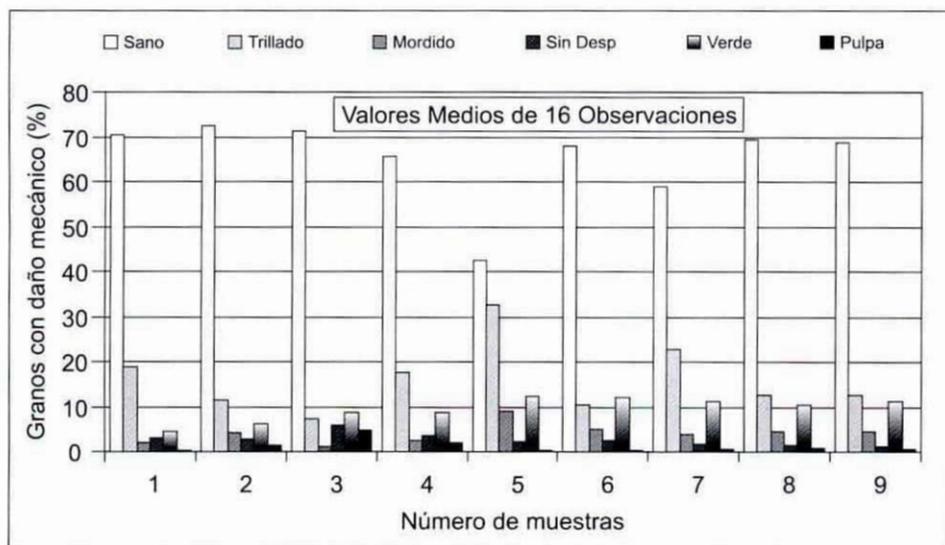


Figura 83. Análisis físico de los granos obtenidos del desmucilaginado de pasillas en la Central de Beneficio de Anserma.

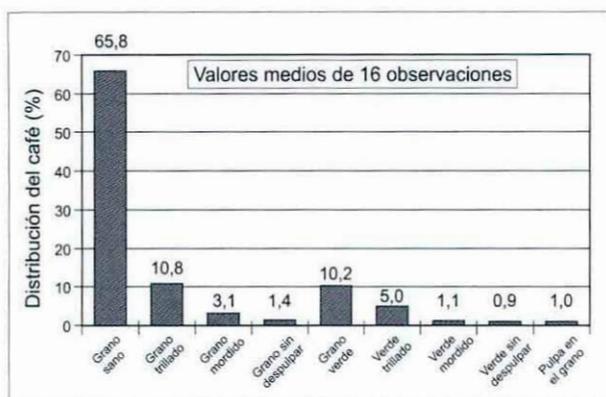


Figura 84. Recuperación de granos buenos en los flotes del café procesado en la Central de Beneficio de Anserma.

muclflago en camas de aproximadamente **1 tonelada por m² por año**. En el lombricultivo manejado por Cenicafé se obtuvieron incrementos en la biomasa de lombriz del 43% para ciclos de 4,5 meses y de 11,4 meses; mientras que para MI JARDÍN, se obtuvo un incremento del 106,7% para 6,1 meses y un decremento de 5,1% para 13,6 meses. La producción promedio de lombricompost húmedo (80% humedad) fue de 249 y 199kg/m², para ciclos de 6,1 y 13,6 meses respectivamente, para MI JARDÍN. Para Cenicafé, la producción fue de 239 y 190kg/m², para ciclos de 4,5 y 11,4 meses, respectivamente. El **rendimiento en la conversión** de pulpa en lombricompost fue del 55% en base seca (b.s.) y 38,2% (b.s.) respectivamente, para CENICAFE; mientras que para MI JARDÍN, se obtuvieron 45% y 32,6%, respectivamente. Utilizando riegos en los lombricultivos en camas de ladrillo se logró retener un volumen de agua residual de aproximadamente 1L/m²-día.

Los lombricompostos obtenidos en ambos sistemas presentaron propiedades fisicoquímicas muy similares. En el sistema de cajas plásticas se evaluaron 12 bloques con diferente número de cajas, con un ciclo promedio de producción de 4,17 meses (mínimo 3 y máximo 6). Se encontró un **incremento promedio en la biomasa** de lombrices del 107,7%, con una gran variabilidad entre bloques y cajas. Se obtuvieron producciones promedio de 8,91kg de lombricompost húmedo (74,5% de humedad por caja, equivalente a 12kg con el 80% de humedad), con un rendimiento promedio en la conversión de pulpa en lombricompost del 36,4%

Tabla 44. Tasas de producción de lombricompost obtenidas en la CBEA, 1996.

Sistema	Ciclo	Tiempo (mes)	Rendimiento	Producción (80% humedad)	
				(kg/m ²)	(kg/m ² -día)
Cenicafé	1	4,5	55	239	1,77
Mi Jardín	1	6,1	45	249	1,36
Cenicafé	2	11,4	38,2	190	0,56
Mi Jardín	2	13,6	32,6	199	0,49
			(mes)	(kg/caja)	
Bioagro		4,17	36,4	12	

base seca, (b.s.) con una gran variabilidad, debido probablemente a problemas por los bajos y heterogéneos valores de humedad de trabajo. Se concluye que, para una mejor eficiencia de los lombricultivos, es conveniente realizar entre dos y tres ciclos de producción al año. Según las actividades, se calcularon los costos (en 1996) de producción (mano de obra) de lombricompuesto en cada sistema. Para el sistema en camas es aproximadamente de \$30/kg de lombricompuesto (80% de humedad), mientras que para el sistema en cajas es de aproximadamente \$64/kg de lombricompuesto (74,5% de humedad), resultando en un 60% más costoso, producir el lombricompuesto en cajas, al compararlo con lombricompuestos donde prevalecieron las mismas condiciones de humedad.

3.19.3.6. Consumo de agua

El agua consumida en el proceso de desmucilaginado, lavado y limpieza es del orden de 1 litro por kilogramo de café pergamino seco y la mayor parte de ella queda en la pulpa almacenada en la fosa.

3.19.3.7. Retención de la contaminación

Con las modificaciones introducidas en el beneficio húmedo en 1995 se modificaron significativamente las condiciones de retención de contaminación por la pulpa. La retención de la contaminación se estima en 90%.

3.19.3.8. Consumo de energía eléctrica

Para procesar 46.548kg de café pergamino en 276 entregas de los caficultores, se necesitaron 0,1 kilovatio-hora por kg de cps, o sea 0,66% del valor del producto, lo que significa el uso muy eficiente de los motores de la CBEA.

3.19.3.9. Mano de obra

La Central operó, en promedio, durante los días de plena actividad con 9 obreros de la Cooperativa, (1 celador, 1 mecánico, 2 operadores de secadores, 1 lombricultor y 4 obreros). El número de horas extras semanales fue de 38 horas diurnas y de 126 horas nocturnas. El costo semanal de la nómina fué de aproximadamente US\$390 en 1996. El valor promedio por kg de café pergamino seco durante tres semanas fue de US\$26,2/ton cps.

El costo por energía eléctrica, combustible de secado y mano de obra directa es de \$91,8/kg cps, o sea el 6,1% del valor del café.

La Central cobra por el beneficio del café la suma de US\$128/ton cps. El valor de venta medio del café pergamino seco es de US\$1.500/ton de cps.

3.19.3.10. Objetivos planteados en la propuesta del proyecto de la CBEA (1992-1993)

Cuando se aprobó el proyecto de la CBEA en una plenaria de una reunión de 50 especialistas de beneficio del café en Colombia (151) se presentaron muchas posibles ventajas; si bien, la CBEA solo ha funcionado comercialmente en el último año a partir de septiembre de 1998, después de la gran experiencia lograda, si se puede asegurar que ninguna de las potenciales **ventajas** anotadas con anterioridad sea posible descartarla. Ellas son:

- Para los caficultores de Anserma, Caldas, la ventaja de beneficiar su café en su propiedad o en beneficiaderos comunales que utilizan tecnologías tradicionales.
- El pago adecuado por el café cereza que hace entrega a la Cooperativa, por la correcta y rápida determinación de la relación del café cereza/café pergamino seco.
- Permite a los agricultores, en la época de la cosecha, dedicar su tiempo a actividades agrícolas y la supervisión de la cosecha.
- Da mayor seguridad y tranquilidad al caficultor evitándole la necesidad de mantener el café en la finca durante el beneficio, secado y almacenamiento.
- Facilita al caficultor la venta de su producto.
- Garantiza una calidad uniforme del café procesado.
- Efectúa el proceso de beneficio del café cereza para producir café pergamino seco, tipo Federación, bajo las mejores condiciones técnicas conocidas, con el mínimo consumo de agua, mínima contaminación y con el mayor control.
- Elimina los equipos clasificadores de café pergamino con mucílago fermentado, los cuales consumen de altos volúmenes de agua. Son estos el canalón de correteo y el canal semisumergido.
- Disminuye el consumo de agua de 20, 30 o 40L/kg, que se utilizan generalizadamente en el país, hasta 3 o menos litros por kilogramo de café pergamino seco.
- Elimina la etapa de fermentación mediante la introducción del desmucilagador mecánico continuo, desarrollado en Cenicafé.
- Transporta la pulpa mezclada con el mucílago hacia las fosas o hacia los lugares de acopio, para posteriormente transformarla y aplicarla a la plantación, o a los almácigos como abono.
- Simplifica el conjunto de etapas del beneficio mediante la incorporación de la clasificación y el lavado del café pergamino, a los procesos de despulpado y desmucilagado.

- Elimina completamente la contaminación de las aguas, o en el caso menos favorable, se puede realizar un mejor control de la mínima contaminación ocurrida en la poca cantidad de agua que se utiliza en el proceso del lavado y que podría ser incorporada a la mezcla de la pulpa y del mucílago, en sus diferentes estados de transformación.
- Reducción de hasta el 64% del área construida de los beneficiaderos tradicionales, en donde se utilizan tanques de fermentación y diferentes dispositivos hidráulicos para transportar, lavar y clasificar el café.
- Mejor control de las operaciones de beneficio del café mediante controles electromecánicos sencillos, para asegurar mínimos costos de proceso y mayor control de calidad en éstos.
- Disminución de costos en las ampliaciones de los beneficiaderos y centrales, de forma que al duplicar o cuadruplicar su capacidad de proceso, la ampliación de infraestructura necesaria es tan sólo proporcional a los equipos procesadores y el área que ocupan, y no la correspondiente a otros equipos de uso general como los de recepción, expedición, transporte y clasificación.
- Mejor manejo y utilización de la pulpa al eliminar su lavado y al utilizar su capacidad de retención del mucílago concentrado.
- Mejor facilidad para el aprovechamiento y valorización de los subproductos del café, debido a la disponibilidad del mucílago concentrado y separado, y la no tradicional saturación de humedad de la pulpa.
- Reducción de los costos de operación (tiempos y movimientos) del proceso, las áreas de construcción y los costos de inversión por unidad de masa beneficiada.
- Disminución de los efectos dañinos de la broca mediante la separación y tratamiento adecuado de los granos brocados y de la pulpa separada de ellos.
- Aprovechamiento de la experiencia de la Central de Beneficio de Anserma, para presentar diseños mejorados en futuras Centrales de Beneficio en el país.

3.19.3.11. Central de Anserma como generadora de tecnología de beneficio

El equipo de investigación en postcosecha de Cenicafé, considera que el elemento que más contribuyó a la **generación de la tecnología** fue el gran esfuerzo que efectuó durante los años de 1992 a 1996, para tornar viable el proyecto de la Central de Anserma, en la forma como fue inicialmente concebido.

La idea inicial de construir en los laboratorios de Cenicafé un prototipo que pudiera tener posibilidades de éxito comerciales, se originó como respuesta inmediata a la solicitud del proyecto por parte de la Cooperativa de Anserma y del Comité de Cafeteros de Caldas. A los pocos meses y con ésta finalidad primaria se construyó el módulo DESMULAC, que fue modificado todas las veces necesarias, hasta de-

sarrollar finalmente el módulo BECOLSUB. La Figura 39 muestra el modelo inicial y la Figura 47 el final. En forma general, Cenicafé generó tecnología en sus laboratorios para que pudiera, en corto plazo, ser utilizada comercialmente en la CBEA.

Se efectuaron los diseños de ingeniería del proyecto y se construyeron en los propios talleres todos los elementos principales de la Central. Se pusieron en funcionamiento los equipos y se sustituyeron todos aquellos que no funcionaron dentro del planteamiento ideal inicial; finalmente, se efectuaron modificaciones e innovaciones para superar ampliamente los objetivos iniciales propuestos para CBEA.

La adopción masiva, nacional e internacional de la tecnología BECOLSUB⁴⁰, es un indicador claro del éxito del desarrollo; las empresas comerciales que mejor han entendido la filosofía de la tecnología y cumplido su contrato con FEDERACAFÉ para comercializar la patente correspondiente (Sección 3.21.) deberán duplicar cada vez en menos tiempo su producción, para atender los pedidos generados por el proceso continuo de adopción.

En particular, como resultado del gran esfuerzo efectuado en el proyecto de la CBEA, se originó una **tecnología de beneficio muy superior a la del proyecto inicial** (equipos DESLIM y BECOLSUB), en los siguientes aspectos:

- Menor consumo de agua.
- Eliminación sustancial de equipos.
- Disminución sustancial de espacios.
- Disminución de costos.
- Mayor control de la contaminación.
- Mayor eficiencia y eficacia en la producción del lombricultivo y la multiplicación de la lombriz.
- Desarrollo comercial de los secadores de torre, de gran capacidad.
- Mejores posibilidades de prestar el más adecuado servicio técnico, económico y social al caficultor.
- Viabilidad de utilizar esta tecnología, para obtener todas sus ventajas, en beneficiaderos existentes, sin incurrir en grandes modificaciones.
- Creación del concepto y desarrollo tecnológico del módulo BECOLSUB, (bene-

⁴⁰ El Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología «Francisco José de Caldas» – COLCIENCIAS, en el año de 1996 premió y catalogó como “Grupo de excelencia en Investigación” al Programa de PostCosecha de Cenicafé, por el desarrollo de la tecnología BECOLSUB y que El Banco de Occidente concedió en 1997 el Primer Premio Nacional de Ecología en la Categoría Empresarial, del **CONCURSO “PLANETA AZUL”** al Programa de PostCosecha de Cenicafé, por el desarrollo de la tecnología BECOLSUB.

ficiadero ecológico y manejador de subproductos), equipo compacto portátil que incluye exactamente (en forma simplificada) la tecnología desarrollada para la CBEA.

3.20. CURSO INTERNACIONAL SOBRE EL BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ.

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia quiso participar del desarrollo de la nueva tecnología BECOLSUB entre todos los países interesados en el tema y para esto, organizó un **Seminario Internacional sobre “Caficultura Sostenible, Beneficio Ecológico del Café, una opción rentable”**, que se realizó durante los días 16,17 y 18 de octubre de 1996, Figura 85. El curso se realizó en forma muy exitosa, con la participación de 25 técnicos extranjeros.

La instrucción la realizó el Programa de Postcosecha de Cenicafé en las instalaciones y laboratorios. Se complementó el programa en una finca comercial y en la CENTRAL DE BENEFICIO DE ANSERMA, Anserma, Caldas, donde operaba comercialmente la nueva tecnología. Se distribuyó un folleto con las características generales de la tecnología BECOLSUB.

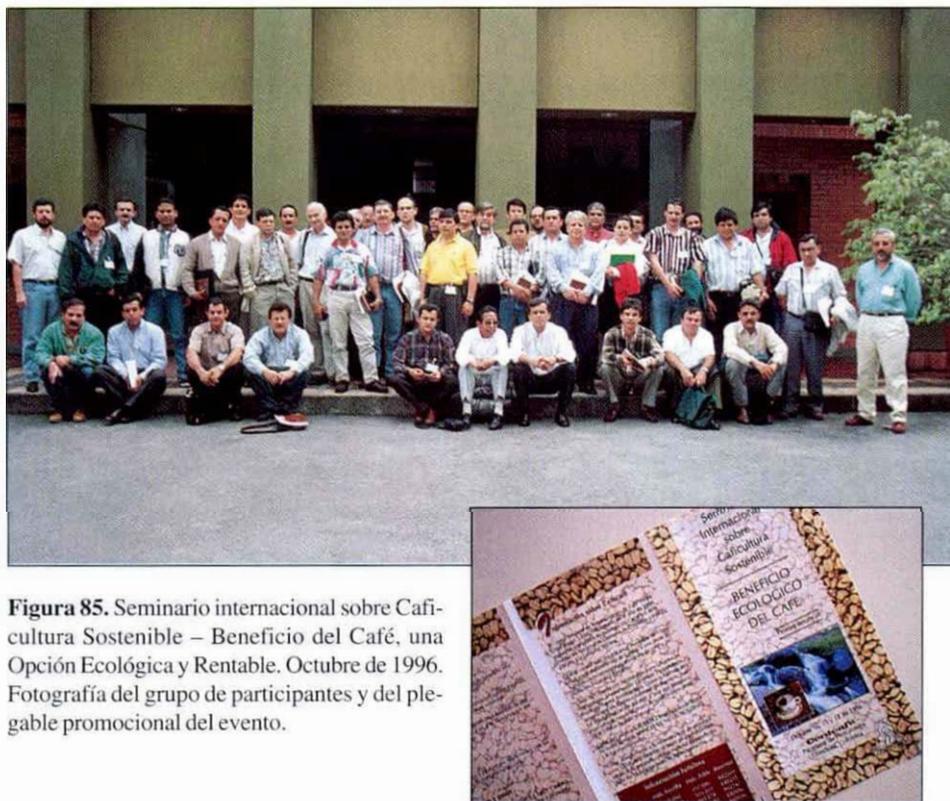


Figura 85. Seminario internacional sobre Caficultura Sostenible – Beneficio del Café, una Opción Ecológica y Rentable. Octubre de 1996. Fotografía del grupo de participantes y del plegable promocional del evento.

3.21. COMERCIALIZACIÓN DEL MODULO BECOLSUB.

El equipo DESLIM y el equipo y el proceso BECOLSUB fueron registrados para obtener la patente, por la Federación Nacional de Cafeteros en Colombia y se está ampliando la cobertura de la patente a varios países cafeteros (Registro de patente No. 95031744 (101) La licencia de utilización de la patente se ha cedido sin costo alguno, a 23 industriales activos (Apendice C) que han solicitado el derecho de construcción de los equipos mediante firma de contratos, en los cuales se comprometen, entre otras cláusulas, a producir los equipos para dar inicialmente ventajas a los agricultores colombianos. Los industriales convocados a éste programa fueron seleccionados por los Comités Departamentales de Cafeteros del país, teniendo en cuenta la reconocida idoneidad y el buen servicio de atención técnica a los caficultores. Los industriales han recibido el material técnico correspondiente que comprende 16 planos completos de ingeniería, con los detalles de todos los equipos, incluyendo una zaranda cilíndrica de clasificación opcional. La Federación de Cafeteros se ha comprometido y ha venido cumpliendo con el compromiso de darles asistencia técnica general, a través de Cenicafé. En septiembre de 1999 se hizo la segunda entrega de los planos actualizados incluyendo los del módulo 100, la más reciente creación.

CAPÍTULO 4

Secado del Café





SECADO DEL CAFÉ ⁴¹

4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CAFÉ

El contenido de humedad del café cereza es de aproximadamente 67%, en base húmeda; lo cual significa que la cantidad de agua en las cerezas del café es aproximadamente igual a las dos terceras partes de la masa total; la tercera parte restante la constituyen los sólidos. El contenido de humedad del café cereza expresado en base seca es de 200% (dos veces más agua que materia seca). El fruto del café es altamente perecedero y presenta una intensa actividad fisiológica inmediatamente después de la cosecha. Para evitar la disminución de su peso seco y lo que es mucho peor, la pérdida de su calidad, que comienza a ocurrir después del primer día, se debe secar ojalá inmediatamente, después de cosechado.

El proceso más adecuado para disminuir la humedad del café consiste primero en retirarle la pulpa y el mucílago por medios rápidos; así se obtiene el **café pergamiño húmedo** cuyo contenido de humedad es aproximadamente del 50% en base húmeda y el 100% en base seca. Con éste método (beneficio vía húmeda) se procesan los cafés suaves de mejor calidad en el mundo. Otro método (el de beneficio vía seca), consiste en iniciar directamente el proceso de secado a partir del café cereza; en éste, hay que retirar por medios térmicos aproximadamente el doble de la humedad (la relación de los dos contenidos de humedad expresadas en base seca) para obtener café almendra o café verde con 12% de humedad, en base húmeda.

La cantidad de agua que se retira en el secado del café pergamino es muy superior a la que se extrae en los cereales y leguminosas para obtener la misma cantidad de producto seco; por ejemplo, para secar maíz que se encuentra en el 20% de humedad y dejarlo en el 12%, hay que evaporar respectivamente 8,7 veces menos agua, en comparación con lo que ocurre en el proceso de evaporación para obtener café pergamino seco con el mismo valor del 12%.

En el caso del secado del café cereza la dificultad del proceso no sólo la constituye la mayor cantidad de agua por evaporar, sino que se trata de un producto de muy difícil manejo, que no es mecánicamente consistente y que pierde fácilmente la

⁴¹ Preparado por Roa, M. G. y Álvarez G. J., Ingeniería Agrícola. Cenicafé.

pulpa, principalmente, si no se inicia el secado inmediatamente. Otro inconveniente se presenta con la obstrucción del paso uniforme del aire de secado, requisito indispensable para la buena calidad del producto final.

Esto ha llevado a los países que utilizan el proceso de vía seca a efectuar un presecado en secadores especiales o en patios de cemento “terreiros”, o en silos “barcaças” (160) antes de llevarlos a los secadores mecánicos. En particular, en el secado al sol y si las condiciones atmosféricas no son ideales en los primeros dos días, se inicia el deterioro de la calidad del producto, observándose a menudo la proliferación de hongos en la superficie de las cerezas.

El **contenido de humedad** del café es un atributo de su calidad física. En Colombia las normas vigentes para la comercialización del café en pergamino (68) establecen que el contenido de humedad debe estar comprendido en el rango del 10 al 12% (b.h.) No es por azar que se recomienda este rango. En efecto, estos valores de humedad del grano corresponden, por las relaciones de equilibrio higroscópico o de equivalencias de presión de vapor en la superficie del grano y en el aire que lo rodea, a las condiciones ambientales medias de almacenamiento del café, como se puede apreciar en las curvas de humedad de equilibrio del café obtenidas en Cenicafé (173), (Figura 111).

La humedad es el factor individual de control más importante para la conservación adecuada de los granos. El valor del 12% de humedad corresponde al máximo valor bajo el cual se puede almacenar el café en condiciones ambientales, durante varios meses sin deterioro. Por encima de este valor las actividades fisiológicas de postcosecha como la respiración, se realizan con alta intensidad y para esto, el grano consume energía propia de su materia seca y se libera calor, lo cual se traduce en pérdida de peso, malas condiciones de almacenamiento y pérdida de la calidad del producto.

Adicionalmente, con valores de humedad del grano superiores al 12%, el aire intergranular adquiere niveles altos de **humedad relativa de equilibrio** por encima del 70%, por lo cual, la actividad de los microorganismos, especialmente hongos, mohos y bacterias se incrementa considerablemente contribuyendo al deterioro, a veces total, de la calidad del producto. Estos procesos de deterioro son más críticos en regiones de clima cálido.

4.2. DETERMINADOR DE HUMEDAD CENICAFÉ MH-2

Durante todos los tiempos y en todos los lugares se ha estudiado la eficiencia de distintos instrumentos para determinar la humedad y sus aplicaciones en el secado de los granos, profundamente (82).

A pesar de esto, los caficultores de casi todo el mundo se guían por métodos subjetivos para determinar el contenido de humedad de su producto, principalmen-

te cuando se está secando. Para ello se utiliza la observación del color de la almendra y de su dureza, ejerciendo presión con las uñas, los dientes o el filo de una navaja. Estos métodos normalmente generan resultados erróneos lo cual se concluye de los estudios de una encuesta efectuada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (37).

En efecto, de 623 muestras de café pergamino beneficiadas en igual número de fincas, el 25% tenían menos del 10% de humedad y el 13% tenían más del 12%, o sea que sumando los dos extremos de defecto y de exceso de humedad, el 38% de las muestras no poseían el contenido de humedad final adecuado, lo que trae perjuicios para todos; inicialmente para el caficultor que tiene problemas con la comercialización del grano y la pérdida de su calidad, pero principalmente para el país productor que ve deteriorada la calidad de uno de sus principales productos de exportación.

Se requiere de un determinador de humedad, que por su precisión y su precio pudiera ser utilizado en la finca cafetera, para poder conducir bien el proceso del secado, y además, como se verá en la sección 5.5.1. para hacer parte de una tecnología (CERPER) de estimación rápida del rendimiento del café cereza a café pergamino Tipo Federación.

En Cenicafé se desarrolló un medidor de humedad rústico, de bajo costo, con precisión de $\pm 1,0\%$ en base húmeda y de fácil operación. Fue denominado medidor de humedad CENICAFÉ MH-2 (118, 120) (Figuras 86, 87 y 119), cuyo principio de funcionamiento está basado en el método estándar de destilación de Brown-Duvel (82).

Consta de un recipiente para la mezcla café-aceite, un condensador compuesto por un tubo de cobre de 9,53mm de diámetro y de 25cm de longitud, doblado en forma de L invertida, y una resistencia eléctrica de 550W. Además, de un depósito de

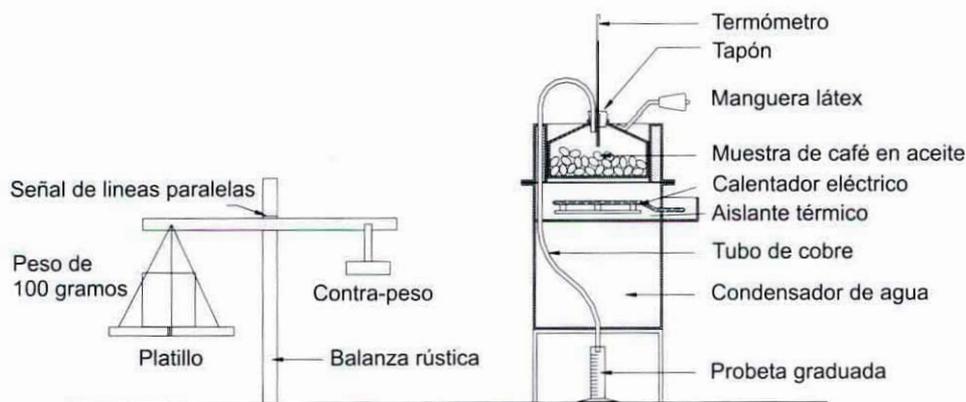


Figura 86. Esquema del determinador de Humedad CENICAFÉ MH-2.

agua con capacidad de 2,7L, un tapón de caucho para la boca del recipiente y una manguera de látex para conducir el vapor desde el recipiente hasta el condensador. Para reducir el calentamiento del agua del tanque condensador, se colocaron dos placas de asbesto-cemento de 15cm de diámetro y 3,5mm de espesor, entre la resistencia eléctrica y el condensador. Una balanza rústica de plato para pesar 100g de café, y un termómetro de mercurio de rango entre 0 y 250°C que mide la temperatura máxima a la que debe llegar la mezcla grano-agua y una probeta graduable de 25ml. En pruebas de laboratorio la precisión lograda con el determinador de humedad en el rango de 10% a 47% fue de 0,51% b.h., y se obtuvo un error estándar de $\pm 1,0\%$ b.h. Como resultado de su evaluación en el campo se le incorporó un dispositivo para proteger el termómetro.

El procedimiento para utilizar el medidor MH-2, consiste en pesar una muestra de 100g y colocarla en el recipiente con aceite vegetal, calentar la mezcla hasta que alcance el valor de 193°C, medidos con el termómetro de bulbo de mercurio convencional. El calor transferido del aceite a los granos permite evaporar toda el agua que se condensa y se mide en una probeta graduada. Es necesario dejar transcurrir un tiempo aproximado de 10 minutos, desde que se interrumpe la corriente eléctrica hasta que se termina el proceso de destilación del agua. Durante este lapso, la temperatura del termómetro baja aproximadamente hasta 150°C. El valor de la medida expresada en mililitros coincide (la densidad del destilado es de 1,0g/cm³) con el contenido de humedad expresado en porcentaje, en base húmeda.

En la evaluación respectiva (120) del medidor CENICAFÉ MH-2, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Permite determinar con facilidad, en la finca, la humedad del café pergamino sometido a secado, con una precisión de más ó menos 1% b.h., comparado con el método de la estufa y requiere veinte minutos para obtener la lectura.
- Puede usarse con precisión en todo el rango del contenido de humedad del café pergamino 10% a 55% b.h., lo que no es posible con los determinadores indirectos, que funcionan con base a las propiedades dieléctricas.
- Es ligeramente inferior en su precisión al medidor indirecto marca KAPPA, útil solo para contenidos bajos de humedad 10 a 28% b.h. de café en reposo (fuera del contacto con el aire de secado por lo menos durante 10 horas), pero su costo es aproximadamente 10 veces menor.
- La temperatura máxima a que llega la mezcla de aceite y café pergamino influye significativamente en la precisión del medidor CENICAFÉ, que se debe desconectar de la corriente eléctrica cuando la mezcla alcance 193°C.
- La mayor precisión del medidor de humedad CENICAFÉ MH-2, se obtuvo en el rango de 10 a 20% b.h., por tanto, se puede utilizar el equipo para controlar eficazmente el proceso de secado mecánico de café.

- Su utilización potencial en la finca es múltiple; en particular, es elemento básico para la conformación del método rápido (CERPER) de determinación de la relación café cereza a café pergamino. (Sección 5.5.1.).

4.3. EVALUACIÓN DE LOS MEDIDORES COMERCIALES DE HUMEDAD

La firma DIES Ltda. de Medellín construyó los determinadores de humedad MH-2 con base en los planos de Cenicafé. Se evaluaron 5 medidores MH-2 (Figura 87), en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma (CBEA) en 1995.

Se realizaron 66 ensayos con cinco repeticiones cada uno; se utilizaron muestras de café pergamino húmedo de 100g, obtenidas en balanza con precisión de 0,1g, con humedad comprendida entre 48 y 55% b.h. correspondiente al contenido inicial de humedad del café pergamino seco. Las muestras se colocaron en el recipiente del medidor y se mezclaron con aceite vegetal hasta que fueran cubiertas totalmente. Se conectaron los medidores a la red eléctrica y se observó la evolución de la temperatura de la mezcla hasta alcanzar el límite establecido de 193°C, momento en el cual se suspendió el flujo eléctrico. De cada una de las muestras sometidas a la determinación de humedad en el medidor se tomó otra muestra, a la cual se le determinó la humedad con el método estándar de la estufa a 105°C, durante 16 horas.

En la Tabla 45 se presentan los resultados obtenidos en los cinco medidores construidos por DIES Ltda., comparados con la estufa.

Al analizar los contenidos de humedad obtenidos de los medidores MH-2 evaluados se encontró que, en promedio, tenían 52,8% b.h., con un coeficiente de variación de 2,7% en un intervalo (52,3%-53,3%) confiable al 95%, mientras que con la estufa se obtenía un promedio de 52,5% en un intervalo de (52,2%-52,9%) y un coeficiente de variación de 3,2%.



Figura 87. Banco de ocho determinadores de humedad CENICAFÉ MH-2 para control del café recibido y secado en la CBEA. (Sección 3.19.).

Tabla 45. Contenidos de humedad de muestras de café pergamino húmedo obtenidos en la estufa y en cinco determinadores de humedad MH-2. Se incluyen los límites de confianza para el promedio al 5%.

Medidores	Promedio %	Limite inferior %	Limite Superior %
MH2-1	52,44	51,92	52,97
MH2-2	52,36	51,97	52,72
MH2-3	53,17	52,58	53,75
MH2-4	53,08	52,44	53,72
MH2-4	53,16	52,59	53,73
Promedio	52,84	52,30	53,40
Estufa	52,55	52,18	52,93

De los resultados de la Tabla 45 se concluyó que los promedios obtenidos con los dos métodos fueron estadísticamente iguales; todos los medidores evaluados se enmarcan en el rango de **precisión** de más o menos 1% b.h.

Para las correlaciones entre los medidores MH2-3, MH2-4 y MH2-5 y la estufa, el coeficiente de determinación r^2 , es superior a 0,99, significativo al nivel del 1%, lo cual muestra la estrecha relación en sus lecturas de contenido de humedad. Se recomienda por tanto la utilización de los medidores en el control del secado y para la determinación de la materia seca del grano cuando se aplica el método CERPER (Sección 5.5.1.).

El estudio permitió concluir que:

- El determinador de humedad CENICAFÉ MH-2 puede utilizarse en un amplio rango de contenidos de humedad del grano de café (10- 55% b.h.).
- Permite hallar el rendimiento del café en forma precisa, aún bajo condiciones de grano brocado.
- Determina el contenido de humedad del grano de café en cualquier tipo de explotación pequeña, mediana, grande y en centrales de beneficio.
- El equipo es adecuado para ser utilizado por el caficultor.

4.4. DETERMINADORES Y MEDIDORES INDIRECTOS DE HUMEDAD

Los métodos indirectos para determinar el contenido de humedad del café, como su nombre lo indica, miden una propiedad del grano que varía con su contenido de humedad. Las propiedades más estudiadas, que han permitido desarrollar medidores de humedad de amplia utilización, son la conductividad eléctrica y la capacidad dieléctrica.

En Colombia se utilizan los medidores del tipo capacitivo, que estiman la humedad con base en las propiedades dieléctricas de los granos, para el recibo del café en

pergamino en los puestos de compra establecidos por ALMACAFE. Posada, citado por Oliveros *et al.* (120), al comparar las lecturas de humedad obtenidas con los medidores de éste tipo marca KAPPA y Dole con el método de estufa propuesto por la ISO para café trillado, que había estado almacenado, concluyó que los medidores KAPPA muestran buena precisión en las lecturas en el rango de 8 a 18% b.h. El medidor Dole posee baja sensibilidad para humedades inferiores al 10% b.h.

Por mucho tiempo se ha buscado una solución práctica para la medición utilizando métodos indirectos basados en propiedades del producto, los cuales permitan la medición de la humedad en pocos segundos y que no destruyan la muestra, cuando se está secando el café, y así poder finalizar correctamente esta importante etapa del proceso de beneficio.

El determinador de humedad electrónico indirecto es el instrumento de medición más popular en Colombia, y es usado para medir la humedad de café seco y reposado, pero es de reconocida inhabilidad para determinar correctamente la humedad del café pergamino cuando se está secando o para contenidos de humedades superiores al 30%, b.h. En efecto, los determinadores de humedad que basan su principio de determinación en las propiedades dieléctricas del café fallan por defecto, al medir principalmente la **humedad de la superficie** de los granos. Éstos, miden principalmente la humedad cercana a la superficie de los granos que presenta valores más bajos que el promedio, según el principio de difusión de humedad del café dentro del grano (Sección 4.5.) que controla el proceso del secado (28, 82). Tampoco ha sido posible desarrollar determinadores de humedad indirectos que den resultados correctos cuando el contenido de humedad es superior al 30% en base húmeda. Recientemente otro determinador que utiliza este mismo principio físico, propuesto por la industria IEC, propuso diseños más avanzados, para corregir las dificultades anotadas en las mediciones.

Se programaron experimentos para comparar las medidas de estos dos determinadores de humedad y se compararon con los valores obtenidos con la estufa a 105°C, durante 16 horas⁴².

Se analizaron 20 muestras de café proveniente de silos-secadores comerciales y los resultados se presentan en la Figura 88, que muestra como el determinador IEC presentó los mismo defectos que el KAPPA al subestimar significativamente el valor real del contenido de humedad determinado por la estufa, en todo el rango de humedad estudiado.

Es importante reconocer el gran valor del determinador de humedad CENICAFÉ MH-2, evaluado exhaustivamente para altos y bajos valores de humedad, con muestras de café obtenidas directamente durante el proceso de secado, para secadores solares, mecánicos de capa fija y mecánicos de grano en continuo movimiento.

⁴² Roa M., G. Comunicación personal. 1995.

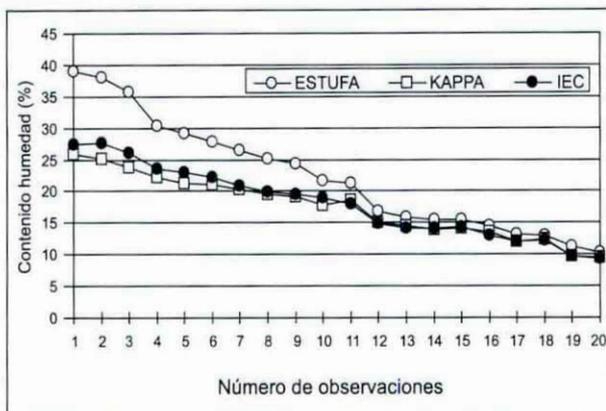


Figura 88. Comparación de dos medidores indirectos de humedad con relación al método estándar de la estufa.

4.5. DIFUSIÓN DE HUMEDAD DENTRO DEL GRANO DE CAFÉ.

Durante el proceso de secado mecánico del café pergamino, todos los granos ceden la mayor parte de la humedad al aire caliente que es forzado a pasar entre ellos; inicialmente la humedad de la superficie del grano se transfiere fácilmente al aire y en la medida que transcurre el proceso de secado se inicia una migración de agua de la parte interna del grano a la más externa, para sustituir la humedad perdida en la superficie. Este fenómeno de movimiento de la humedad dentro del grano se denomina **difusión** (28, 107). Clásicamente se distinguen dos períodos de secado: el inicial, donde la resistencia a la pérdida de humedad se da en la superficie, y el final, cuando la resistencia se ofrece dentro del grano. En la primera fase el coeficiente de transferencia de masa por convección determina las tasas de secado; en la segunda fase, que es la más prolongada para el caso del café, el coeficiente de difusión de humedad del grano del café (107), o la resistencia al paso del agua en el interior del grano, es el determinante.

Como resultado de la difusión los contenidos de humedad dentro de cada grano durante el secado son diferentes, mucho más altos en el interior y menores en la superficie. A medida que disminuye la humedad del grano la difusión del agua tiende a ser más lenta y la forma de aumentarla es incrementando su temperatura. El aumento de la temperatura origina una mayor presión de vapor del agua (que es la variable que junto con el coeficiente de difusión del grano determina directamente las tasas de pérdida de agua de los granos.

El aumento de la temperatura de los granos, a medida que progresa el secado, ocurre naturalmente porque cuando hay menos humedad, tienden a presentarse menores tasas de secado y menos enfriamiento por evaporación.

En la Sección 4. 9.1.3., se presentan, con algún detalle, las ecuaciones reales de difusión y las ecuaciones aproximadas empleadas en la simulación matemática.

4.6. SECADO SOLAR

4.6.1. El Secador Solar Rotatorio

El secado solar se practica desde el mismo momento en que se inició la producción de café y todavía se utiliza básicamente el mismo procedimiento; no se espera que el método tradicional de secado del café varíe substancialmente en el futuro, porque el aprovechamiento de la energía disponible (la radiación solar incidente y la energía propia del aire) es muy aceptable y los costos de los equipos utilizados son razonablemente bajos, principalmente para los pequeños productores.

Los intercambios de energía y de humedad toman lugar en la superficie de los granos; aquellos localizados en la parte inferior, en contacto con la superficie, prácticamente permanecen en el mismo estado de humedad porque no reciben la energía térmica necesaria para la evaporación del agua. Por tanto, es necesario revolver la masa; se recomienda hacer tres o cuatro movimientos del café por día. Tradicionalmente se utiliza un rastrillo de madera (Figura 93) sencillo para efectuar dicha operación.

Los granos que se someten al secado solar en la parte superior de la capa no llegan a estar en equilibrio higroscópico con el aire que lo rodea porque reciben una energía extra del sol, que origina su calentamiento y el aumento de la presión de vapor de agua en su superficie.

Los fenómenos de transferencia de energía y de humedad en el secado solar son muy complejos; son numerosas las variables que influyen en el proceso: la radiación solar, que varía ampliamente durante el día y de día a día; la temperatura, la humedad y la velocidad del aire que también varían; el contenido de humedad del grano que va disminuyendo (pero que puede aumentar en la noche) gradualmente; el tipo de piso sobre el cual descansa el grano; el espesor de la capa de grano; el procedimiento y la periodicidad utilizada para revolver los granos.

Como consecuencia, el tiempo total de secado sufre grandes variaciones, de dos o tres días hasta uno o dos meses.

En términos generales, para la zona cafetera colombiana se considera necesario que para un agricultor que produzca 3,75ton (300@) de café seco al año, se debe disponer de por lo menos 100 metros cuadrados para secar su café al sol. Este valor corresponde a 27 metros cuadrados por tonelada de café pergamino seco, o a 1,5 metros cuadrados de área de secado solar por cada 62,5kg (5@) de café pergamino seco.

Se comparó un nuevo tipo de secador solar rotatorio para el café, propuesto por Cenicafé (12, 77), con sistemas convencionales y no convencionales de secado solar (carros secadores convencionales con diferentes tipos de superficies, marquesinas convencionales y no convencionales, y el patio secador convencional).

El nuevo **secador solar rotatorio** (Figura 89) consta de una bandeja rotatoria que permite recibir la energía radiante en forma perpendicular, mediante su rotación (siguiendo la trayectoria del sol) alrededor de su eje y su fijación manual temporal. Permite también aprovechar más eficientemente la energía de las corrientes del aire que encuentran las capas de café mejor dispuestas para atravesarlas, entregando su energía (entalpía) y llevando consigo la humedad desprendida de los granos. Estos dos fenómenos físicos explican la mayor eficiencia y menor tiempo de secado de todos los equipos experimentados.

Para las mismas cantidades de café (3,8cm de capa), el secador rotatorio de 1,2m² de superficie secó 25kg (2@) de cps en **tiempos inferiores**, aproximadamente en dos días y medio menos con relación al secado en los carros secadores, con piso de madera (Figura 90).

Otras ventajas adicionales del secador rotatorio son: la limpieza de la operación y la protección del café (con una lámina de plástico) en caso de lluvia. Su costo es comparable al de las paseras pero más costoso (aproximadamente el doble) que los pisos de concreto.

El costo, la limitación de la cantidad de café, 25kg (2@) por pasera y las dificultades del manejo del café, hicieron que esta propuesta de mayor eficiencia y de mejores características técnicas no fuera hasta el momento, adoptada por los caficultores.

4.6.2. El Secador Solar Parabólico (146)

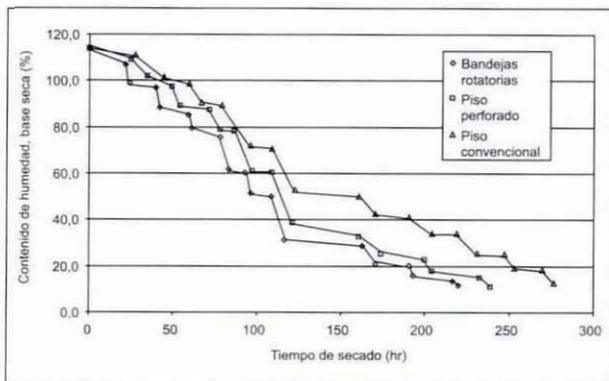
La marquesina de estructura parabólica para el secado de café pergamino y el lombricompuesto (Figuras 91y 126) (Sección 6.4.1.⁴³), es construida con materia-



Figura 89. Secador solar rotatorio para café.

⁴³ La diferencia que puede existir entre los secadores parabólicos para el café y el lombricultivo es el tipo de suelo. Para el café se recomienda un piso de concreto. Para el lombricultivo puede ser el mismo piso de tierra, por consideraciones netamente económicas.

Figura 90. Comparación del secado solar con capas de café colocadas 1) en el secador de bandejas rotatorias, 2) sobre una superficie horizontal perforada y 3) sobre un piso de madera, utilizado en los carros secadores tradicionales (77).



les típicos de disponibilidad en la finca, y su estructura mejorada en Cenicafé se ha constituido en la **mejor alternativa** ofrecida por Cenicafé a los pequeños agricultores (146).

Esta es una forma muy práctica (alta eficacia física, bajos costos y fácil manejo del proceso) para utilizar la radiación y la energía del aire en el secado del café. Consiste de un techo plástico transparente y una estructura rústica en guadua de forma parabólica, que permite aprovechar mejor la radiación difusa, durante los días poco soleados o lluviosos y la radiación directa durante las horas de sol. También acumula energía en forma de calor por el calentamiento de la losa de concreto, lo cual es muy importante en las últimas etapas del secado cuando se requiere de mayor temperatura del grano para acelerar la difusión de la humedad en el interior del grano.

El desempeño del secador parabólico se comparó con el del secador de carros tradicional, mediante la realización de sucesivas pruebas de secado en las cuales se midió el tiempo de secado, el contenido de humedad y la uniformidad del contenido final de la humedad del grano.

En la Figura 92 se observa la curva de secado promedio de 6 pruebas obtenidas de



Figura 91. Secador Solar con estructura de marquesina de plástico en forma parabólica.

la evaluación, considerando la variable tiempo de secado (días). En las pruebas realizadas se encontró que el tiempo de secado en el parabólico es menor en cuatro (4) días respecto al carro, siendo más eficiente en un 23,5%.

4.7. RASTRILLOS REVOLVEDORES DE CAFÉ

Los caficultores utilizan tradicionalmente rastrillos contruidos en madera o en lámina de hierro para la remoción del café en los patios de secado. El peso de los materiales de construcción de los rastrillos conlleva la utilización de mangos cortos y normalmente el operario pisa el café para revolverlo, dando como resultado granos pelados, resquebrajados y contaminados con materiales extraños. La presión y fricción del rastrillo sobre el grano puede originar además aplastamientos, defectos que comprometen la calidad física del café.

Cenicafé diseñó un nuevo rastrillo revolvedor (181) (Figura 93) cuyo material de construcción es una lámina de PVC proveniente de un tubo de 152,4 (6") de diámetro y 5mm de espesor, el cual es sometido a una temperatura de 150°C durante cinco minutos para volverlo maleable y darle la forma adecuada.

El rastrillo se diseñó con ocho dientes de 40mm de ancho, con un giro 105°. El rastrillo se fija a una Te de PVC de presión de 38,1mm (1-1/2") y por medio de una reducción de 38,1mm (1-1/2") a 12,7mm (1/2") se acopla a un mango (cabo) de madera de 3m de longitud.

Para evaluar el desempeño del rastrillo revolvedor CENICAFÉ se efectuaron cinco pruebas en las cuales se comparó con el rastrillo tradicional construido en madera en forma de una tabla lisa (Figura 93). En dos carros secadores se colocó la misma cantidad de café pergamino lavado, 120kg/carro, con una capa de 35mm de espesor y se sometieron al proceso de secado. La masa de café se revolió tres veces al día con cada uno de los rastrillos.

Para determinar la **efectividad y uniformidad de volteo** de ambos rastrillos evaluados, se pintó la capa inferior de café de uno de los carros lográndose diferenciar

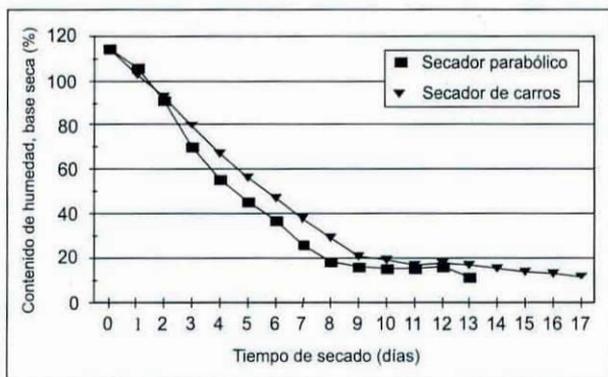


Figura 92. Comparación del secador de capas de café dispuestas en los carros tradicionales y en el secador solar parabólico

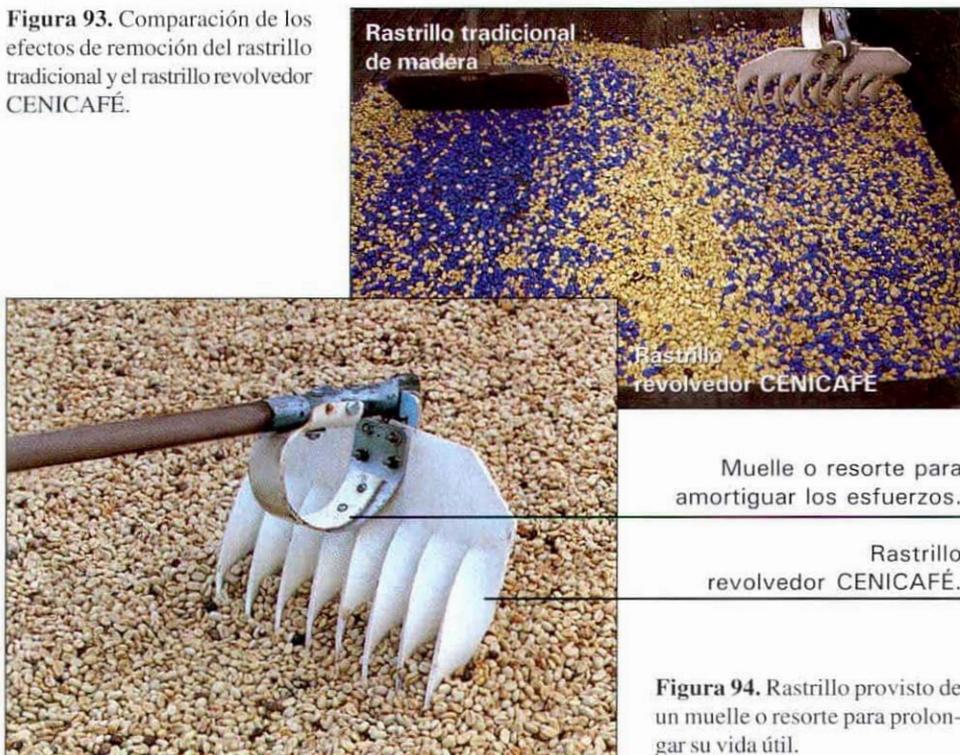
visualmente la mezcla de los granos (Figura 93). Los resultados muestran que con el rastrillo CENICAFÉ, se logra secar el café hasta un contenido de humedad final del 12% b.h., en setenta y dos horas menos que cuando se utilizó el rastrillo tradicional; el tiempo de secado se redujo en un 25%; además, el rastrillo CENICAFÉ originó 46,2% menos de daño mecánico (Tabla 46), debido a que el diseño de los dientes del rastrillo CENICAFÉ permite mover más uniformemente el café y realizar su labor desde fuera del secador, sin comprometer la calidad física.

Las siguientes son recomendaciones que permiten hacer más eficiente el empleo del rastrillo:

- Aplicarlo sobre toda la masa de café en forma uniforme, sin dejar ni crear espacios para que se seque el piso del secador.
- Realizar la operación de revolver el café, por lo menos tres veces al día.
- Ejecutar la operación cada vez, sobre la masa total en una dirección y luego en sentido perpendicular a la anterior.
- Revolver con el rastrillo desde fuera del secador, sin pisar el café.

Para evitar que los dientes se rompan por fatiga, se diseñó (11) un mecanismo de resorte para que absorbiera los esfuerzos que originaban la rotura de los dientes (Figura 94).

Figura 93. Comparación de los efectos de remoción del rastrillo tradicional y el rastrillo revolver CENICAFÉ.



Muelle o resorte para amortiguar los esfuerzos.

Rastrillo revolver CENICAFÉ.

Figura 94. Rastrillo provisto de un muelle o resorte para prolongar su vida útil.

Tabla 46. Comparación del daño mecánico producido por la utilización del rastrillo tradicional y el rastrillo revoledor, de dientes, CENICAFÉ.

Prueba	Porcentaje de daño mecánico	
	Rastrillo tradicional	Rastrillo CENICAFÉ
1	2,43	1,25
2	0,40	0,30
3	0,48	0,12
4	0,55	0,24
5	0,46	0,10
Promedio	0,864	0,402

4.8. SECADO MECÁNICO DEL CAFÉ

El secado del café en Colombia con aprovechamiento de las energías del sol y del aire es viable para flujos de cosecha pequeños, generalmente en fincas con producción anual de menos de 12,5ton (1.000@) de cps al año.

La cosecha generalmente coincide con la época de lluvias, por lo cual, el secado bajo esta técnica es lento, a veces casi nulo. Se requiere para producciones anuales superiores a las antes mencionadas, de una elevada inversión en áreas de secado, equipos y en mano de obra para practicar el secado solar, bajo la amenaza de pérdidas de calidad por lentitud en el proceso.

En el secado mecánico se aprovechan ventajosamente las **propiedades físicas** del café. En efecto, el espacio intergranular es uniforme y amplio (los volúmenes corresponden aproximadamente al 45% del volumen total), lo que permite el paso del aire en forma uniforme y evita los excesos de requerimientos de potencia mecánica. Una gran área de la superficie de los granos, aproximadamente 780 metros cuadrados por metro cúbico de café pergamino, permite el intercambio muy eficiente de energía térmica y de humedad.

Una aproximación para la selección del sistema de secado y las especificaciones del ventilador en el secado mecánico se presentan en la Tabla 47.

4.8.1. Caudal de aire

El paso del **caudal específico** adecuado a través de la masa del café que se desea secar es muy importante para el éxito de la operación de secado. La correcta selección e instalación del ventilador (Figura 95) es el factor más importante para el éxito de la operación.

La cantidad de aire que circula por el espacio intergranular es responsable de entregar la energía para producir la evaporación y retirar el vapor de agua resultante.

Si el aire es insuficiente, se incrementa el tiempo de secado y los granos presentan

Tabla 47. Selección del sistema y especificaciones de secado según la producción de la finca

Secado Solar y Mecánico				
Capacidad ton (@) cps/año	Sistema ton (@) cps/año	Caudal m ³ /min	Presión cm H ₂ O	Potencia hp
Hasta 2,5 (200)	SS* paseras			
de 6,25 (500) a 12,5 (1000)	SS* carros			
de 12,5 (1000) a 25 (2000)	SM** 1 ton (80@)	80	6,2	2,0
de 25 (2000) a 37,5 (3000)	SM** 1,5 ton (120@)	120	6,2	3,0
de 37,5 (3000) a 62,5 (5000)	SM** 2 ton (160@)	160	6,2	5,0

* SS = Secado Solar; **SM = Secador Mecánico.

altas desuniformidades en el contenido final de humedad, presentándose granos sobresecos, con menos del 10% y granos flojos, con humedades superiores al 14%. De otro lado, si el caudal es mayor de lo necesario, se estará costearo innecesariamente una potencia en el ventilador y mayores consumos de energía térmica para el calentamiento del aire, lo que incidirá negativamente en el costo del secado.

Es muy importante operar los secadores de café con el correcto valor de los **caudales de aire**; los resultados de investigación de Cenicafé (41) (Tabla 48) indican que para el secado de café pergamino en capa estática el valor recomendado es el de 25 metros cúbicos por minuto, por cada metro cúbico que ocupe el grano; valor equivalente al de un caudal de 66m³/min/ton de café pergamino seco o de 20m³/(min/m²), cuando la capa total de los granos es de 0,8 m (incluyendo una cámara de presecado) o de 10m³/(min/m²) de secador, cuando la capa de grano es de 0,4m. En la Tabla 48 se indica el caudal mínimo recomendado y las equivalencias, en varias unidades.



Figura 95. Ventilador centrífugo forzando aire a un silo-secador CENICAFÉ. Obsérvese la correcta transición entre la salida del ventilador y la entrada al secador (el generador de aire caliente ha sido retirado).

Tabla 48. Caudales recomendados para el secado del café pergamino en capas estáticas.

Caudal*	Unidades equivalentes de caudales específicos
25	m ³ /(min-m ³)
66	m ³ /(min-ton cps)
20	m ³ /(min-m ²) para h = 0,8m
10	m ³ /(min-m ²) para h = 0,4m

(*) Es preferible utilizar las primeras dos recomendaciones de caudales específicos (por unidad de volumen ocupado por el grano o por tonelada de café pergamino seco) porque estos valores siempre son constantes, para cualquier masa de café depositada en el silo-secador.

4.8.2. Paso del aire a través del café

El paso del aire por la masa de granos en cualquier tipo de secador es posible gracias a la energía mecánica suministrada por el ventilador; la resistencia ofrecida por unidad de longitud en la dirección del flujo del aire es proporcional al caudal por unidad de área y se manifiesta por una pérdida de presión estática. Para correlacionar estas variables se obtuvieron datos experimentales y resultaron tres ecuaciones, una para cada contenido de humedad (119). La relación planteada en la ecuación < 6 > (155) permite sustituir las tres ecuaciones en una sola, en función de la humedad del grano, con muy buena precisión. Los resultados de la ecuación < 6 > permiten estimar el caudal específico como función de la pérdida de presión específica para café pergamino y se muestra en la Figura 96. Esta expresión es muy útil para estimar el caudal real en los secadores, midiendo la pérdida de presión estática, mediante un manómetro construido con un tubo en U, transparente, con agua.

$$\frac{Q}{A} = (9,523 - 0,0476 M) \left| \frac{\Delta P}{\Delta L} \right|^{0,676} \quad < 6 >$$

despejando para $\Delta P / \Delta L$:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \left| \frac{\frac{Q}{A}}{9,523 - 0,0476 M} \right|^{1,4793} \quad < 7 >$$

En donde:

- Q = Caudal de aire, (m³/min).
- A = Área transversal al flujo del aire, (m²).
- M = Contenido de humedad del café, (%).
- ΔP = Caída de presión en secciones distantes en L, (centímetros de agua).
- ΔL = Distancia entre mediciones de la pérdida de presión P, (m).

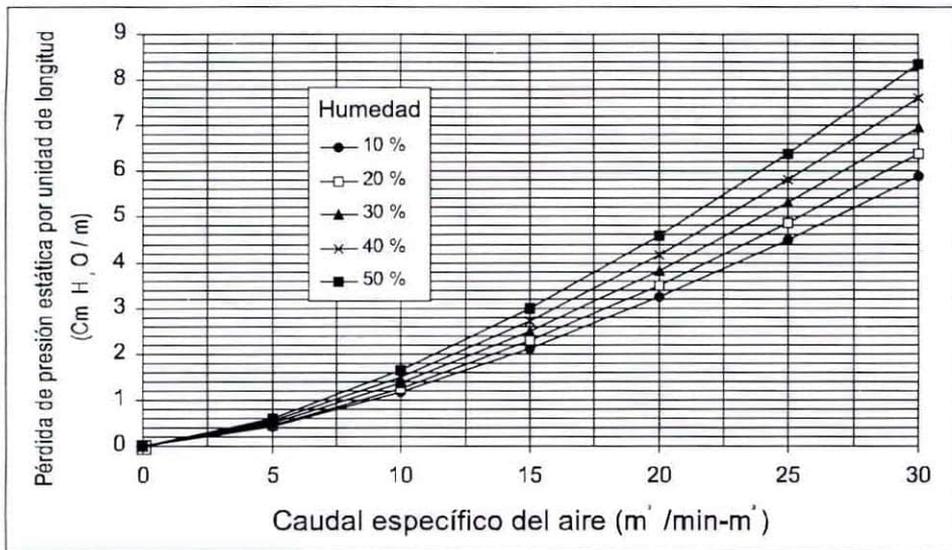


Figura 96. Relaciones de caudales y presiones estáticas por el paso del aire a través de capas de granos de café pergamino.

4.8.3. Ventiladores

Los ventiladores (Figura 95) tienen la misión de forzar cantidades adecuadas de aire por entre la masa de granos.

El **cálculo y selección del ventilador** adecuado es una tarea para especialistas que deben conocer los requerimientos de los caudales mínimos de secado del café pergamino y el cálculo de las pérdidas de presiones estáticas y dinámicas que el aire sufre al pasar por las capas del café y por cada uno de los elementos constituyentes del circuito neumático (ductos, transiciones, expansiones abruptas, curvas, compuertas, válvulas, etc.). El ventilador se selecciona calculando el caudal que debe entregar contra la suma de todas las presiones parciales de que consta el sistema (28, 82).

Otros factores importantes en la selección del ventilador son el tipo (centrífugo, axial), la eficiencia mecánica deseada, el nivel de ruido aceptable, la estabilidad mecánica, el balanceo estático y dinámico, la calidad de los materiales, la calidad de los rodamientos, el sistema de conexión entre el motor y el eje del ventilador, la posición del ventilador, etc.

La potencia total para mover el ventilador, considerando además su eficiencia se calcula en la forma siguiente:

$$\text{Pot} = \frac{Q \cdot P}{458 \cdot \eta} \quad < 8 >$$

En donde:

Pot = Potencia, (hp).

Q = Caudal, (metros cúbicos por minuto).

P = Presión estática total, (cm de agua).

458 = Factor de conversión.

η = Eficiencia mecánica del ventilador, (decimal).

4.8.4. Generadores de aire caliente. Intercambiadores de calor

Para calentar el aire se pueden utilizar diferentes dispositivos que permiten convertir la energía química almacenada en los combustibles en energía térmica. Los combustibles más utilizados son: ACPM, coque, carbón mineral, cisco o pergamino del café (Sección 4.8.7.) y algunos productos resultantes de la refinación del petróleo.

Los dispositivos empleados para la conversión de energía deben permitir el calentamiento del aire sin que los productos resultantes de la combustión entren en contacto con él mismo (generadores de aire caliente de tipo indirecto).

La correcta operación y mantenimiento de uno de los equipos más utilizados para quemar ACPM por los agricultores, es presentada por Álvarez y Mejía (13). Los diseños adecuados de generadores de aire caliente deben disponer de características adecuadas para el mayor aprovechamiento de la energía térmica (buena eficiencia), tanto para combustibles líquidos como sólidos. Estas características incluyen la siguientes:

- Area adecuada para el intercambio del calor entre cámara de combustión y las superficies que calientan el aire, que normalmente se aumentan por medio de aletas.
- Adecuada geometría del intercambiador para garantizar un correcto coeficiente de transferencia de calor por convección.
- Flujos de gases de combustión y del aire con direcciones opuestas.

El ACPM presenta ventajas sobre el COQUE por la autonomía, por su mayor disponibilidad, por el mejor control de la temperatura de secado y por la mayor posibilidad de reducir los riesgos de contaminación del grano.

El COQUE, de menor costo que el ACPM, generalmente se quema en dispositivos de combustión directa, que permiten que los gases de combustión entren en contacto con los granos, con lo cual se afecta la calidad del café. Ambos requieren de una alimentación frecuente (normalmente inferior a 2 horas) y no es posible, en la práctica, mantener la temperatura con poca variación alrededor de 50°C, originando problemas con la calidad del café, principalmente por el cristalizado y sobresecado del grano.

La utilización del carbón mineral, o hulla, para la generación de aire caliente en el secado de café es popular. Se dispone de quemadores automáticos producidos por la industria nacional que garantizan un buen desempeño energético, con eficiencias superiores al 50%. La autonomía de alimentación del combustible y la durabilidad de las partes de los equipos, para producir un aire completamente limpio, también han sido refinadas.

Colombia produce en forma general, carbón de buena calidad, en muy buena cantidad y buena distribución por las principales zonas cafeteras. Si bien, la inversión inicial en el quemador-intercambiador de calor es más alto que cualquiera de las otras opciones, el costo del combustible es substancialmente menor.

Recientemente, en la introducción masiva del **gas** en Colombia, se han desarrollado diferentes opciones de utilizar esta fuente energética en el secado del café. El gas tendrá un espacio muy amplio por sus excelentes características de manejo, control y costo.

En la selección del tipo de combustible a utilizar se deben tener en cuenta los criterios antes mencionados y los incrementos en los costos de beneficio por el exceso de la mano de obra que se requiera para alimentar y supervisar algunos quemadores, la cual es de alto valor en horario nocturno.

Para calcular el consumo horario de combustible se debe tener presente: el flujo de aire, las temperaturas máxima de aire de secado y la mínima ambiental, la eficiencia de conversión de energía química a energía térmica. Este último factor depende del tipo de intercambiador utilizado. Desde un punto de vista práctico se puede considerar, para el caso de intercambiadores utilizados con quemadores de combustibles líquidos, lo siguiente:

- Un intercambiador con superficie aletada permite obtener fácilmente un 50% de eficiencia.
- Con los intercambiadores sin aletas rara vez se obtienen eficiencias superiores al 40%.
- Para la quema de coque, en general, los caficultores utilizan equipos que tienen eficiencia baja, máxima de 30%.

Para calcular el consumo horario de combustibles se recurre al siguiente balance de energía:

$$\text{ENERGÍA GENERADA POR EL COMBUSTIBLE} = \text{ENERGÍA GANADA POR EL AIRE} + \text{LAS PÉRDIDAS}$$

< 9 >

Las pérdidas están constituidas por las energías transferidas al ambiente por convección y principalmente, por la energía que llevan los gases de combustión y que salen por la chimenea.

A partir de este balance, y para simplificar los cálculos, se puede calcular el consumo horario con la ecuación < 10 > que permite calcular la cantidad de energía calorífica necesaria para aumentar la temperatura del aire que fluye con un caudal Q.

$$q = \frac{Q\Delta T60}{\eta c} \quad < 10 >$$

En donde:

Q = Caudal de aire (m³/min).

q = Flujo de combustible (kg/min).

ΔT = Diferencia de temperatura entre el aire de secado y el aire ambiental, °C.

η = Eficiencia del intercambiador, (decimal).

c = Poder calorífico del combustible, (kJ/kg).

Para los combustibles más utilizados se presentan los valores promedios de poder calorífico (c) presentados en la Tabla 49.

4.8.5. Secado mecánico de capas estáticas del café

4.8.5.1. Secado en una sola dirección del aire

Los secadores mecánicos utilizados para café en Colombia son, en general, de capa fija; ésto significa que el grano se coloca en un depósito provisto de un piso construido en lámina metálica perforada y el aire lo atraviesa en una o alternativamente, en dos direcciones.

Los secadores de capa fija de granos en los cuales el aire atraviesa la masa de café en una sola dirección, producen un gradiente muy marcado de humedad a lo largo de toda la capa. Para el caso del café pergamino esta diferencia de humedad es todavía más grande debido al alto contenido inicial de humedad del café con relación a los cereales.

Evaluaciones efectuadas en Cenicafé (124) (Figura 97) indican que al secar café en un silo secador de capa fija de 0,40m, sin invertir la dirección del flujo del aire, con temperaturas de aire de secado de 50°C y un caudal de 60m³/min. ton cps, después

Tabla 49. Poder calorífico de algunos combustibles utilizados en Colombia.

Combustible	Poder Calorífico	
ACPM	146.000	(kJ/gal)
HULLA (antracita)	33.440	(kJ/kg)
HULLA (muestra Riosucio, Caldas)	28.750	(kJ/kg)
COQUE	30.514	(kJ/kg)
CASCARILLA DE CAFÉ	17.936	(kJ/kg)
CASCARILLA DE ARROZ	12.500	(kJ/kg)

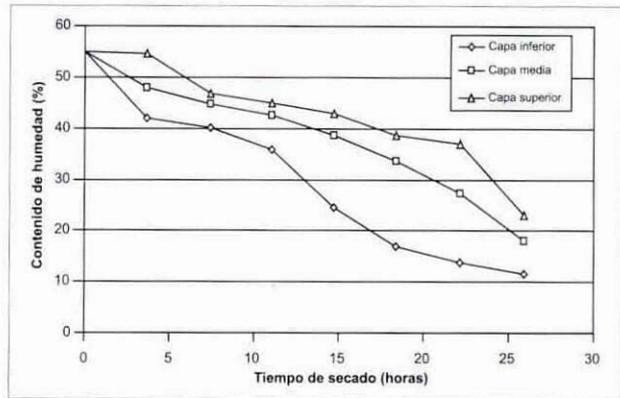


Figura 97. Curvas de secado de capa fija sin inversión del flujo del aire.

de 26 horas de secado, las diferencias en el contenido de humedad entre las capas extremas fueron del 13% (23,8 - 10,8), mientras que la humedad promedio de los granos era de 17%.

4.8.5.2. Secado con inversión de la dirección del flujo de aire

Para disminuir el gradiente de humedad en la capa estática del café se ha demostrado válida la opción de invertir la dirección del sentido del aire en la capa, a intervalos de 6 a 12 horas, de forma que se disminuye efectivamente el sobresecado en los granos que reciben el aire con mayor temperatura. Mediante esta operación los granos más húmedos quedan localizados en el interior de la capa. Si el caudal de aire utilizado es inferior al recomendado (Tabla 48), se obtendrán aún diferencias de humedad mayores, que pueden comprometer la calidad del producto.

En la Figura 98 se presentan las curvas de secado para los granos localizados en la capa inferior, en la capa media y en la capa superior en un secador CENICAFÉ, en el cual se aplicó un caudal específico de aire de secado a 50°C (64). Por medio de compuertas se invirtió la dirección del aire de secado cada tres horas. Durante las

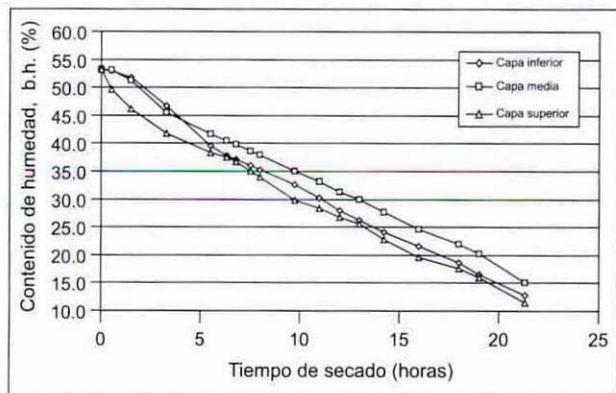


Figura 98. Curvas de secado de capa fija con inversión de la dirección del flujo del aire.

primeras 3 horas de secado el aire se forzó de abajo hacia arriba. El contenido de humedad de las tres capas al final de las 21,5 horas de secado, fue de 15,1% en la parte media, 11,5% en la superior y de 12,7% en la capa media.

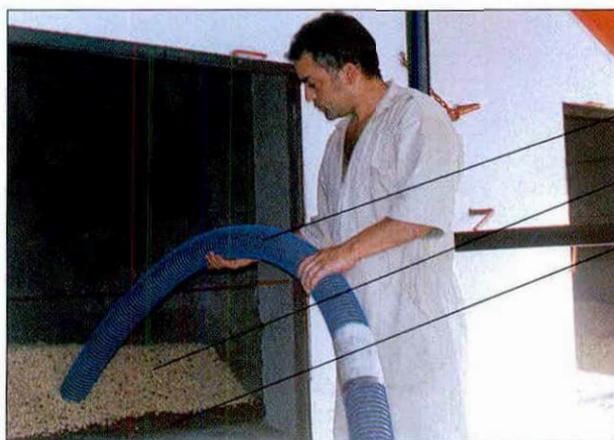
4.8.5.3. Presecado del café en capas estáticas

Una forma de utilizar más eficientemente la capacidad de secado del aire consiste en aprovechar el aire de salida de la primera capa estática para que atravesase otra capa, u otras capas, antes de salir a la atmósfera. Esta(s) nueva(s) cámara(s) se denomina(n) cámara(s) de presecado. Es necesario disponer de suficiente potencia en el ventilador para poder cumplir con el caudal mínimo.

Al aumentar la masa de café, se debe aumentar en igual proporción el caudal expresado en metros cúbicos por minuto por metro cuadrado del secador. Los valores de caudales expresados en metros cúbicos por metro cúbico ocupado por el grano o por tonelada de café pergamino seco deberán quedar iguales [$25 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{m}^3)$ ó $66 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{Ton cps})$].

En la Figura 99 se puede observar una cámara del secador CENICAFÉ, el cual se caracteriza por tener un compartimiento de secado y otro de presecado. Además, es posible invertir la dirección del flujo del aire tanto en el compartimiento de secado como en el de presecado.

La(s) cámara(s) para el presecado también puede estar localizada en la parte superior. En este caso solamente es posible la inversión del flujo del aire en la cámara de secado. Este secador, cuyo esquema se presenta en la Figura 100, es una adaptación del secador CENICAFÉ con la ventaja de que se reduce el área para su construcción y consecuentemente los costos. Estos secadores, de dos o tres capas, son de fácil construcción y son fabricados generalmente en ladrillo y concreto. Su capacidad puede variar de 0,625 a 3,75 ton de cps (50@ a 300@). La temperatura máxima del aire de secado debe ser de 50°C.



Tubo succionador para el transporte neumático del café.

Capa estática de café.

Piso perforado.

Figura 99. Silo secador tipo CENICAFÉ para café pergamino, en capas estáticas de secado y presecado, con inversión de la dirección del flujo del aire. Descarga neumática.

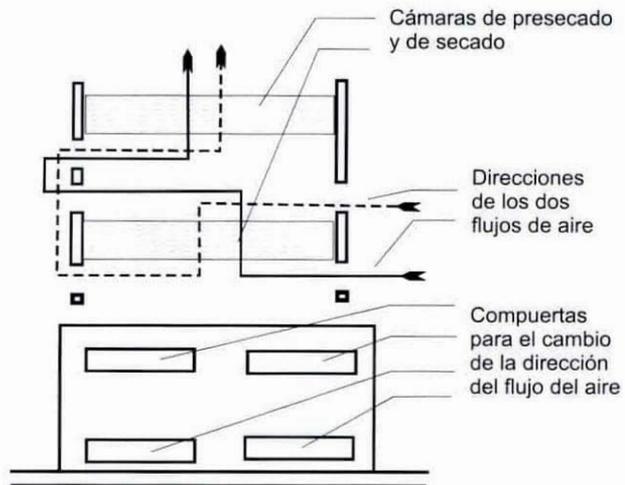


Figura 100. Esquema de un silo secador vertical, de dos capas estáticas, provisto de inversión de la dirección del flujo del aire, solamente en la cámara de secado.

Si se utilizan temperaturas superiores a los 50°C, aunque disminuye el tiempo de secado, conduce a una reducción en los ingresos del caficultor, por el sobresecado inevitable que ocurren en las capas exteriores, para obviar la presencia de granos húmedos en las capas intermedias de la masa.

4.8.5.4. Secado mecánico del café en carros convencionales para secado al sol

En Cenicafé se desarrolló otro secador mecánico de capa fija para pequeños y medianos caficultores (29), con capacidad de 750kg (60@) cps, a partir de un secador solar de carros, igual al utilizado tradicionalmente por los caficultores. El secador solar está constituido por varias plataformas de secado dispuestas una sobre otra, soportadas sobre rodachinas que facilitan su desplazamiento para exponer el grano al sol o resguardarlo en caso de lluvia.

Las siguientes modificaciones fueron necesarias en la estructura tradicional para efectuar el secado mecánico del grano.

- El piso de madera de las cuatro bandejas se reemplazó por anejo cafetero de 4 x 4 huecos por 25,4mm (pulgada).
- El sellamiento lateral y posterior se realizó mediante la construcción de paredes de ladrillo farol revocadas internamente.
- El sellamiento frontal del espacio libre entre las bandejas se realizó mediante dos compuertas construidas en lámina metálica.
- Se construyó un techo de dos alas, con teja de zinc y vigas de madera para facilitar el manejo del café de la plataforma superior. El giro de cada ala del techo se efectuó por medio de cuatro bisagras.
- La cámara plenum del secador se formó por el espacio libre entre el anejo de la plataforma inferior y el piso del secador.

Su operación se asemejó al manejo tradicional de un horno de panadería, el cual es alimentado indistintamente retirando la capa que ha terminado el proceso, y sustituyéndola inmediatamente con otra capa con producto fresco.

El secador presentó un comportamiento satisfactorio, obteniéndose buenos resultados en el proceso.

El caudal promedio utilizado para las cinco primeras experiencias fue de $5,6 \text{ m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$, lo que es equivalente a $23,5 \text{ m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^3$ o a $61 \text{ m}^3/\text{min}\cdot\text{Ton cps}$. A medida que se retiraban las capas los caudales aumentaron hasta en un 80% de los valores anotados.

En la Tabla 50 se muestra el desempeño del secador en cuatro experimentos; se puede observar en el primero, que la primera capa obtuvo el contenido de humedad final de 11% a las 23 horas de secado, momento en que ésta se retiró del secador; la última capa fue retirada a las 36 horas de inicio del secado (13 horas después de retirar la primera capa).

La uniformidad del contenido final de humedad fue muy aceptable, presentando coeficientes de variación inferiores al 10%, cuando el valor correspondiente en los silos secadores con inversión del sentido del aire, y con los caudales recomendados, del mismo orden de magnitud.

La eficiencia térmica del secador fue de 4.638 kJ/kg de agua evaporada, en promedio, el cual es un valor muy aceptable.

4.8.5.5. Dimensionamiento de los secadores de capa fija

Los secadores son los elementos de mayor costo en el beneficio del café y el proceso del secado es el más demorado dentro de todo el proceso. Para la estimación inicial de la capacidad de los secadores estáticos se puede utilizar el concepto general de que la capacidad de los secadores debe ser suficiente para secar la

Tabla 50. Tiempo total de secado para cada plataforma y para cada prueba, en un secador solar de carros. Humedad final = 11%.

	Número de la prueba					
	1	2	3	4 *	5	6
Plataforma	Tiempo de secado, horas					
1	23,5	24	23,5	-	24,0	23,0
2	28,0	27	28,0	23,8	27,5	26,5
3	29,5	36	32,0	32,5	36,0	30,5
4	36,0	38	36,0	37,5	38,5	35,5

* En esta prueba no se cargó la plataforma inferior.

** En esta prueba el espesor de la capa de grano fue $0,20\text{m}$.

cantidad producida en la semana pico, que puede ser estimada igual a cuatro veces la producción del día pico.

En términos prácticos, cuando se utiliza el sistema de beneficio convencional con fermentación, el número de tandas (cantidad de producto depositado en los secadores) que se secan semanalmente es generalmente igual a tres.

Mediante la introducción del desmucilaginado mecánico, que permite iniciar el secado en el primer día de la semana, la utilización de los secadores puede aumentarse a cuatro tandas, o sea 33,3% más capacidad de secado y por tanto puede reducirse en esta misma cifra la capacidad de secado instalada en la finca.

4.8.5.6. Selección del ventilador

Una vez se conoce la cantidad de café por secar en una tanda, se puede calcular el volumen que ocupa utilizando el valor de la densidad del café lavado (650kg/m^3) según la Tabla 58 que se incluye en el Apéndice A. La cantidad de aire que debe pasar por la masa de café se obtiene de la Tabla 48. La presión estática que debe suministrar el ventilador a éste caudal se calcula de la ecuación < 7 >. La potencia del ventilador se calcula mediante la ecuación < 8 >.

Cuando los ductos y las compuertas se dimensionan adecuadamente, es decir, cuando su área es aproximadamente 50% mayor que el área de la succión del ventilador, las pérdidas de presión del aire para pasar por éstos obstáculos son pequeñas, comparadas con las pérdidas a través de la capa de granos; como criterio práctico se les puede estimar como iguales a 15% de las que ocurren a través del grano.

4.8.6. Secador mecánico de café, para el aprovechamiento de la energía calorífica no utilizada en las estufas campesinas (96)

En las fincas cafeteras se emplean estufas que usan leña o carbón mineral como combustible para la preparación de los alimentos. En dichas cocinas se aprovecha una parte pequeña de la energía calórica generada para la preparación de alimentos, pero permanece encendida aún durante la noche para facilitar al día siguiente el encendido.

Dadas las dificultades del secado en los sistemas solares existentes durante la cosecha, fundamentalmente por factores climáticos (lluvia, alta nubosidad, etc.) se planteó como alternativa de secado mecánico de café para pequeños productores, mediante el empleo de elementos disponibles en la propia finca cafetera (estufa y leña de café proveniente de la zoca).

El equipo de secado se denominó “EScafé” Estufa Secadora para café, para una capacidad de 125kg (10@) de café pergamino seco/tanda y consta de: una estufa modificada, una cámara de secado igual a la desarrollada por Montenegro (105), un ventilador y un ducto (Figura 101). La estufa modificada constituye el hogar de combustión y el intercambiador de calor (formado por dos componentes) para el

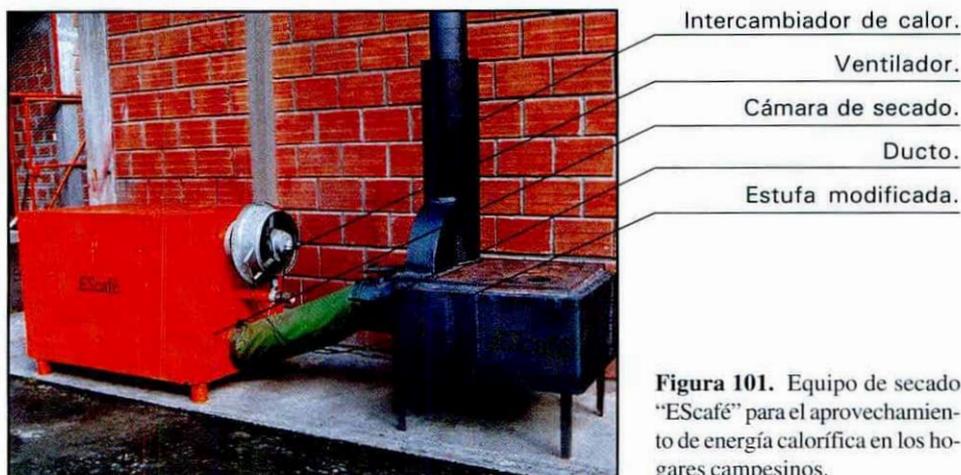


Figura 101. Equipo de secado “EScafé” para el aprovechamiento de energía calorífica en los hogares campesinos.

equipo de secado, a saber, el primero es una camisa que recubre dos paredes, lateral y fondo de la estufa para así aprovechar el calor generado por ellas, y el segundo es un ducto denominado carcaza que recubre concéntricamente la chimenea, a la cual se le adicionó cuatro aletas longitudinales.

El equipo cuenta con un sistema simple para la inversión del flujo del aire en la capa de café, conformado por un ventilador tipo axial de 0,154kW, con un caudal de 30 m³/min acoplado a un eje sobre el cual gira alrededor de un punto fijo, permitiendo la inversión de acuerdo al avance del secado.

En la estufa, la energía no empleada en la preparación de alimentos durante una prueba de secado, proveniente de combustibles como el carbón mineral y la leña de café, es aproximadamente 635kW-h (78%) y 731kW-h (81%) respectivamente. De ésta se aprovecha para el secado de café más del 33 %.

El **tiempo de secado** de café en el equipo fue de 3 días, o sea 7 días menos que el secador solar operando con el funcionamiento habitual de las horas empleadas para cocinar, es decir 15 horas en las que se le suministraba combustible y se regulaba la temperatura (compuertas) para obtener en la cámara de secado un promedio de 47,3°C con carbón y 49,3°C con leña.

Durante el secado del café se emplearon 96,1kg de carbón y 183,1kg de leña. Se obtuvo un contenido de humedad final del café del 10% (b.h.), en promedio.

La Tabla 51 muestra los resultados obtenidos empleando cada uno de los combustibles y con el secado natural.

4.8.7. Secador Intermitente de Flujos Concurrentes, (IFC)

Los secadores de capa fija ocupan gran área en los beneficiaderos, aún los de diseño vertical con dos o más capas. El aire debe pasar simultáneamente por todas

Tabla 51. Valores obtenidos de la energía disponible, la energía utilizada en el secado, el tiempo de secado y el contenido de humedad final.

	Energía Disponible	Energía utilizada en el secado	Tiempo de secado	Contenido de humedad final promedio
Carbón mineral	78%	35%	3 días	10,10% b.h.
Leña de café	81%	33%	3 días	10,15% b.h.
Secado natural			10 días	10,78% b.h.

las capas, con volúmenes específicos altos para disminuir la desuniformidad intrínseca en este tipo de secadores y para garantizar un tiempo de secado aceptable. De otro lado, los secadores deben quedar dentro de estructuras convencionales.

Con el fin de presentar alternativas para superar las limitaciones inherentes de los secadores de capa fija y disponer de una tecnología de mejor desempeño técnico, Cenicafé, después de un examen minucioso sobre las diferentes alternativas posibles, inició un programa de investigación para desarrollar un tipo de secador intermitente de flujos concurrentes (IFC).

El secador IFC consta, en su estructura básica (Figuras 102, 103 y 104) de dos partes principales: la cámara de secado y la cámara de reposo. La cámara de reposo se divide en dos, inferior y superior. La masa de granos se mueve continuamente dentro del secador, por medio de un sistema de descarga inferior y de un transportador de cangilones.

En la cámara de secado el aire y el grano fluyen en el mismo sentido, hacia abajo, de donde se origina su nombre de secador de flujos de aire y granos concurrentes; en ésta, el aire de más alta temperatura proveniente del generador de aire caliente, encuentra a los granos más húmedos produciéndose altas tasas de evaporación. Estas tasas impiden el excesivo calentamiento de los granos, de forma que su temperatura no sobrepasa los 45°C, valor muy distante de la temperatura del aire que puede llegar hasta los 40°C (Figura 107); de esta forma se conserva la calidad del

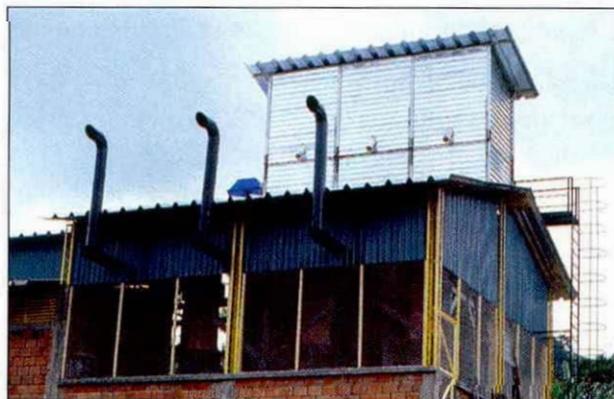


Figura 102. Secadores intermitentes de flujos concurrentes, CENICAFÉ - IFC.

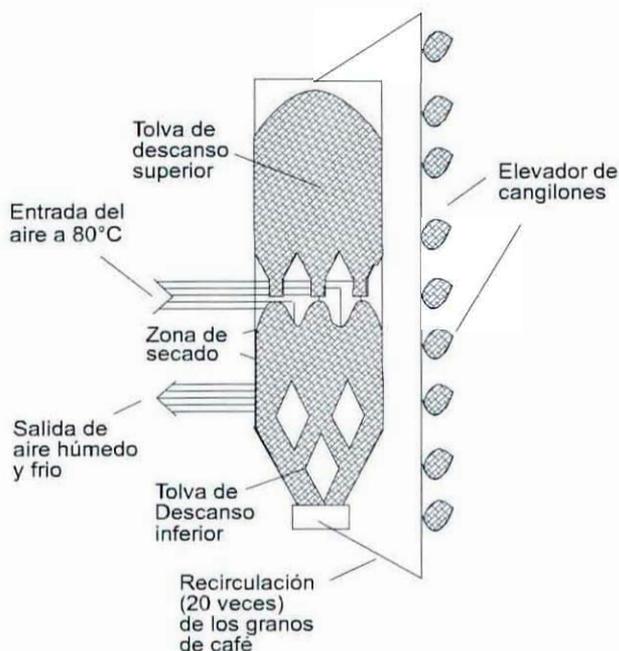


Figura 103. Esquema de un secador intermitente de flujos concurrentes, CENICAFÉ - IFC.

café. Además, el sistema de secado con flujos de aire y grano en forma concurrente y con temperaturas relativamente altas es muy eficiente, por consideraciones termodinámicas.

De la cámara de secado el grano pasa a la de **cámara de reposo inferior**, en la cual los granos no quedan en contacto con el aire caliente; en este espacio ocurre la redistribución de humedad, desde el interior al exterior, en cada uno de los granos. La masa se descarga por gravedad controlada por un dosificador mecánico y la toma el transportador de cangilones, el cual a su vez la descarga en la parte superior del secador, donde continúa su período de reposo en la **cámara de reposo superior**. El sistema de recirculación de los granos a través del secador se repite aproximadamente 20 veces, hasta obtenerse el contenido de humedad deseado en el rango de humedad del 10 - 12% b.h. Todos los granos reciben la energía en forma discontinua, de ahí que el secador reciba el nombre de **secador intermitente**.

Inicialmente se construyó (92) y se evaluó (52) un secador IFC prototipo con capacidad de 500kg de cps (40@). Su desempeño técnico y la calidad final del café dieron resultados muy promisorios (123).

El mismo secador prototipo se modificó para mejorar el sistema de transporte del grano. En una evaluación de la operación y de la calidad del producto obtenido (123) se realizaron 8 observaciones con el secador, variando las temperaturas de aire de secado de 80 a 86°C y los flujos de granos de 0,024 a 0,048 m³/min.m². El tiempo total de secado varió entre 26 y 32 horas. El contenido de humedad inicial promedio fue de 53,8% (1,65% coeficiente de variación, CV). El contenido de

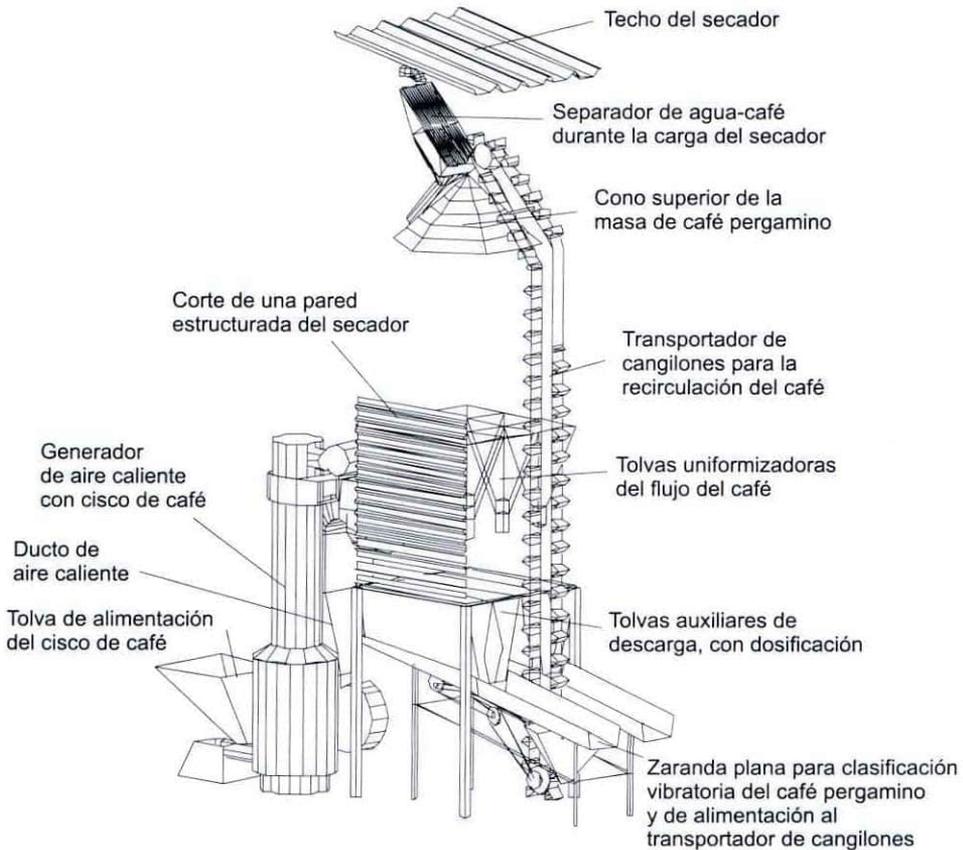


Figura 104. Diagrama tridimensional de un Secador Intermitente de Flujos Concurrentes, CENICA-FÉ - IFC.

humedad final promedio fue de 11,0% (5,72 CV). Este valor bajo de coeficiente de variación indica la casi perfecta uniformidad de contenido final de humedad, requisito que facilita la comercialización y permite una conservación buena durante el almacenamiento. Además, es aproximadamente 3 veces más bajo que el valor correspondiente a los secadores de capa estática.

El hecho de poder trabajar a temperaturas relativamente altas de secado es muy conveniente desde el punto de vista de eficiencia termodinámica; en efecto, en la Figura 105 se muestran las humedades absolutas de salida y de entrada en el secador, que indican que la extracción de la humedad es muy alta (cerca a la saturación), y constante, a lo largo del todo el proceso de secado (lo que se también se puede confirmar por el carácter lineal de la curva de secado (Figura 106).

Todas las curvas de secado (variación de la humedad con relación al tiempo de secado) obtenidas en el secador IFC, prototipo y comercial, muestran disminución de la humedad lineal con relación al tiempo (Figura 106) y la temperatura del grano estable

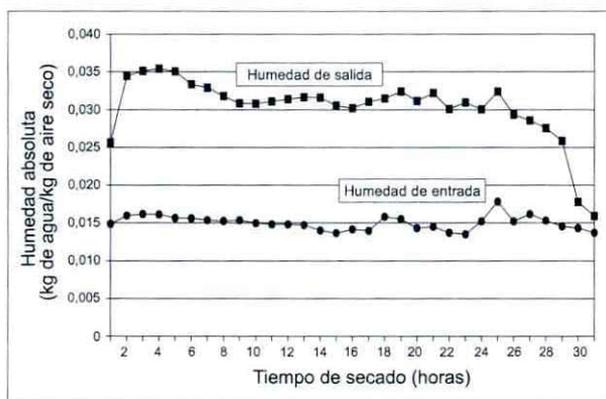


Figura 105. Uniformidad en las diferencias entre las humedades absolutas de entrada y de salida al secador.

por debajo de 40°C, cuando la temperatura del aire de secado no sobrepasa 80°C (Figura 107). Las pruebas de calidad física y de taza de todas las muestras fueron muy aceptables, obteniéndose calificaciones de café de alta calidad (123).

Durante estos experimentos se desarrolló una metodología para finalizar el proceso del secado utilizando la energía propia de los granos; para ello se desconectó la fuente de calor y se continuó inyectando aire ambiente, para reducir los dos últimos puntos de humedad y obtener el contenido de humedad final deseado (11 a 12%, b.h.) (123).

Como conclusión general del estudio se comprobó que el secador de flujos concurrentes para café pergamino era un sistema de secado válido y potencialmente competitivo con relación a otros sistemas mecánicos (123).

Con base a los resultados de optimización operacional del secador IFC (106, 107) se construyó y evaluó un secador IFC de capacidad de 1.000kg de cps similar al prototipo (111). En este segundo prototipo se efectuaron reformas e innovaciones para optimizarlo y disminuir a menos de 1% la trilla de granos, durante toda la operación. Para evitar las reacciones químicas originadas por el contacto del café

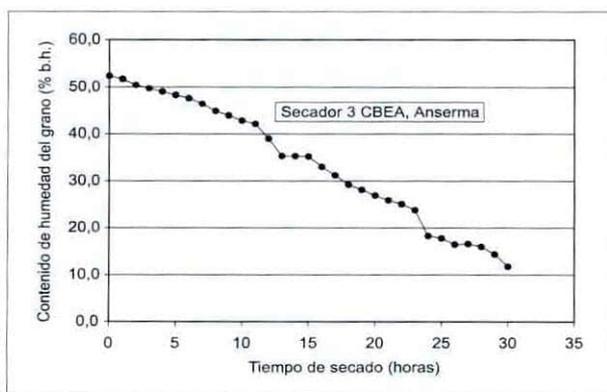
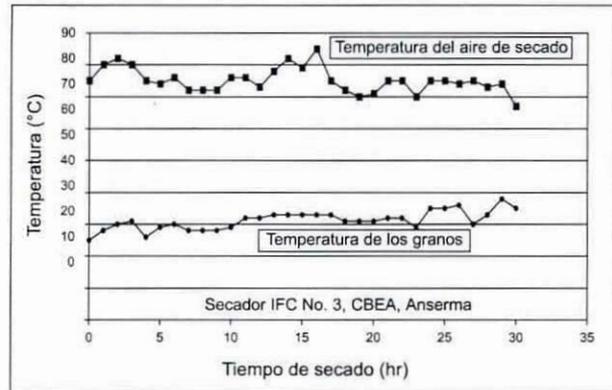


Figura 106. Curva de secado obtenida en los secadores CENI-CAFÉ - IFC. Se caracteriza por la reducción lineal de la humedad durante el tiempo de secado.

Figura 107. Comparación entre las temperaturas del aire de secado y de las temperaturas de los granos en una operación típica de los secadores CENICAFÉ – IFC.



pergamino húmedo con las paredes de lámina galvanizada del secador, se revistió con láminas delgadas de acero inoxidable de costo muy reducido.

Se evaluó el secador IFC de 1.000kg con mejoramientos mecánicos y utilizando un quemador de carbón mineral y se comprobaron las excelentes condiciones de secado con disminución lineal de la humedad desde 54%, hasta 12%, b.h. La temperatura de secado se mantuvo constante en un valor de 83°C, con un coeficiente de variación de sólo 3,3%, gracias a un dispositivo electrónico que controla el quemador de hulla construido en Cenicafé (197).

La eficiencia del secador expresada en kJ/kg de agua evaporada se determinó con la ayuda de un programa sicrométrico computarizado (28). El valor resultante de 3.763kJ/kg de H₂O, indica la altísima eficiencia del secador. En términos relativos, la eficiencia del secador comparada con la evaporación de agua libre, en la que no existe ninguna resistencia de difusión, es del 63,4%.

A continuación se presentan resultados experimentales correspondientes a los secadores IFC evaluados en forma experimental en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma. (Sección 3.19.)

El área de la sección del secador es de 4m². El volumen de secado efectivo es de 4m² x 0,65m = 2,6m³. El volumen de descanso (tiempo en que el café no está sometido al flujo de aire caliente es de: 10,85 m³. La relación **volumen de secado a volumen de descanso** igual a 0,24.

La temperatura de secado utilizada fue de 75°C, en promedio. Al final del secado, cuando la humedad fue del orden del 14% se apagó el generador de aire caliente y se dejó forzar el aire a través de los granos en movimiento a temperatura ambiente, durante dos horas. Al final de este tiempo, el grano presentaba el 12% de humedad.

El caudal de aire en el secador es de 45 m³/min-m² que aplicado a un área transversal de 4m² de los secadores dio un caudal total de 180m³/min.

La potencia necesaria para vencer la resistencia de los granos en este secador es de

6,0hp pero debido a la gran resistencia que ofrece el intercambiador de calor al paso del aire, la potencia total para todo el sistema neumático de secado es de 13,5hp.

El **tiempo medio de secado**, utilizando temperaturas de 75°C para una carga de 3,4ton (270@) de café pergamino seco fue de 28 horas. El tiempo de carga media del secador por medio de las motobombas fue de 45 minutos. El tiempo de descarga media fue de 30 minutos.

En la Figura 108 se indica la calidad del café pergamino seco obtenido en el secador de torre, cargado con 2.620kg de café lavado.

Se demostró que al descargar el secador, el café tenía **contenidos de humedad muy uniformes** y cercanos a la humedad ideal (para asegurar el mayor peso de venta) del 12%, (Figura 109). El coeficiente de variación de la humedad fue de 3,3%, (cuando no se presentaron fallas con el sistema de dosificación), lo que corroboró que este tipo de secador presenta aproximadamente 3 veces menos desuniformidad que los secadores de capa estática.

En la Figura 110 se indica la excelente calidad del café verde obtenido. El café fue catalogado como **café tipo Federación**.

Todos los secadores fueron utilizados con **cisco del café**, como combustible. El consumo de cisco fue de 310kg de cisco por tonelada de café pergamino seco, ó sea que con un kilogramo de cisco se secaron 3,22kg de café pergamino seco. Es decir, el contenido de cisco en el café pergamino seco contiene el 61% de la energía necesaria para secar el grano, en un quemador con una eficiencia del 60%. Si la eficiencia fuese ideal, (100%) el pergamino contenido en un grano podría producir toda la energía para secar el café pergamino. El costo de la materia prima (enero de 1996) fue de aproximadamente \$27,8/kg cps.

En el presente año se está programando la modificación del sistema de descarga de los granos de los secadores, para lograr la recirculación de los mismos, de forma que se consiga completamente la uniformidad de este proceso y así garantizar el mismo tratamiento de secado a cada uno de los granos.

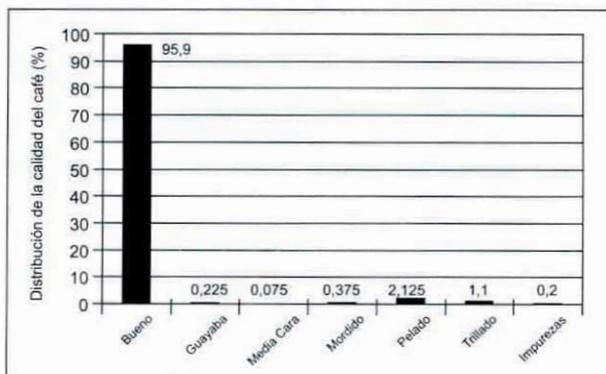


Figura 108. Calidad del café pergamino secado en el secador IFC de torre.

Figura 109. Uniformidad del café pergamino secado en el secador IFC de torre, Anserma, Caldas.

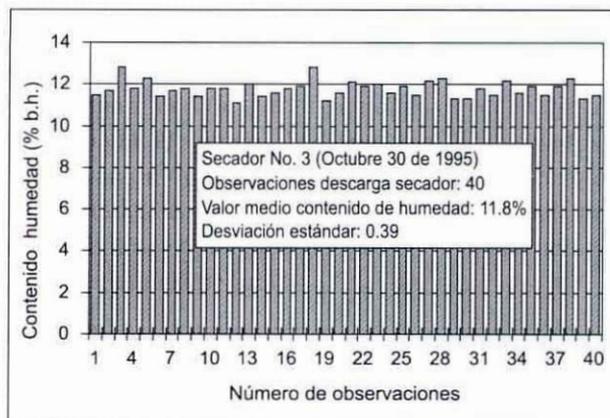
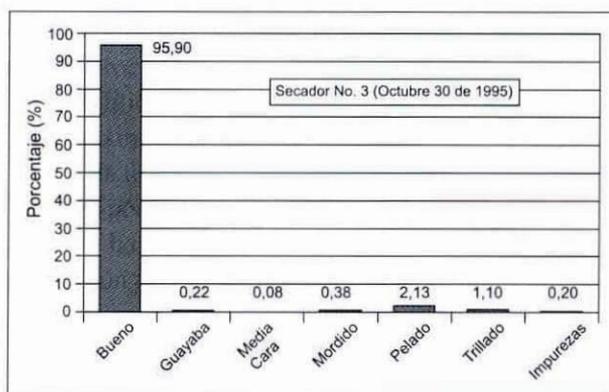


Figura 110. Calidad de la almendra del café secado en el secador IFC de torre, Anserma, Caldas.



4.9. SIMULACIÓN MATEMÁTICA DEL SECADO

Desde hace tres décadas, cuando se inició el uso masivo de los computadores, se han utilizado los modelos matemáticos para describir los procesos de secado y enfriamiento de los granos.

Desde el inicio de esta nueva tecnología digital aplicada, se consideraron los procesos de secado y almacenamiento de granos (28) como muy buenos ejemplos de la gran utilidad práctica de la simulación matemática, que en los inicios trataba de justificarse.

En efecto, los granos presentan **propiedades físicas ideales** para su secado, enfriamiento y modelación matemática, dispuestos a granel, debido a la adecuada uniformidad de sus dimensiones físicas en su tamaño, forma y espacio intergranular; su estructura fuerte y los coeficientes de fricción entre los propios granos le permiten su disposición en capas de granos de varias decenas de metros de altura; el valor considerablemente alto y uniforme del área superficial por unidad de volumen de granos y en general sus excelentes propiedades físicas, en las que también se incluyen sus dimensiones reducidas, la alta conductividad y difusividad térmica en su

estado húmedo, facilitan la transferencia de calor y de humedad a bajas temperaturas cuando se hace circular una corriente de aire, bajo condiciones controladas, cuando se disponen en los secadores y en los silos adecuados.

Se ha demostrado en los estudios de secado y de almacenamiento de granos con aire forzado que, cualquiera sea la configuración del secador y los sistemas de almacenamiento, es siempre posible modelar los procesos matemáticamente, mediante ecuaciones. Se obtienen así las variaciones de la humedad y temperatura de los granos y del aire, en cualquier instante y en cualquier posición de los equipos.

Desde que se demostró la validez de estos principios se ha hecho uso intensivo de los modelos matemáticos para diseñar y operar óptimamente los secadores y los sistemas de almacenamiento.

Estos procesos de diseño y de optimización de equipos se han conseguido en tiempos muy cortos, debido a que con la simulación matemática se predice el secado y almacenamiento en tiempos breves y con menos errores, con relación a los procesos reales.

4.9.1. Propiedades físicas

4.9.1.1. Contenido de humedad de equilibrio

El proceso de transferencia de humedad del grano al aire termina cuando **la presión de vapor** del agua en la superficie del grano se iguala con la presión de vapor del aire, evento que puede presentarse si se dispone del tiempo necesario para desarrollarse el proceso. Depende del contenido de humedad del grano, de la humedad y del aire y en temperatura que es igual a la temperatura del aire del grano.

En los secadores mecánicos normalmente no se llega al equilibrio higroscópico, porque no es necesario y porque la humedad de equilibrio podría estar cercana a cero. No obstante, las tasas de secado de los granos dependen esencialmente de los valores “potenciales” de humedad de equilibrio y no podría lograrse la modelación matemática sin el conocimiento de esta propiedad física.

Es posible también que el grano absorba humedad del aire, cuando su presión de vapor en la superficie es menor que la presión de vapor del aire.

Cenicafé ha desarrollado trabajos para la obtención de datos experimentales de equilibrio en los laboratorios, obteniendo ecuaciones que se aproximan con suficiente exactitud a los valores experimentales y utilizado estos modelos para conformar los sistemas de simulación en secado y almacenamiento de café, en éstas dos importantes etapas de la producción y conservación del café. Las curvas de humedad de equilibrio para café pergamino (173) se ampliaron a un rango más amplio de temperatura (10 a 56°C) y de humedad (4 a 26%, en base seca) (107). Mediante la ecuación < 11 > se determina el contenido de la humedad (% , base seca) de equilibrio

del café pergamino, como función de la humedad relativa (ϕ) y la temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

$$M_{\text{eq}} = (61,030848 \phi - 108,37141 \phi^2 + 74,461059 \phi^3) e^{(-0,037047 \phi + 0,070114 \phi^2 - 0,035177 \phi^3) \theta} < 11 >$$

En donde:

- M_{eq} = Contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, (%), b.s.
 ϕ = Humedad relativa, (decimal)
 θ = Temperatura del aire, ($^{\circ}\text{C}$), grados centígrados

Las curvas correspondientes a ésta ecuación se presentan en la Figura 111.

4.9.1.2. Calor latente de vaporización

El calor latente de vaporización del café pergamino es una propiedad física que indica exactamente la **cantidad de calor** necesaria para evaporar el agua contenida en el grano; depende de la temperatura y de la humedad del producto. La relación se obtiene a partir de los datos de humedad de equilibrio (82), la cual está representada por la ecuación < 12 >, de calor latente de vaporización del café pergamino (173):

La expresión obtenida es:

$$L = (2502,4 - 2,4295 \theta) [1 + 1,44408 e^{(-21,5011 M)}] < 12 >$$

En donde:

- L = Calor latente de vaporización del café pergamino, (kJ/kg)
 θ = Temperatura, ($^{\circ}\text{C}$), grados centígrados
 M = Contenido de humedad del café, (decimal) base seca

4.9.1.3. Secado de capa delgada. Difusión de humedad

La capa delgada de café pergamino es un concepto físico-matemático indispensable para referirse a la parte elemental de constitución de una masa de granos dispuesta en un secador o en un silo de almacenamiento, sometida a la acción del aire forzado a través del espacio entre granos. El espesor de la capa delgada puede asumirse como la altura de un grano.

Para obtener en el laboratorio las curvas experimentales de secado de capa delgada se colocan varios granos en una capa delgada sobre una malla perforada y se someten a diferentes condiciones de temperatura y de humedad del aire forzado en un secador de laboratorio. Es deseable colocar **las capas delgadas entre capas espe-**

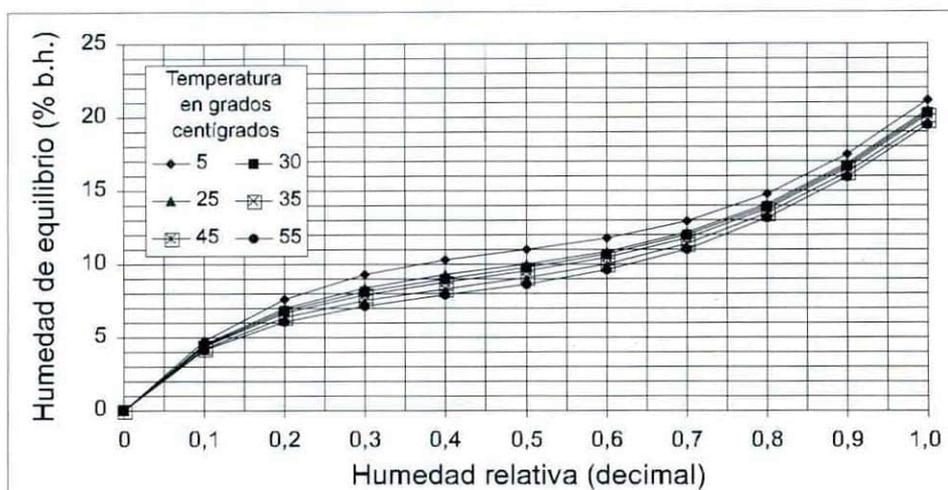


Figura 111. Curva de contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, calculada con la ecuación 11, transformada a base húmeda.

sas, del mismo material, para obtener datos en condiciones más reales de los secadores (87 y 161). Los valores de las variaciones del contenido de humedad del grano con relación a la variación de las condiciones de temperatura y humedad del aire, presentan muy buena correlación en la ecuación semiempírica de capa delgada (154), que ha sido utilizada para café y otros productos (87, 94, 107, 124, 154 y 161). Mediante esta misma tecnología se desarrolló la ecuación de secado de capa delgada para café pergamino (87, 94, 125 y 155). La ecuación de secado de capa delgada en su forma diferencial está dada por :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -mq (M - M_{eq}) (p_{vs} - p_v)^n t^{q-1}$$

< 13 >

En donde:

$\partial M/\partial t$ = Tasa del cambio del contenido de humedad del grano por unidad de tiempo.

m, n, q = Parámetros de la ecuación de capa delgada, que se obtienen mediante procedimientos de regresión lineal o no lineal, e integración numérica.

M = Contenido de humedad del café en el tiempo "t", (decimal) base seca.

M_{eq} = Contenido de humedad de equilibrio del café, dec., base seca.

p_{vs} = Presión del vapor saturado, (kPa).

p_v = Presión parcial del vapor de agua, (kPa).

t = Tiempo, (horas).

Si las condiciones de temperaturas y humedades son constantes durante el secado,

la ecuación diferencial se puede integrar para obtener la ecuación de secado de capa delgada de café pergamino, integrada para condiciones controladas del aire:

$$\frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = e^{-m (p_{vs} - p_v)^n t^q} \quad < 14 >$$

En donde el miembro izquierdo de la ecuación es la razón de humedad y:

- M_o = Contenido inicial de humedad, decimal, base seca
 e = base de los números naturales = 2,7183

Los valores de m , n y q para el rango 10-70°C y contenidos de humedad del 5 al 55%, base seca, fueron: $m = 0,01430$; $n = 0,87898$; $q = 1,06439$ (Figura 112). La ecuación es válida para los estudios de almacenamiento y secado a altas temperaturas.

Se estudió (106) el fenómeno de difusión de humedad que permite describir el movimiento del agua dentro del café, en lugar de solo manejar los valores promedios, como lo descrito por la ecuación < 13 >. Se utilizó exitosamente la ley de Fick (28) para correlacionar las tasas de secado de café. La ecuación de Fick < 15 > describe la humedad dentro del café pergamino:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{C}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \quad < 15 >$$

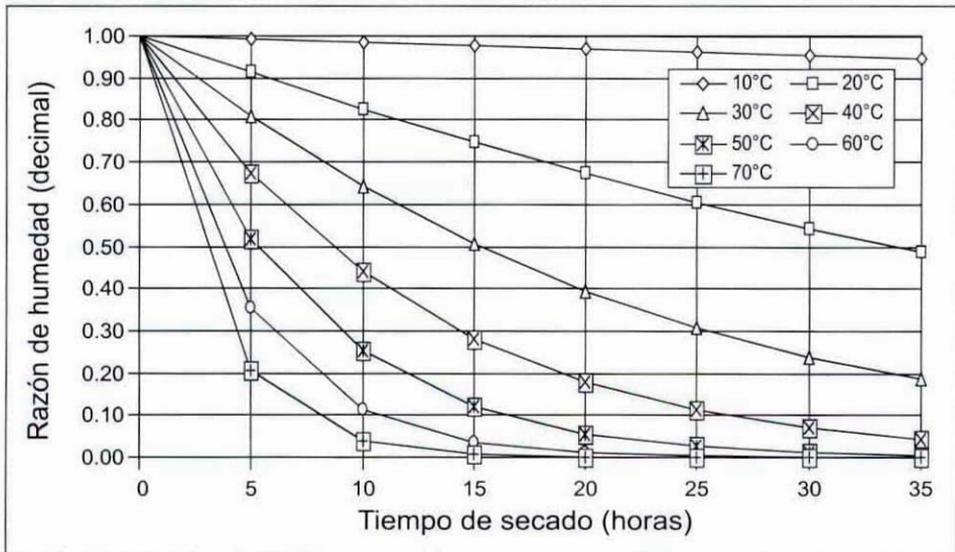


Figura 112. Curvas de capa delgada para secado y almacenamiento de café pergamino. $m = 0,01430$ $n = 0,87898$ $q = 1,06439$, calculada con la ecuación 14.

En donde:

- M = Contenido de humedad, b.s.
 t = Tiempo de secado, (s)
 D = Coeficiente de difusión, (m².s⁻¹)
 r = Coordenada espacial dentro de una esfera, (m).

El **coeficiente de difusión de humedad** de diferentes granos de café se determinó en función del contenido de humedad y de la temperatura del producto; los datos experimentales se obtuvieron de las mediciones del tiempo y del contenido de humedad del grano y del aire, y de la temperatura común del aire y del grano. La cámara experimental utilizada (175) para la toma de datos se construyó en los laboratorios de Cenicafé. El coeficiente de difusión se expresó en función solamente de la temperatura del grano cuando este presenta alto contenido de humedad; como resultado del estudio analítico se obtuvo el coeficiente de difusión de humedad (107).

Se encontró que, al igual que para otros granos, el coeficiente de difusión de humedad dentro del café pergamino depende del contenido de humedad promedio y de su temperatura.

El modelo obtenido, para el coeficiente de difusión de humedad del café pergamino, según ajuste tipo Arrhenius fue:

$$D = 4,158210^{-8} e^{(0,1346 \theta + 2,2055) \overline{M}} \frac{1.184}{\theta + 273,16} \quad < 16 >$$

En donde:

- D = Difusión de humedad, (m².min⁻¹)
 \overline{M} = Contenido de humedad media del grano, (decimal), b.s.
 θ = Temperatura del grano, (°C)

El coeficiente alcanza su mayor valor cuando la humedad y la temperatura del café son las más altas.

4.9.1.4. Área superficial

Al considerar el grano de café como una esfera, se obtuvo (107) un área específica de 779,8 m²/ m³ para café pergamino, en el rango de humedad del 10% - 25,6% b.h.

En la validación de la metodología utilizada para calcular el área superficial del café pergamino, considerando su forma esférica, y mediante la medida del área del pergamino con el planímetro se observó coincidencia en un 50% con los datos experimentales.

4.9.1.5. Calor específico

La expresión encontrada para calcular el calor específico del café pergamino (107) es:

$$CS = 1,3556 + 5,7859 M$$

< 17 >

En donde:

CS = Calor específico del café, (kJ/kg-°K)

M = Contenido de humedad, (decimal), b.s.

4.9.1.6. Densidad aparente

Las densidades aparentes del café pergamino fueron determinadas para diferentes valores de contenidos de humedad (87, 116 y 175).

Se obtuvo una expresión para la densidad aparente del café pergamino como función de su contenido de humedad (106):

$$D_{ap} = 365,884 + 2,707 M$$

< 18 >

En donde:

D_{ap} = Densidad aparente del café pergamino, (kg/m³)

M = Contenido de humedad del café, (%) base seca

4.9.2. Simulación de Procesos Comerciales.

La simulación matemática para el secado y el enfriamiento del café pergamino almacenado ha sido aplicada con éxito en Cenicafé (106, 107, 125, 174). En esos trabajos se presenta la fundamentación físico-matemática de los modelos. En forma general, el trabajo realizado consistió en introducirles las propiedades físicas del café necesarias para construir los modelos de transferencia de calor y de masa basado en los mejores modelos existentes para otros granos.

A los modelos de Thompson (171) y de la Universidad Estadual de Michigan, MSU, (28), se les incorporaron las propiedades físicas del café pergamino obtenidas en los laboratorios de Cenicafé. Los resultados experimentales correspondientes a las experiencias de enfriamiento y de secado fueron comparados con las predicciones de los modelos.

4.9.2.1. Enfriamiento en silos.

La Figura 113 presenta una muy buena predicción de los datos experimentales de enfriamiento de café pergamino seco con las curvas simuladas (174), utilizando el

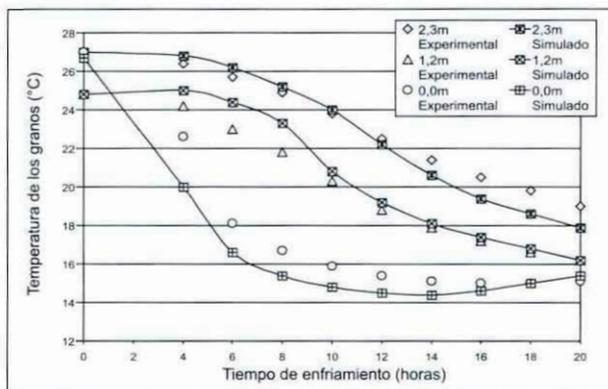


Figura 113. Comparación de datos experimentales y curvas simuladas de enfriamiento (modelo de Thompson) de café pergamino, colocados a granel, en silos. (175).

modelo de simulación de Thompson, correspondientes a tres alturas sobre el nivel del piso del silo de almacenamiento, 0m, 1,2m y 2,3m (Sección 2.3.).

Los silos se construyeron con dimensiones de 0,5 x 0,5 x 2,8m, geoméricamente similares a los de las baterías de 60 silos de ALMACAFÉ, en Bello, Antioquia, de 30m de altura; 6,5m de diámetro, para que los resultados pudieran predecir mejor el funcionamiento de la futura aireación nocturna en cada uno de éstos silos, como en efecto ocurrió posteriormente. Las experiencias de laboratorio se efectuaron variando la humedad del café pergamino entre 8 y 12,5% (b.h.); el rango de temperatura de enfriamiento utilizado estuvo entre 14°C y 22°C: el rango de la humedad relativa entre 65% y 100%; y el del flujo de aire entre 6 y 25m³/h. En particular, para el ensayo No. 6, cuyos resultados se indican en la Figura 113 (de 11 pruebas efectuadas) se experimentó con una temperatura de enfriamiento de 14,5°C; **humedad relativa de 97,7%**; caudal del aire de 18,7 m³/h; el volumen del aire utilizado dividido por el volumen del silo fue de 541,1; la temperatura de los granos disminuyó, en promedio desde 26,8°C a 17,4°C y el contenido de humedad del grano varió entre 12,2% (b.h.) a 12,0%, (b.h.), en un tiempo de 18 horas. El modelo de Thompson predijo con **muy buena precisión** los resultados experimentales. Con base a ésta información se procedió en ALMACAFÉ, a introducir el concepto de aireación nocturna y diurna por períodos de varios días, con valores de la humedad del aire en ocasiones superiores al 90% de humedad relativa, con muy buenos resultados comerciales (76).

4.9.2.2. Secado en capas estáticas

Los Modelos de simulación de secado de granos más utilizados son el Modelo de Thompson y el Modelo de la Universidad de Michigan (MSU). En Cenicafé se han utilizado los dos modelos para predecir el comportamiento del café durante el proceso de secado, en secadores estáticos (Silo secador CENICAFÉ) y en secadores de flujos concurrentes intermitentes (IFC) (106, 124, 125).

En la Figura 114 se presentan los resultados obtenidos experimentalmente y me-

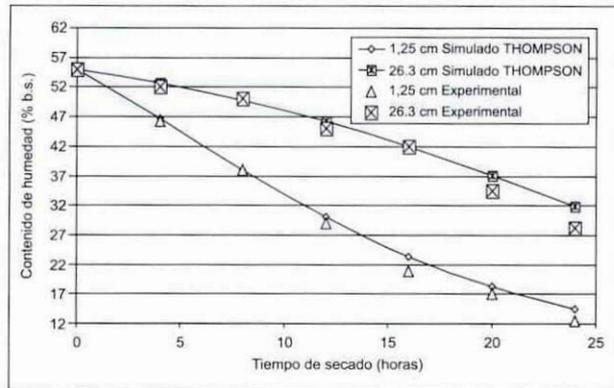


Figura 114. Comparación de datos experimentales y curvas simuladas de secado de café, colocados en capas estáticas a dos alturas diferentes.

diente el modelo de simulación de Thompson (125) para un silo secador CENICAFE (sin inversión del flujo de aire). En ella se observa que el modelo predice bien el proceso de secado en este tipo de secador, presentando un contenido de humedad mayor al experimental en 2% (b.h.), para un tiempo de secado de 24 horas. Durante el proceso, el café redujo su contenido de humedad promedio de 54,9% (b.h.) a 18% b.h., cuando se utilizó una capa de café de 0,33m y un caudal de aire de $23,5\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$ a una temperatura de 45°C .

4.9.2.3. Secado en Secador Intermitente de Flujos Concurrentes

Se utilizaron las ecuaciones de las propiedades físicas del café para conformar el modelo de secado de la Universidad del Estado de Michigan (28). Se demostró la validez del modelo y se le utilizó (106) para hacer el diseño optimizado del secador CENICAFE – IFC. Después de la construcción y evaluación de 4 secadores, incluyendo 3 secadores de capacidad de 4ton, cada uno, de la Central de Beneficio de Anserma, se hizo la verificación de la exactitud de las predicciones.

La Figura 115 presenta los resultados obtenidos experimentalmente y mediante los modelos de simulación de Thompson (125) y MSU (105), para un secador de

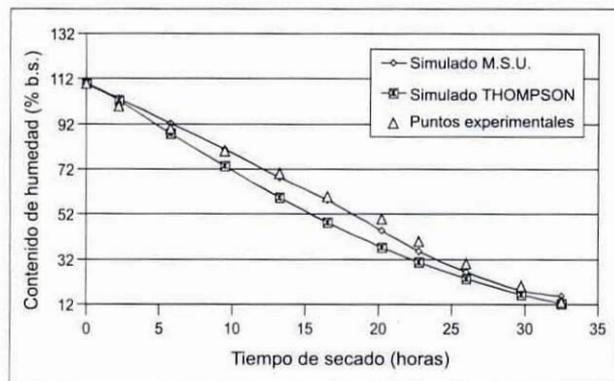


Figura 115. Comparación de datos experimentales con curvas de simulación de secado de café pergamino, en secador intermitente de flujos concurrentes, IFC, mediante dos modelos matemáticos (M.S.U. y de Thompson).

flujos concurrentes (IFC), con una altura de la columna de secado de 0,87m y sección transversal de 0,7m. x 0,7m. En ella se observa que los dos modelos de simulación utilizados, **predicen bien el proceso de secado** en este tipo de secador. El modelo de Thompson predice un contenido de humedad final del grano inferior al experimental en 0,5% (b.s.), mientras que el modelo M.S.U. predice un contenido de humedad final del grano superior al experimental en 2,8% (b.s.), para un tiempo de secado de 32,5 horas. Durante el proceso, el café redujo su contenido de humedad promedio de 52,4% en b.h. (110% en b.s.) a 10,3% en b.h. (11,5% en b.s.), cuando se utilizó un flujo de café de 20kg/min-m² y un caudal de aire de 48m³/min-m² a una temperatura de 87°C.

CAPÍTULO 5

Rendimiento del Café Cereza a Café Pergamino Seco





5

RENDIMIENTO DEL CAFÉ CEREZA A CAFÉ PERGAMINO SECO ⁴⁴

5.1. INTRODUCCIÓN

Se entiende como **rendimiento** de café cereza a café pergamino seco, la relación del peso de los frutos de café cereza tal como fueron cosechadas, sobre el peso del café pergamino seco expresado en forma de café tipo Federación (o en la base que se desee establecer), obtenido mediante el beneficio del café (Capítulo 1).

El rendimiento del café se puede definir también como la relación entre el peso de los frutos de café cereza tal como fueron cosechados o del café pergamino seco que el caficultor vende, sobre el peso del café almendra clasificado para la exportación y obtenido después de los proceso de beneficio y de trilla.

El rendimiento de café depende de varios factores como son: variedad, edad de la plantación, manejo del cultivo, régimen de lluvias, período de cosecha, contenido de humedad del café cereza, calidad de la recolección, métodos, demoras y fallas en el beneficio.

El efecto de las enfermedades y plagas perjudica el desarrollo normal de los frutos y el rendimiento del café disminuye. Para obtener buenos rendimientos la plantación debe disponer de suficiente reserva de nutrimentos para el sostenimiento de la cosecha. Cleves (48) encontró disminución en los rendimientos en la cosecha 1967-68 debido a la baja nutrición de los árboles y a una mayor producción, ocasionándose un desbalance fisiológico que se traduce en granos inmaduros, pequeños y vanos.

La recolección es la primera etapa preparatoria para un buen beneficio del café; la calidad del café seco obtenido depende esencialmente de la calidad de la cereza recolectada. Una masa de café en cereza recién recolectada es un conjunto heterogéneo compuesto por café en diferentes estados de madurez. Porcentajes altos de café verde pueden ocasionar una disminución en peso del orden del 8 al 20%, con relación al café pergamino seco obtenido (67, 74).

En Colombia son comunes los rendimientos, con el beneficio convencional de café cereza a pergamino seco entre 4,7 y 5,3; y los rendimientos de café cereza a café en

⁴⁴ Preparado por Alvarez G., J.; y Roa M., G. Ingeniería Agrícola, Cenicafé.

almendra, en promedio, oscilan entre 5,8 y 6,5. En la Central de beneficio de Cenicafé (176), se registraron promedios de rendimiento entre 4,9 y 5,3.

El tiempo que tarda el proceso de beneficio del café influye en el rendimiento; Calle (30) encontró pérdidas de materia seca del grano al someter el café al proceso de fermentación. Boyce (26), pérdidas de 3,9%, Coste (54) del 2%, Barbosa (21) pérdidas de peso en promedio de 0,02% por hora de fermentación. Vásquez e Hidalgo (179) encontraron pérdidas de materia seca de 1,94% por fermentación natural; Carbonel y Vilanova (31), ganancias en peso al sustituir la fermentación por el método químico con soda cáustica.

Existe coincidencia entre los investigadores de que dichas pérdidas se deben al metabolismo normal del grano, o sea, a la utilización de los carbohidratos para la producción de calor y de dióxido de carbono, durante la respiración de los frutos.

Si los granos están bajo agua como se practica en nuestro país para disipar el calor del producto guardado, ocurren pérdidas adicionales por difusión en el agua de los sólidos constitutivos del café.

5.2. COMERCIALIZACIÓN DE CAFÉ EN CEREZA

El Grupo de Beneficio de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia consideró, teniendo en cuenta que en Colombia el beneficio del café se hace casi exclusivamente en las fincas, que debía estudiarse técnica y económicamente el beneficio del café en grandes centrales, para conocer la viabilidad de fomentar esta nueva opción en diferentes regiones del país, incluyendo los adelantos de la tecnología generada por Cenicafé.

El proyecto de la Central de Beneficio Ecológico de Anserma (151) se diseñó para comprar café en cereza a los caficultores y pagarles el valor correspondiente en café pergamino seco, con flujos de café cereza suficientes para garantizar su funcionamiento en condiciones de rentabilidad durante la mayoría del año.

En reunión específica para el estudio de las Centrales de Beneficio en Colombia, realizada en Anserma (151), se presentaron las ventajas potenciales derivadas de la adopción de esta alternativa (Sección 3.19.3.10).

5.3. COMERCIALIZACIÓN DE CAFÉ PERGAMINO LAVADO

Ha venido en aumento la comercialización del café húmedo o café lavado, mediante la cual, el caficultor **vende a terceros** su café después de despulpado, clasificado y lavado.

En principio, el método no debería presentar dificultades si se efectuaran los procesos de beneficio adecuadamente en el tiempo correcto y si se conociera con exactitud la humedad del café que se está comercializando, para que se calculara sobre

esta base, el peso real del café pergamino seco que se va a obtener. No obstante, se han presentado muchas dificultades; el caficultor normalmente recibe un pago inadecuado y se han deteriorado grandes cantidades debido a las demoras excesivas, antes de que se de inicio al secado del café.

Un estudio realizado en Santa Rosa de Cabal en 1986, por parte del Comité de Cafeteros de Risaralda y la Subgerencia General Técnica de la Federación de Cafeteros indicó que las causas de deterioro de la calidad en taza detectadas en esa región, estaban relacionadas con el hecho de que el 63% esperaban para lavarlo más de dos días después de terminar el proceso de fermentación.

Es corriente en éste método de comercialización, que se le pague al caficultor el valor del café pergamino seco estimado según el café lavado considerado. El factor utilizado que impone el vendedor es que el **café pergamino seco pesa la mitad** que el café pergamino lavado. En la Tabla 52 se presentan los cálculos para determinar el resultado real de la comercialización del café lavado, asumiendo diferentes valores de humedad que el café posee en el momento de efectuarse la transacción.

Para los valores de humedad que el café normalmente debe poseer (52 y 48% de humedad, en base húmeda), el caficultor pierde si se asume que la mitad de su café lavado va a convertirse en café pergamino seco, entre el 8 y el 17% del peso de su café. Si el caficultor vende su café con un valor del 40%, o sea, seco de agua, pierde el 34,8% de su producto. De otro lado, si el café está más húmedo de lo normal, por ejemplo con 56%, el caficultor puede ganar el 1,1% en la transacción.

Los valores correspondientes a la primera fila (contenido de humedad del café durante la transacción) y la última fila (porcentaje del **valor que pierda, o gana**) se presentan en la Figura 116.

Además, como es práctica común indeseable que el caficultor guarde su café durante varios días, acumulándolo hasta una semana antes de venderlo, sus pérdidas aumentan considerablemente por el deterioro y por los sólidos que se consumen durante la respiración del grano.

Tabla 52. Pérdidas o ganancias por comercialización del café lavado*.

Humedad Inicial, b.h. %	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
Humedad final, b.h. (%)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Masa inicial producto (g)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Pago según mitad del peso (g)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Materia seca al inicio y al final (g)	60	58	56	54	52	50	48	46	44	42
Masa agua final (g)	7,4	7,2	6,9	6,7	6,4	6,2	5,9	5,7	5,4	5,2
Masa final producto (g)	67,4	65,2	62,9	60,7	58,4	56,2	53,9	51,7	49,4	47,2
Relación masa final / masa pagada	1,35	1,30	1,26	1,21	1,17	1,12	1,08	1,03	0,99	0,94
Pérdida en venta (%)	34,8	30,3	25,8	21,3	16,9	12,4	7,9	3,4	-1,1	-5,6

* Se asume que el café pergamino seco es un 50% en peso del café lavado.

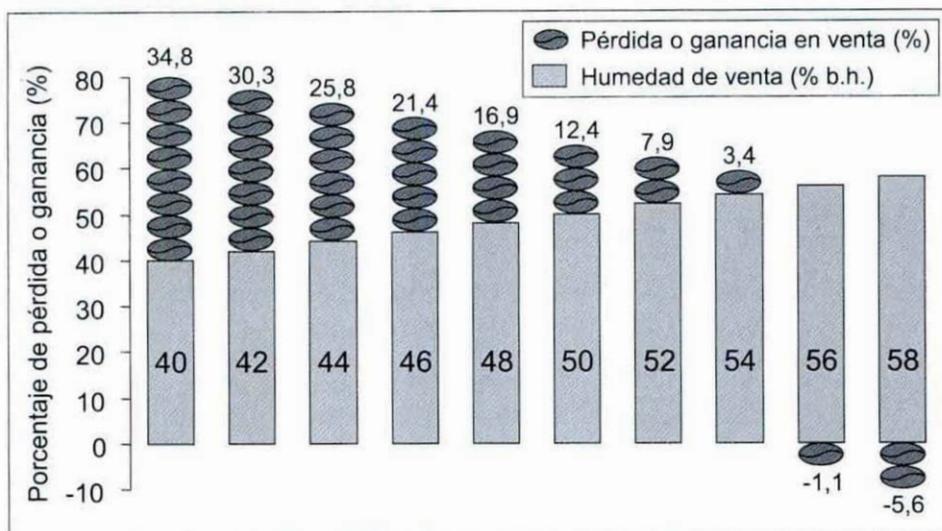


Figura 116. Pérdida o ganancia en la venta del café lavado, al recibir la mitad del peso como equivalente a café pergamino seco.

A pesar de que ocurren éstas pérdidas grandes para el caficultor, la mayor pérdida la tiene el país productor, porque mediante este proceso es común que el café no se seque antes de 48 horas de iniciada la fermentación, cuando la calidad de la bebida se empieza a deteriorar aceleradamente (93), obteniéndose café no apto para la exportación.

5.4. DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE PESO POR LA PERMANENCIA DEL CAFÉ HÚMEDO

El café es un fruto perecedor en el que ocurren después de la maduración completa y aún en el árbol, procesos fisiológicos de degradaciones escalonadas.

También en el proceso del beneficio del café se pueden ejecutar labores de larga duración, en donde el grano de café permanece bajo condiciones de humedad alta, causándose pérdidas finales de calidad y de peso.

5.4.1. Revisión de literatura

Sivetz y Foote, citados por Vásquez e Hidalgo (179) afirman que las pérdidas de peso en el grano de café se deben al metabolismo normal y a la respiración, formándose productos volátiles, CO₂, agua y el lavado de los sólidos. Además, pérdidas de peso de 1,94% en café que ha sido sometido a un tiempo de espera de 18 horas antes de iniciar su secado.

Vásquez y Montero (180) registran pérdidas de materia seca en peso de 0,56%, en café húmedo que ha sido demorado 12 horas para iniciar su secado.

Vásquez e Hidalgo (179) encontraron pérdidas de peso de 1,94% en café sometido a un tiempo de espera de 18 horas, antes de iniciar su secado.

Boyce (26), pérdidas de 3,9%, Coste (54) del 2% y Barbosa (21) pérdidas de peso de 0,02% por hora de fermentación,

Carbonel y Vilanoba (31) pérdidas de peso de hasta 19% durante la fermentación, (Tabla 53)

Varios autores, citados por Boyce (26), encontraron pérdidas de peso durante el proceso de fermentación, (Tabla 54).

5.4.2. Ensayos experimentales sobre pérdida de peso

En el año de 1990 se realizaron en Cenicafé (8) tres pruebas sobre la fermentación del café despulpado sin agua en condiciones ambientales y bajo condiciones de temperatura controlada a 30°C con el propósito de estudiar las variables que rigen el proceso como, la temperatura del grano, su pH, los sólidos solubles, las pérdidas de peso y el tiempo de fermentación. Así mismo, se estudió la influencia del ácido cítrico y del azúcar en el proceso de fermentación y la influencia de distintos recipientes y alturas de capas en función del tiempo, el porcentaje de fermentación y las temperaturas del grano y del ambiente.

Para cada una de las tres pruebas se tomaron muestras de café de 5kg provenientes de despulpado sin agua, distribuidas en bolsas plásticas para cada período de fermentación considerado: 0, 4, 8, 12, 16, 20 y 22 horas.

Tabla 53. Pérdidas de peso del café durante el proceso de fermentación según Carbonel y Vilanoba (32).

Tiempo de fermentación (horas)	Pérdida de peso (%)
20	1,7
24	2,0
28	5,6
44	9,0
12 - 60	2,5- 3,5

Tabla 54. Pérdidas de peso del café durante el proceso de fermentación según Boyce (27).

Autor	Pérdida de peso (%)
Jones and Baker	3,9
Banel	3,0
Welleman	3,0
Foote	2,8
Foote	5,6 (bajo agua)

Se observó el siguiente comportamiento con referencia al proceso de fermentación del mucílago: a las doce horas de iniciado el proceso la eficacia de solubilidad del mucílago es del 98% y está indicada por el buen lavado del grano. La ausencia de agua en el despulpado aceleró el proceso de fermentación pues a las primeras cuatro horas de iniciado se observó el 88% de solubilización del mucílago.

El tratamiento de fermentación natural mostró porcentajes de **pérdidas de materia seca** en el rango 0,23 y 0,46 durante las primeras 16 horas; a las 20 horas se registró una pérdida de 1,76%.

5.5. MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO CEREZA/PERGAMINO

5.5.1. Método CERPER

Se han utilizado tradicionalmente dos métodos en la comercialización del café cereza, para determinar el rendimiento: uno por vía húmeda y el otro por vía seca; el método de la vía húmeda es el más utilizado.

En el proceso por vía húmeda se toman 1.000g de una muestra del lote de cereza, se sumergen en agua para separar el material que flota del que se sedimenta. De los flotes se considera como café bueno el 50% de los frutos con apariencia normal, asumiendo que poseen una almendra sana y otra vana. El peso de los frutos verdes, secos y enfermos extraídos manualmente del material sedimentado, se suma al peso de la pasilla del material flotante para totalizar el porcentaje de pasilla. Con este valor y mediante una tabla desarrollada empíricamente, se encuentra el factor de conversión de café cereza a café pergamino seco.

5.5.1.1. El método CERPER original

La metodología CERPER (relación cereza / pergamino) (79) consiste en determinar dicha relación en muestras de lotes de café cereza sometidas a un beneficio rápido (aproximadamente media hora), basado en el despulpado sin agua, el desmucilaginado mecánico del café realizado en un desmucilagador de laboratorio, y en la determinación del contenido de materia seca de la muestra de café lavado utilizando el determinador de humedad directo, CENICAFÉ MH-2 (Sección 4. 2.).

La determinación de las pasillas se realiza después de despulpar la muestra, separando los granos guayabas, mediacaras, verdes, y los flotes y espumas obtenidos en el lavado de la muestra de café. Se determina entonces el peso del café lavado y el contenido de pasillas de la muestra.

El procedimiento físico utilizado es el siguiente (Figura 117): Se despulpa la muestra de café cereza sin agua en una despulpadora de laboratorio de cilindro horizontal No. 1-1/2, calibrada adecuadamente para cumplir las normas ICONTEC (85) de

calidad del despulpado. El café en baba se tamiza en una zaranda plana de lámina troquelada con perforaciones oblongas de 7-8mm de ancho, para separar el café guayaba, el mediacara y el verde. La pasilla separada se pesa para determinar el porcentaje en la muestra.

El café lavado y sin espumas se escurre en un recipiente con malla durante un minuto; luego se pesa y se extraen dos muestras de 100g. Una muestra se utiliza para determinar el contenido de humedad utilizando el medidor de humedad CENI-CAFÉ MH-2. Con el peso del café lavado de la otra muestra y el contenido de humedad del mismo, se calcula el peso del café pergamino seco al 11% en base húmeda, para luego establecer su rendimiento, relacionando la muestra de cereza inicial y el café pergamino seco calculado al 11%.

En la Figura 118 se observan los **rendimientos** determinados utilizando el método CERPER, aquellos calculados por los métodos tradicionales comparados con el rendimiento real obtenido del beneficio del café, realizado tal como se efectúa comercialmente. La línea recta representa el comportamiento ideal, cuando el rendimiento estimado por la metodología es igual al rendimiento real encontrado al beneficiar el café comercialmente. Se demuestra que el método CERPER se ajusta más a la realidad.

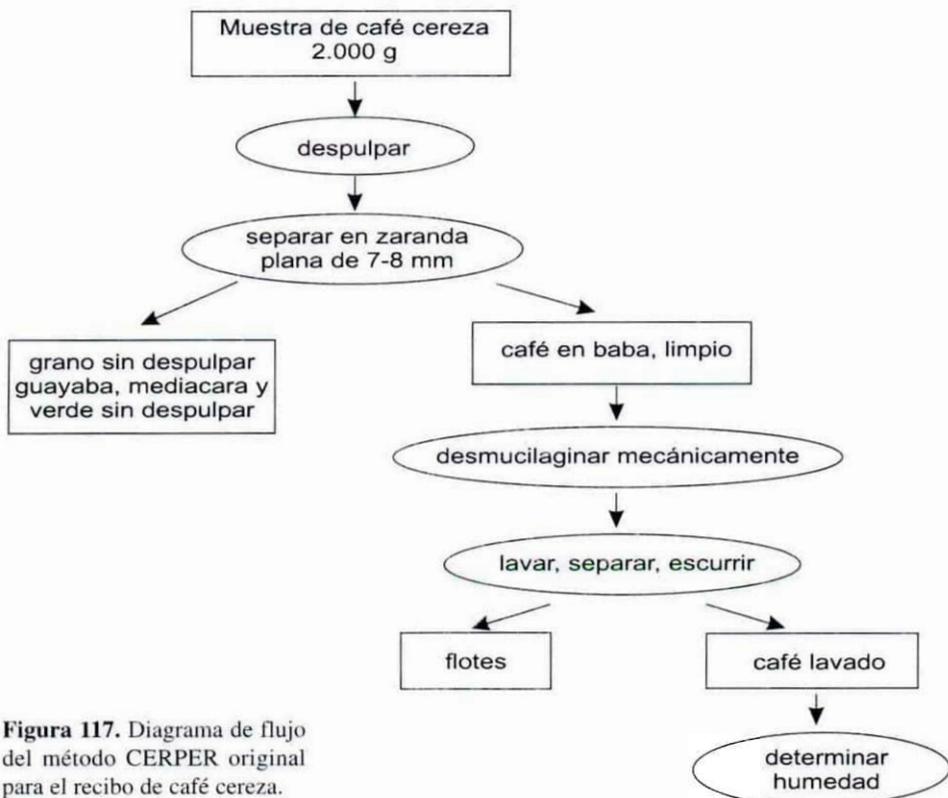


Figura 117. Diagrama de flujo del método CERPER original para el recibo de café cereza.

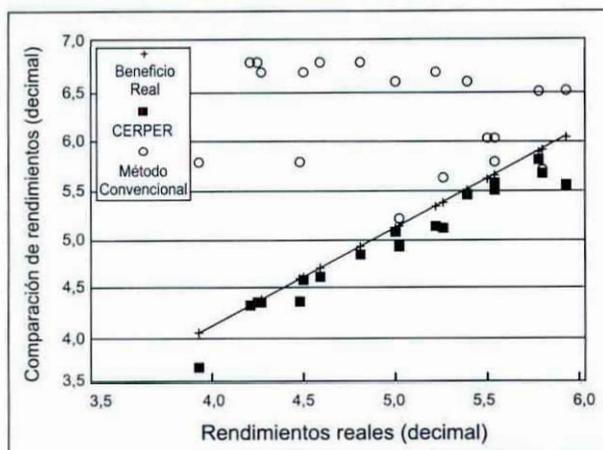


Figura 118. Valores de rendimientos determinados por los métodos de vía húmeda, vía seca y el método CERPER original, comparados con el rendimiento real.

5.5.1.2. Método CERPER modificado

La metodología CERPER fue modificada teniendo en cuenta las condiciones particulares del beneficio utilizado en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, que se efectúa en base a los desmucilaginadores mecánicos y a la presencia de los granos brocados (no existentes cuando se desarrolló la metodología del CERPER original). Estas consideraciones modifican significativamente el porcentaje de las pasillas y por tanto, el rendimiento en la conversión. La principal modificación consistió en determinar las pasillas después del desmucilaginado y no después del despulpado, en consideración a que el desmucilaginado modifica la calidad física de los granos. Para esto se separaron de la muestra de café desmucilaginado las pasillas, conformadas por los granos mediacara, frutos pequeños maduros y verdes sin despulpar y granos resacos pequeños, que representan aproximadamente la mitad de los valores reportados por el método CERPER original (8). Así mismo, el método CERPER modificado se calibró para estimar los daños por infestación de la broca del café. El desarrollo de la metodología se efectuó directamente en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma (CBEA).

En el método CERPER modificado se despulpa la muestra sin agua (Figuras 119 y 120), con despulpadora de cilindro horizontal No 1-1/2, debidamente calibrada para que cumpla con las Norma ICONTEC (85) sobre calidad del despulpado. El café se somete a desmucilaginado y luego se separan las pasillas manualmente, luego se lava la muestra de café y se extraen los flotes y espumas que se agregan a las pasillas resultantes. Se pesa el café y se sacan dos muestras de café lavado y escurrido, para determinar su humedad, utilizando el MH-2 (medidor de humedad diseñado por Cenicafé).

Una vez obtenido el peso del café lavado y su contenido de humedad, se calcula el peso final del café pergamino seco al 11% en base húmeda y se establece el rendimiento del café pergamino seco Tipo Federación obtenido.

Desmucilaginator
mecánico de laboratorio

Determinador de humedad
CENICAFÉ MH-2

Despulpadora No. 1-1/2



Figura 119. Desmucilaginator, Determinador de Humedad MH-2, Despulpadora. (Elementos del método CERPER modificado, Anserma, Caldas).

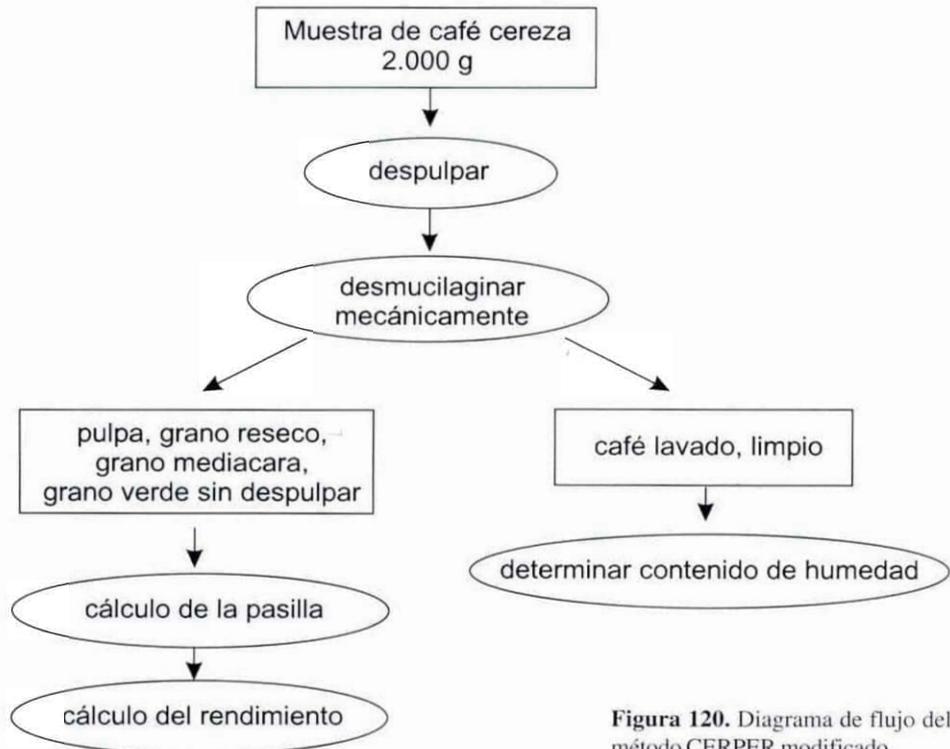


Figura 120. Diagrama de flujo del método CERPER modificado.

5.5.1.3. Método CERPER comercial en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma

Para confirmar la veracidad de predicción del método CERPER modificado se compararon los rendimientos de los cafés recibidos en la CBEA por tres métodos:

El método CERPER **modificado**, en la forma como fue descrito anteriormente; el **beneficio real**, tomando la muestra como se procesa realmente en la CBEA, o sea que el café desmucilaginado se seca mecánicamente hasta el 11% de contenido de humedad. Se mide su peso seco y se calcula el rendimiento real obtenido del café cereza procesado, al cual se le realiza el análisis de calidad en pergamino y almendra para llevarlo al peso seco de café pergamino Tipo Federación. **El método convencional, vía húmeda** utilizado por la Cooperativa, en el cual se determina el porcentaje de pasilla de la masa de café cereza total recibida, se calcula el factor de conversión según la tabla para recibo por vía húmeda y se obtiene el peso seco de café pergamino tipo Federación, encontrando el rendimiento de café respectivo.

Al observar los resultados en la Figura 121, los métodos CERPER modificado y el beneficio real, presentan una alta correlación que indica lo adecuado del método en la aplicación comercial. El 63,1% de las estimaciones están en el rango de rendimiento entre 4 - 5, el 26,3% en el rango de rendimiento entre 5-5,5 y solo un 10,5% en un rango de rendimiento mayor al 5,5, situación que dice de su bondad y aplicabilidad del método CERPER modificado en la CBEA.

Con relación al método de la vía húmeda se observa que el 63% de las estimaciones en el rendimiento se hallan en el rango de 5,5-6,5 y un porcentaje alto (36,8%) en un rango mayor a 6,5 lo cual indica que el método de la cooperativa estima por defecto la cantidad de café pergamino seco por parte del caficultor.

El pago que se le ofrece al caficultor sobre el café cereza que él entrega, se calcula según el café pergamino seco estimado; **una imprecisión al determinar el rendimiento** se refleja directamente de forma que por cada décima (punto decimal) en que difieran el rendimiento real y el rendimiento de compra estimado, se pierde o gana en promedio el 2,08% del café pergamino seco (79).

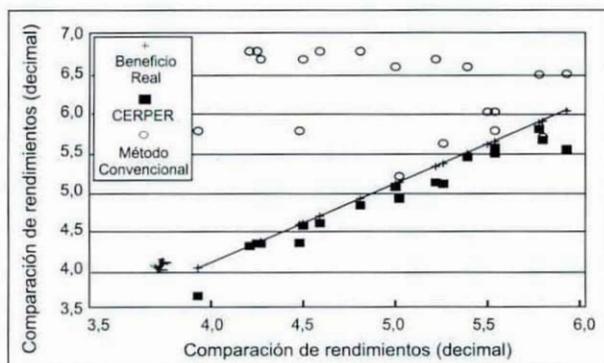


Figura 121. Comparación de rendimientos reales y estimados por dos métodos de cálculo evaluados en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma.

CAPÍTULO

Lombricultura con
Subproductos del Café



LOMBRICULTURA CON SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ ^{45, 46}

La lombricultura consiste en el cultivo intensivo de la lombriz roja *Eisenia foetida* en residuos orgánicos (62), sistema con el cual se pueden manejar adecuadamente los subproductos del beneficio de café (pulpa y mucílago). En Cenicafé se han venido desarrollando investigaciones con el fin de evitar y controlar la contaminación ocasionada por estos subproductos.

Las recomendaciones prácticas que se presentan en ésta sección, sobre la construcción de la infraestructura, manejo de la pulpa, del mucílago y del lombricultivo, se obtuvieron principalmente de la experiencia de Cenicafé en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, Caldas, en trabajo comunitario con la Cooperativa de Caficultores de Anserma y dos firmas comerciales, BIOAGRO de Colombia, Risaralda y Lombricultura MI JARDÍN, Risaralda (59).

6.1. INFRAESTRUCTURA.

6.1.1. Área necesaria

La pulpa generada por una finca que produce 12,5 ton (1.000@) de café pergamino seco al año (aproximadamente 25ton de pulpa fresca), se puede manejar en un área efectiva de 25m² de lombricultivo, trabajando con una densidad de lombriz pura de 5kg/m². Es decir, se puede manejar alrededor de una tonelada de pulpa por metro cuadrado al año (44, 59).

6.1.2. Camas o lechos

Las camas o lechos (Figuras 122 y 125), donde se realiza el proceso de lombricultivo pueden ser fabricadas con esterilla, guadua o ladrillo. Se construyen de 1m de ancho y de longitud, según la disponibilidad del terreno; en general, se acostumbran módulos de 2 a 3m de largo. La altura de la cama más usual es de 40cm. El espacio entre camas puede ser de 50cm.

⁴⁵ Preparado por Dávila A., M. T. Química Industrial y Ramírez G., C.A. Ingeniería Agrícola. Cenicafé.

⁴⁶ Las recomendaciones para el establecimiento y operación del lombricultivo presentadas en este capítulo son el resultado de las evaluaciones científicas realizadas en la Central de Anserma (Sección 3.19.3.5.) (59).

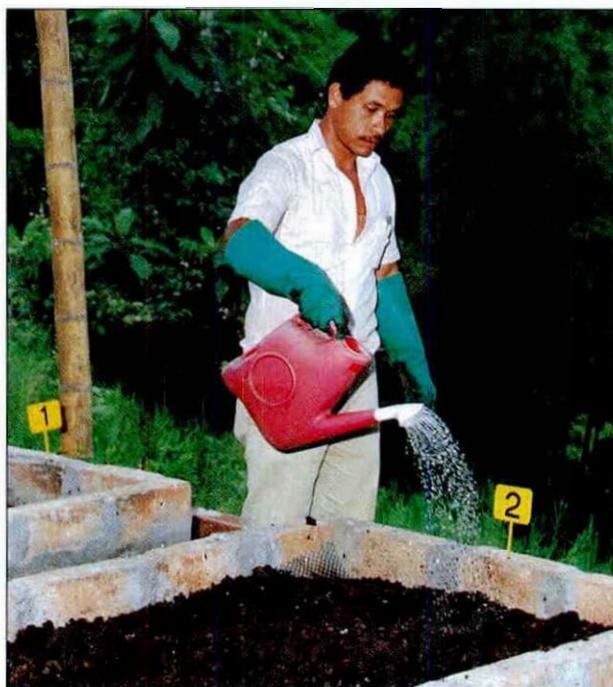


Figura 122. Lechos del lombricultivo irrigados con aguas residuales no controladas en el beneficio de café.

6.1.3. Pisos

En el interior de las camas se recomienda piso de cemento, tela plástica, esterilla o algún material que permita aislar el cultivo del suelo para evitar el ataque de posibles plagas (planarias, sanguijuelas y hormigas). El piso debe construirse con una pendiente entre el 2 y el 5% para evitar la inundación de la cama cuando se utiliza riego.

6.1.4. Techos

El techo es indispensable porque evita que las lluvias laven la pulpa y el mucílago, perdiéndose el control sobre la contaminación. Además, proporciona sombra y mejores condiciones para el trabajo de la lombriz. También facilita la manipulación de los materiales (pulpa, lombricompuesto y lombrices). Puede construirse en teja de cartón o de zinc, a una altura de 2,50 a 3m.

6.1.5. Cerramiento

Es conveniente cerrar la caseta con polisombra o malla para evitar la entrada de aves y otros depredadores de la lombriz.

6.1.6. Siembra de la lombriz

La velocidad de transformación de la pulpa depende de la cantidad de lombrices; cuando se desea un proceso rápido, se puede utilizar una densidad de lombrices

alta: alrededor de 5kg de lombriz pura/m² (63), que corresponde aproximadamente entre 20 y 25kg de lombriz mezclada con sustrato (conocida como lombriz comercial).

Debido a que la lombriz roja es un animal muy prolífico, no es conveniente empezar el lombricultivo con la cantidad total de lombriz necesaria; preferiblemente se aconseja multiplicarla en la propia finca. Para el caso de una finca de 12,5 ton (1.000@) se necesitarían en total 125kg de lombriz pura (aproximadamente 625kg de lombriz comercial). Si el lombricultivo se inicia con un **20% de la cantidad total de lombriz necesaria** (25kg de lombriz pura, es decir 125kg de lombriz comercial), en **dos años ya se puede tener el tamaño necesario de lombricultivo** para manejar toda la pulpa de la finca.

6.2. SISTEMA DE SIEMBRA

El lombricultivo se inicia depositando el pie de cría en las camas, asegurándose que esta capa inicial sea aproximadamente de 10 a 15cm; para completar esta altura se puede depositar en el fondo de la cama, pulpa descompuesta y luego colocar encima el pie de cría. Así se asegura que la lombriz roja disponga de un medio para refugiarse, si las condiciones del alimento no son adecuadas.

Para conocer la cantidad de lombriz pura inicial depositada, es conveniente hacer un **muestreo** (44) así: se pesa todo el sustrato con lombriz, se toman tres muestras de un kilogramo de cada cama, se colocan a la luz sobre un plástico hasta observar que las lombrices se concentran en el fondo; luego se pesan las lombrices de cada muestra y se calcula un promedio por kilogramo. Como se conoce el peso total del sustrato, se multiplica por este valor para conocer el peso inicial de lombriz pura. Después de realizada la siembra se continúa alimentando periódicamente.

6.3 MANEJO DEL LOMBRICULTIVO

6.3.1. Sustrato alimenticio

Se puede utilizar pulpa de café sola, obtenida por un beneficio tradicional o mezclada con mucílago; esta última proveniente de beneficiaderos que utilicen despulpado sin agua, desmucilaginado mecánico y mezcla de los dos subproductos por medio de un tornillo sinfín.

En lombricultivos alimentados con este último sustrato y remojados con agua de lavado de café, se han observado mayores incrementos en peso de lombrices, mayores tasas de consumo y mayores rendimientos en la conversión de pulpa en lombricompuesto que en aquellos alimentados con pulpa sola y remojados con agua limpia (43, 144).

Debe tenerse precaución con el uso de sustratos contaminados, como la pulpa tratada con insecticidas químicos para el control de la broca del café; en este caso es necesario esperar por lo menos 15 días para llevarla al lombricultivo (58).

6.3.2. Almacenamiento temporal del sustrato.

Para mantener el lombricultivo con alimentación constante se debe tener una fosa cubierta (Figura 123) que permita la disponibilidad de pulpa en las épocas fuera de cosecha de café. La **capacidad de la fosa** depende de la distribución de la cosecha y del volumen de producción deseada. Para la máxima capacidad se debe almacenar toda la pulpa producida en la cosecha principal y se debe consumir completamente antes del inicio de la cosecha principal del año siguiente. El lombricultivo puede alimentarse con pulpa hasta de una semana, que no esté caliente, pero es más práctico utilizar la que tiene mayor tiempo de almacenamiento en la fosa.

6.3.3. Sistema de alimentación

Se utilizan capas delgadas de alimento (máximo 4 cm), para evitar el calentamiento de éste cuando se usa muy fresco y facilitar la aireación del cultivo, asegurar la transformación del material y mantener las lombrices alimentándose en la parte superior (62). Se ha observado que es posible estimular la reproducción utilizando el cambio de alimentación o la mezcla de pulpa con otros residuos disponibles en la finca, como estiércol de diferentes especies animales (vacuno, porcino, equino) o residuos de otros cultivos.

6.3.4. Frecuencia y cantidad de alimento

Se puede alimentar **una o dos veces por semana**, dependiendo de la densidad de lombrices y el tipo de alimento. En Cenicafé se acostumbra efectuar la alimentación con pulpa de café, una vez por semana. La cantidad de alimento está relacionada



Figura 123. Almacenamiento de pulpa mezclada con mucilago de café en la fosa cubierta, materia prima para el lombricultivo en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma, Caldas.

directamente con el consumo por parte de la lombriz; considerando que se han observado consumos equivalentes a la mitad del peso de lombrices por día (42), camas con 5kg de lombriz pura/m² se deben alimentar con una cantidad de 17 a 20kg de pulpa, aproximadamente. Es altamente recomendable llevar registros de la alimentación y del funcionamiento general del lombricultivo.

El alimento se prepara antes de llevarlo a las camas de lombrices, remojándolo si es necesario hasta que, estando totalmente humedecido, no drene. Esto corresponde aproximadamente a un rango de 80 a 85% de humedad. También se deben **remoj**ar las camas para conservar esta humedad; este riego puede hacerse preferiblemente con aguas residuales del beneficio. Dependiendo de las condiciones ambientales y del espesor de la capa de sustrato con lombrices puede hacerse un riego de máximo 1L/m²-día, pero es preciso observar que no ocurra inundación (44) (Figura 122).

De acuerdo con estudios realizados, la contaminación total controlada en el proceso BECOLSUB con la utilización adecuada de la pulpa en lombricultivos, más la práctica de adicionarle mucílago concentrado a la pulpa y con los riegos de los lombricultivos con parte de las aguas de lavado, puede estimarse en un 92% (43, 144).

6.4. RECOLECCIÓN DE LOS PRODUCTOS

La separación de la lombriz (Figuras 124 y 125) y la cosecha del lombricompuesto (Figura 108) se puede hacer dos o tres veces al año, dependiendo de la velocidad de descomposición de la pulpa. Cuando el sustrato llega a la altura máxima de la cama se **suspende la alimentación** y el riego durante una semana, para obligar a las lombrices a consumir todo el material que no se ha transformado; a la semana siguiente se extiende una malla plástica sobre la cama y se alimenta de nuevo; una semana después se retira la malla con la capa superior donde ha subido la lombriz.



Figura 124. Lombrices en preparación para la recolección en el lombricultivo.

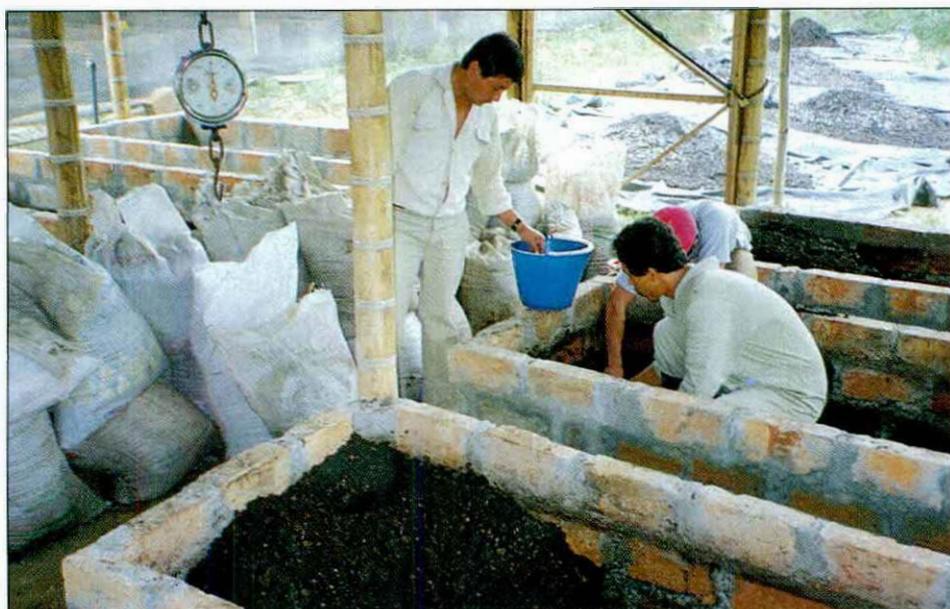


Figura 125. Recolección del abono orgánico, resultado del lombricultivo con pulpa de café.

Dependiendo de la cantidad de lombrices puede ser necesario repetir esta operación hasta tres veces (44).

6.4.1. Incremento de lombrices. Secado solar

Para conocer la cantidad de lombrices separadas, se realiza un muestreo en la misma forma como se indicó para conocer el peso inicial, cada vez que se retira la malla con sustrato y lombrices. Se puede entonces calcular el incremento en el peso de lombrices así: $(\text{peso final de lombrices} - \text{peso inicial de lombrices}) / \text{peso inicial expresado en porcentaje}$ (44).

Las lombrices separadas se utilizan para ampliar el cultivo, como pie de cría para nuevos lombricultivos o como fuente de proteína para alimentación animal (72, 148).

Al terminar la separación de las lombrices se procede a retirar el lombricompuesto de la parte inferior de la cama, el cual puede utilizarse con la humedad que se obtiene (alrededor del 80%) o rebajarle la humedad hasta máximo el 50%, con la cual usualmente se comercializa (44). Para esto se pueden utilizar secadores solares, como el tipo parabólico usado para secar café (Sección 4.6.2.), construido en guadua y plástico mediante estructuras mejoradas por Cenicafé (Figura 126).



Figura 126. Secado del abono orgánico en un Secador Solar Parabólico.

6.4.2. Rendimiento en la producción de lombricompuesto

El rendimiento en la producción del lombricompuesto húmedo (aproximadamente el 80% de humedad), se puede calcular así: (Cantidad de lombricompuesto retirado - cantidad de lombricompuesto con el pie de cría)/cantidad de pulpa utilizada expresada en porcentaje (44).

En general, los rendimientos en la producción de lombricompuesto se ubican en el rango de 35 a 40% en base húmeda (42, 43, 44, 59). Para una finca de 12,5 ton (1.000@) de café pergamino seco al año (aproximadamente 25ton de pulpa/año), se puede tener una producción de unas 9 ton de lombricompuesto húmedo fresco al año.

El lombricompuesto obtenido se utiliza como abono en huertas, viveros, etc. (72). En Cenicafé se ha encontrado que la mezcla de una parte de lombricompuesto con tres partes de suelo es la más adecuada para la preparación de almácigos de café (162).

De acuerdo con estudios preliminares adelantados por expertos que evalúan económicamente el programa de beneficio ecológico del café, se ha demostrado la rentabilidad de incluir el sistema de lombricultura para el manejo de los subproductos (23) (Capítulo 7).

CAPÍTULO 7

Rentabilidad del Beneficio Ecológico

Características Económico-Financieras

Valor	Unidades	Nombre	Valor	Unidades
5	(Años)	Intereses	0,3	(decimal)
50	(\$)	PrecioCPS	31 025	(\$/@CPS)
70	(\$/KWH)	PrecioLomb	1 000	(\$/@Lomb)
20	(\$/kgCC)	TasaAMOEM	0,15	(decimal)
50	(\$/KgLomb)	TasaDesc	0,34	(decimal)
4 000	(\$/Jornal)	TasaMant	0,04	(decimal)
0,1	(decimal)	TasaSubs	0	(decimal)
0,27	(decimal)	VidaUtil	10	(Años)

Efectuar Análisis

Glosario

Ayuda

Salir



RENTABILIDAD DEL BENEFICIO ECOLÓGICO ⁴⁷

7.1. BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA TECNOLOGÍA NO CONTAMINANTE

Los proyectos de descontaminación de las aguas en países en desarrollo en forma general, o no se realizan, o se ejecutan parcialmente y con muchas demoras. Los costos de los proyectos se consideran muy altos y el agente que contamina normalmente no acepta su compromiso de mantener inalterado el medio ambiente. Las leyes del estado, aunque existen, la mayoría de las veces o no se aplican o no se ejecutan con el rigor necesario.

La tecnología BECOLSUB hace innecesarias las labores de descontaminación de las aguas que se contaminaban por utilizar las técnicas tradicionales de beneficio, porque simplemente no se contaminan, o esto ocurre en menos del 10%, con relación a las tecnologías convencionales.

Es muy poco frecuente encontrar soluciones para mantener la calidad del medio ambiente sin efectuar grandes inversiones y menos común, que la solución a la contaminación genere utilidades, como las demostradas en este estudio.

En efecto, en la tecnología BECOLSUB, se hacen inversiones relativamente pequeñas y se obtienen ventajas adicionales por el valor que representa el lombricompost y la proteína animal de la lombriz, de gran uso real y potencial para muchas fincas, y lo que es más importante, porque se evitan pérdidas físicas de café del orden del 4,5%, pérdidas que tradicionalmente se han aceptado como un desperdicio necesario para obtener café pergamino de excelente calidad.

En particular, la adopción del beneficio no contaminante del café presenta un gran número de ventajas físicas, que pueden cuantificarse en ventajas económicas por las siguientes razones:

- Debido a la reducción del consumo de agua de 40 a aproximadamente 0,6L/kg de cps.

⁴⁷ Preparado por Roa M., G. Ingeniería Agrícola, CENICAFÉ.

- Por el mejoramiento de la calidad del agua para el consumo humano y el consumo animal.
- Por la eliminación de la necesidad de pagar multas al gobierno por la contaminación de las aguas.
- Por el valor del lombricompuesto obtenido con un sustrato enriquecido, y más abundante, que a su vez genera mayores rendimientos de lombricompuesto en menor tiempo. Así mismo, por la facilidad del manejo manual del lombricompuesto que pesa menos, no se aglomera, y no genera olores indeseables.
- Por la mayor durabilidad de las estructuras civiles para manejar la pulpa sin exceso de agua.
- Por la reducción de las pérdidas de materia seca que son del orden del 1,5% por evitar la respiración y la lixiviación en los tanques de fermentación y del 3% por la transformación de aproximadamente el 60% de los granos pasillas, (media cara y guayaba) a café Tipo Federación.
- Por la disminución de la mano de obra en el proceso global.
- Debido a la disminución de las obras de infraestructura necesarias para el beneficio.
- Por el carácter portátil del sistema.

7.2. GENERALIDADES SOBRE LAS EVALUACIONES ECONÓMICAS DE INVERSIONES

Una de las características de las Ingenierías, que las identifica claramente dentro de otras áreas de la actividad humana, es que los resultados de sus aplicaciones modifican el ambiente que los seres comparten.

Siempre existe un riesgo de que las obras de ingeniería que se realicen, a pesar de los análisis efectuados que les antecedieron, resulten en equivocaciones, porque el futuro no se puede predecir con exactitud. La **teoría de costos** permite considerar las posibles mejores alternativas tecnológicas, para tomar las decisiones apropiadas, disminuyendo al máximo los riesgos involucrados.

La evaluación económica de proyectos es muy general porque se puede aplicar a todos los conceptos de la vida real, en donde se invierte dinero. El concepto de la evaluación económica de la inversión es inherente a toda posibilidad de modificación del ambiente por parte de cualquier obra de ingeniería.

La **ingeniería económica** es una área de estudio técnico que colabora para que se tomen las mejores decisiones y se define como: “**el estudio del conjunto de conceptos y técnicas cuantitativas de análisis, útiles para la evaluación y com-**

paración económica de alternativas relativas a sistemas, productos, servicios, recursos, inversiones, equipos, etc., para lograr decisiones que seleccionen la mejor o mejores posibilidades entre las que se tienen en consideración”.

El tema no es solamente estudiado por los ingenieros, sino por economistas, contadores, banqueros, financieros, administradores, inversionistas, etc. El nombre de Ingeniería Económica, como se ha definido también se conoce como los nombres de **matemáticas financieras, ingeniería de proyectos, análisis de inversiones, evaluación financiera de proyectos, evaluación socioeconómica de proyectos, estudios de factibilidad, planes de negocio**, según el área de conocimiento de donde provengan los estudios.

De las varias propuestas tecnológicas que los ingenieros presenten solo son posibles, aquellas consideradas **económicamente viables**. Además, deben cumplir con otros compromisos de carácter social o de conveniencia política, para que finalmente sean ejecutadas.

Cuando no se efectúan con buen juicio los análisis económicos de las inversiones y se construyen las obras, o se modifican o sustituyen los equipos de alguna empresa, después de algún tiempo, normalmente se demuestra con los resultados reales funestos, el real resultado económico de la decisión tomada.

Así como el ingeniero utiliza los conceptos matemáticos para el diseño, cálculo de las obras y de los equipos, es muy conveniente que el propio ingeniero utilice las mismas herramientas matemáticas para efectuar el análisis económico correspondiente para indagar sobre la factibilidad económica de su propuesta. En general, las matemáticas necesarias para efectuar estos cálculos generales son mucho más sencillas que las que normalmente utiliza para los cálculos afines a su profesión.

No obstante, aunque los cálculos de la factibilidad económica son, en forma general, muy sencillos, no lo es así la **conceptualización del análisis económico** de la inversión, que puede incluir supuestos y simplificaciones económicas muy particulares, con relación a las variables que intervienen en el análisis. Solo los buenos especialistas, basados en las teorías económicas y en su experiencia pueden estudiar y definir algunos casos particulares. En particular, en el planteamiento económico no se permite que se ignoren algunas variables claves, de mucha importancia, que pueden ser determinantes en el éxito de la decisión.

De otro lado, la obra en consideración puede incluir otros aspectos que no son de estricto origen tecnológico o económico, como las variables financieras (posibilidad y costo de la consecución de los recursos necesarios), las ecológicas, las comerciales, las legales, y otras de aún más difícil cuantificación, como las humanas, sociales y políticas.

En el caso de la tecnología BECOLSUB, si se recoge la opinión de especialistas en el análisis económico de inversiones ambientales (23), de los directivos de la Fed-

ración de Cafeteros de Colombia, especialistas agrícolas, instituciones científicas⁴⁸, instituciones comerciales⁴⁹, extensionistas y fabricantes, se concluye de manera preliminar que no existen variables o consideraciones que puedan demostrar desventajas determinantes en la modificación de la tecnología convencional del beneficio por medio de la tecnología BECOLSUB.

Los resultados de los análisis económicos, aunque sean bien planeados, bien desarrollados y bien ejecutados **no pueden ser mejores que la información que les sirvió de base**, y de los supuestos que se establecieron como verdaderos. El análisis económico, como cualquier modelo matemático, aunque perfecto pero ejecutado con base a informaciones incorrectas o con suposiciones inválidas, dará necesariamente resultados incorrectos.

Muchos son los parámetros y variables que influyen en la evaluación de los costos en el beneficio del café. Tradicionalmente se ha dificultado la evaluación de estos costos por la muy poca precisión que se tiene sobre la conceptualización de ellos y porque no se han efectuado los suficientes estudios. Es por tanto importante que antes de que se efectúe un análisis de la factibilidad de la tecnología BECOLSUB se le compare con evaluaciones económicas realistas del sistema de beneficio tradicional.

Los análisis económicos se pueden simplificar, cuando los procesos incluyen algunas tecnologías comunes y es entonces posible eliminar las formulaciones que corresponden a estas características. Este es el caso de la comparación de las tecnologías del beneficio convencional y BECOLSUB, en las cuales las variables como el secado de los granos, el transporte del café al beneficiadero y aún, el transporte del café cereza y del café lavado dentro del beneficiadero, son operaciones comunes. Se deben considerar entonces solo los procesos del beneficio que evidencian diferencias reales.

El proceso metodológico de la evaluación económica debe empezar por la caracterización de la situación en análisis; sólo cuando se tiene claridad completa sobre los escenarios técnico y económico adecuados, se pueden definir las necesidades de información, elaborar los modelos con los supuestos requeridos, definir el tipo de criterio decisorio y, finalmente, escoger la herramienta de ejecución específica que mejor se adapte a la situación de análisis.

⁴⁸ El Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología «Francisco José de Caldas» – COLCIENCIAS, en 1996 premió y catalogó como “Grupo de Excelencia en Investigación” al Programa de Postcosecha de Cenicafé, por el desarrollo de la tecnología BECOLSUB.

⁴⁹ El Banco de Occidente concedió el Primer Premio, dentro de la especialidad de Categoría Empresarial, del CONCURSO “PLANETA AZUL” al Programa de Postcosecha de Cenicafé, por el desarrollo de la tecnología BECOLSUB, en 1997.

7.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DEL PROGRAMA DE BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ

Con la finalidad de cuantificar económica y financieramente el **Programa de Incentivos para Transformación a Beneficiaderos Ecológicos** (69), creado por la Gerencia Técnica de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia en Octubre de 1994 (para fomentar la tecnología desarrollada por Cenicafé), se contrató con la Universidad de los Andes el estudio, a través del Programa de Magister en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Durante la evaluación de la fase inicial del programa, 1994–1995, el equipo de UNIANDES entrevistó a 370 caficultores en todos los Comités de Cafeteros del país, la mitad de ellos adoptantes de la nueva tecnología; entrevistó a los directores técnicos de dichos Comités, a los ingenieros de beneficio y extensionistas.

Se desarrolló por parte del grupo de UNIANDES un programa de software de análisis económico y financiero denominado “**Calculador de Costos y Beneficios del Beneficio Ecológico**”.

Después de haber evaluado el programa numerosas veces, con la colaboración y participación de los representantes de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, relacionados con el programa de Beneficio Ecológico, el equipo de UNIANDES concluyó que la inversión era rentable para la mayoría de los cafeteros. En el estudio se encontró que la inversión se podría pagar en uno, dos o tres años, y que el modelo BECOLSUB que contiene la tecnología optimizada, el cual sólo se implantó al final de esta primera etapa en 1995, debería ser la tecnología básica adoptada por el caficultor (23).

El programa de computador generado incluyó los datos básicos para establecer los costos comparativos del beneficio convencional y del beneficio con el módulo BECOLSUB, de acuerdo a los datos físicos y de costos suministrados por Cenicafé, y los costos de inversión para la remodelación de los beneficiaderos suministrados por la Gerencia Técnica de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

El programa incluye formulaciones de costos y de finanzas para calcular las utilidades marginales o adicionales, por incluir ganancias introducidas por el beneficio ecológico originadas en mayor venta de café, mayor producción de abono orgánico, ahorro de agua, las cuales se descuentan al valor presente durante los años de la inversión.

7.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA MEDIANTE SOFTWARE DESARROLLADO EN CENICAFÉ. PROGRAMA ANEFSUB

El objetivo principal de desarrollar el programa ANEFSUB en Cenicafé, que inicialmente se fundamenta en los datos de laboratorio y en muy limitadas mediciones

reales al nivel de finca, es el de establecer una base de desarrollo que deberá ser aumentada, cada año, con nuevos conocimientos obtenidos con la ayuda de los expertos en el área económica y nutrido de datos reales de operaciones comerciales, para finalmente poder dar las respuestas de la forma más cercana a la realidad de cualquier cafetero, mediante las simulaciones matemáticas obtenidas.

En particular, se deberán obtener y validar datos experimentales obtenidos en fincas de diferentes tamaños, desde el caficultor que utiliza el módulo BECOLSUB 100 hasta el gran empresario que utiliza varios módulos BECOLSUB 3000, en las diferentes regiones productoras del país, que anteriormente utilizaban el beneficio convencional y pasaron a adoptar la tecnología BECOLSUB.

Un proceso de evaluación comparativa de una inversión de modernización, como es el de implantar la tecnología BECOLSUB, analizada económica y financieramente mediante el programa "ANEFSUB", incluye las siguientes etapas:

- Caracterización de las ventajas de la nueva tecnología.
- Establecimiento de los supuestos válidos para analizar las diferentes alternativas.
- Obtención de las informaciones técnicas, de costos, ecológicas, comerciales, legales, sociales y políticas, pertinentes.
- Definición del criterio decisorio; las evaluaciones económicas comparativas en la que se contempla una nueva alternativa se deben siempre efectuar con base en modelos que se construyen sobre un criterio decisorio.
- Desarrollo y evaluación del análisis mediante la creación del modelo matemático correspondiente.
- Discusión de los resultados.
- Desarrollo de estudios de simulación matemática y de análisis de sensibilidad.
- Toma de las decisiones correspondientes.

A continuación se amplía cada una de las etapas enumeradas:

Las ventajas en general de la tecnología BECOLSUB, en forma cualitativa se han presentado a lo largo de este trabajo y se enumeran en diferentes secciones de esta obra (3.10.7., 3.19.3.11. y 7.1.), Se ha aceptado de antemano que la tecnología BECOLSUB presenta ventajas técnicas, económicas, ambientales, sociales, comerciales y de política general.

Las ventajas técnicas, económicas y ambientales se han aceptado de antemano, en forma cualitativa por las presentaciones anteriores; se trata ahora de efectuar los análisis cuantitativos.

La principal **ventaja social** se desprende del hecho de que se libera parcialmente la mano de obra por la simplificación del proceso de beneficio en la época más crítica

de la producción de café, en la cual coinciden el beneficio y la cosecha. Esta última, la actividad de mayor demanda de mano de obra. El caficultor podrá, por tanto, disponer de más tiempo para realizar estas operaciones de manera más humana y más eficientemente y dispondrá también de mayor tiempo para realizar más oportunamente y en la mejor manera, la comercialización de su producto.

La principal **ventaja comercial** de la adopción de la tecnología BECOLSUB consiste en que por reducirse el volumen de los equipos necesarios, hasta una cuarta parte del valor tradicional, y ser construidos por la industria metalmeccánica no especializada, ha sido posible que los fabricantes construyan equipos compactos, de volúmenes manejables, incluyendo modelos portátiles, que pueden ser remolcados cómodamente en las topografías montañosas. El montaje de estos equipos, que no requiere de infraestructura sofisticada en ferroconcreto, facilita enormemente la comercialización de la tecnología.

La principal **ventaja política** de la nueva tecnología BECOLSUB consiste en que a Colombia se le podrá continuar conociendo como el **país líder en la conservación del medio ambiente cafetero**. En efecto, desde el inicio de la creación de Cenicafé, hace 60 años, el principal tema de investigación fue la **conservación de los suelos de la zona cafetera** (156).

Hoy se premia a los países e instituciones que logran desarrollar tecnologías no contaminantes. También se castiga a los que perturban el medio ambiente. Con la tecnología BECOLSUB, Colombia continúa enseñando al mundo cafetero como eliminar las principales causas del deterioro ambiental. Compañías multinacionales, que representan a los países compradores ya han comenzado a premiar a Colombia financiando equipos BECOLSUB para eliminar la contaminación en la región de Pijao, departamento del Quindío. También se constituyó en premio y distinción la asistencia de 25 técnicos extranjeros a un **Curso sobre Beneficio Ecológico del Café**, dictado por el Programa de Post-Cosecha de Cenicafé, en Octubre de 1995. La firma multinacional Jacobs de Alemania, decidió donar 100 equipos BECOLSUB para descontaminar la cuenca del río Paez, Quindío, en 1997 - 1998.

Cenicafé optó por desarrollar un modelo propio para el **ANálisis Económico-Financiero del módulo BECOLSUB**, programa ANEFSUB para el estudio de la rentabilidad de las inversiones necesarias para la transformación de los beneficiaderos convencionales a la tecnología BECOLSUB, por no tener en su momento acceso al programa original, de carácter privado y, principalmente, para poder utilizarlo en forma amplia en sus programas de investigación aplicada (6, 10, 145), con las ventajas de un software de programación moderno (Microsoft VISUAL BASIC 6.0, sistema operacional WINDOWS 98).

El modelo de Cenicafé se basa en el modelo original de la Universidad de los Andes, del cual se obtuvo la concepción metodológica y los supuestos económicos iniciales. La selección de los modelos económicos, el desarrollo de los algoritmos y

la programación, no obstante, fue realizada completamente por Cenicafé, utilizando los principios fundamentales de la teoría económica del análisis de inversiones (2, 78, 178).

El modelo se inició con base en los resultados técnicos de las evaluaciones del beneficio del café cereza para transformarlo en café lavado, realizadas bajo la dirección de los propios investigadores de Cenicafé, en experiencias conducidas en los laboratorios o en fincas seleccionadas. El desarrollo del programa tiene un carácter dinámico que se está modificando a medida que se generan datos de campo reales en fincas de caficultores, y según los diferentes programas de origen de los dineros (propios, subsidiados o financiados), a los cuales tenga acceso el caficultor.

El programa está escrito en forma general, amplia y de muy fácil modificación, de forma que facilita los estudios de factibilidad económica en todos los posibles rangos de las principales variables de interés. Se puede entonces obtener aproximaciones a cada uno de los casos específicos de cada caficultor.

Se considera que éste es el inicio de un gran esfuerzo que deberá compartirse entre los investigadores, generadores de la tecnología, los diferentes organismos que considerarán la opción de adoptar o recomendar la sustitución de equipos tradicionales del beneficio del café, y los caficultores.

7.4.1. Supuestos en el análisis económico de la inversión

Se presentan los siguientes supuestos como válidos para analizar económicamente las dos alternativas: continuar con el beneficio convencional o adoptar la tecnología BECOLSUB.

La inversión necesaria para colocar en funcionamiento la tecnología BECOLSUB es básicamente una **inversión de reemplazo** (178), por la cual algunos equipos convencionales de beneficio se sustituyen debido a que han llegado a ser tecnológicamente obsoletos y la posibilidad de modificarlos se considera inadecuada.

Las inversiones son de carácter de modernización, porque la sustitución de los equipos tradicionales por el módulo BECOLSUB se hace en consideración a que el último efectúa un trabajo superior, obteniéndose ventajas en productividad, disminución de costos, mejoramiento de calidad, disminución de la contaminación, etc.

En el caso de adoptar la tecnología BECOLSUB, se supone que se adopta el sistema de mezcla de mucílago con pulpa y la producción comercial de lombricompuesto.

Existen otras posibilidades fuera de las dos contempladas, como por ejemplo, continuar con el beneficio convencional y producir comercialmente el lombricultivo a partir de la pulpa sin el mucílago. El análisis económico de esta posibilidad podrá ser efectuado en el futuro modificando el programa ANEFSUB, sin ninguna dificultad.

Con éstas premisas la evaluación económica se hará comparando dos alternativas que producen **diferentes servicios**, que es el caso más general y frecuente en los análisis de inversiones o proyectos de la vida real. En los casos de evaluaciones de alternativas que producen diferentes servicios, tanto los ingresos como los egresos de la empresa deben ser tenidos en cuenta, a diferencia del caso en que las alternativas producen igual servicio, en el que se puede hacer un análisis correcto simplificado teniendo en cuenta solamente los egresos.

Las dos alternativas de beneficio en consideración son **mutuamente excluyentes**, o sea que no tiene sentido operar los dos procesos simultáneamente en la misma finca o empresa. Si se opta por la inversión del beneficio ecológico, el sistema convencional debe desaparecer.

Varias son las razones para este planteamiento; la primera es que si se procesa alguna parte sin el concepto ecológico, todo el beneficiadero se debe considerar como no ecológico y se desvirtúa el principal objetivo de la inversión. En segundo lugar, operar dos sistemas de beneficio implica tener y mantener dos infraestructuras diferentes, de diferentes tiempos de operación y más operarios para el proceso. En tercer lugar, al transformar un beneficiadero convencional en beneficiadero ecológico, lo más sensato es utilizar parte de los equipos como la despulpadora, los motores, y una parte de la obra civil para reducir los costos de inversión.

Se considera que los equipos de las dos alternativas de beneficio tienen la **misma vida útil**, por la similitud de sus materiales, de su construcción y de la infraestructura general en donde están ubicados. En las fincas cafeteras es tradición que las máquinas tengan una vida útil superior a los 15 años, debido a lo robusto de su construcción y a que las piezas desgastables se sustituyen periódicamente. Los costos de mantenimiento serán mayores para la alternativa ecológica por tener mayor número de equipos mecánicos.

7.4.2. Criterio decisorio

Por tratarse de dos alternativas que producen diferentes servicios, el criterio decisorio que nos permitirá indagar sobre cuál de las alternativas es la más ventajosa es el de **maximizar los valores netos** (178), que se explica con más detalle en las siguientes secciones.

En general los criterios decisorios económicos, y en este caso particular, el objetivo de maximizar los valores netos, operan sobre la siguiente igualdad, base de la factibilidad de cualquier inversión, y que se plantea para cada una de las alternativas de beneficio:

Ingresos = Egresos Producción de Café + Egresos Beneficio + Excedentes < 19 >

Los ingresos, para este caso, los constituyen los pagos que el caficultor recibe por la venta del café pergamino seco y del lombricompuesto; los egresos son todos los

gastos necesarios para la producción del café cereza y los necesarios para tener en plena operación el beneficiadero. En la Sección 7.4.5. se enumeran cada uno de los egresos, clasificados según su categoría económica.

Los excedentes deben existir para que el negocio sea económicamente factible y representan los intereses sobre el capital no amortizado que ha sido invertido en el negocio, más un dinero de ganancia adicional. Los excedentes deben ser computados con una tasa mínima (**tasa mínima de retorno**) que el inversionista determina, con base en los valores corrientes de los intereses comerciales y de sus pretensiones económicas. Si los excedentes corresponden a una tasa superior a la tasa mínima de retorno, la inversión será aún más rentable. Si los excedentes corresponden a una tasa inferior a la tasa mínima de retorno, más le hubiera convenido al caficultor colocar su dinero en otro negocio.

Al aplicar la ecuación < 19 >, para cada una de los dos sistemas de beneficio (convencional y BECOLSUB) y al establecer las diferencias de las expresiones, el término de egresos para la producción del café cereza se elimina por ser idéntico para los dos casos y la ecuación de análisis se reduce a considerar:

$$\begin{aligned} \text{Ingresos1} - \text{Ingresos2} = & (\text{Egresos Beneficio 1} - \text{Egresos Beneficio2}) \\ & + (\text{Excedentes1} - \text{Excedentes2}) \end{aligned} \quad < 20 >$$

Ecuación que compara los ingresos de las dos tecnologías de beneficio en un período dado de análisis. Si la diferencia de la expresión de la izquierda es positiva la alternativa económica 1 será la más rentable; el algoritmo determina que la tecnología BECOLSUB produce mayor cantidad de café Tipo Federación, dependiendo de las características de los sistemas, que pueden ser modificadas por el usuario.

En la diferencia de los egresos de los dos tipos de beneficio (primera diferencia del lado derecho de la ecuación) se incluyen todos los gastos, o costos, que deben ser considerados y que son de tipo fijo y variable.

Los gastos fijos y variables, considerados en el programa ANEFSUB se presentan en las Figuras 127, 128 y 129 (Sección 7.4.5.)

Las variables ingresos, egresos y excedentes en el beneficio corresponden a los valores acumulados en un período de análisis, que puede ser semestral, anual o de varios años, según el objetivo del análisis que se desea. Un período de análisis de 5 años es considerado conveniente en consideración a las inversiones iniciales de importancia que se hacen en el primer año de la adaptación de la tecnología BECOLSUB. Puede también el tiempo ser una variable del estudio, como por ejemplo, para averiguar en cuantos años se logra pagar la totalidad de la inversión, o los años en que se paga 2 o 3 veces la misma inversión (Figuras 134, 135 y 136).

7.4.3. Valor del dinero en el tiempo

Al evaluar la ecuación $< 20 >$ es necesario tener en cuenta que las variables toman lugar en todo el período de análisis considerado que por lo general, es de uno o varios años y en el cual el valor del dinero varía, por lo que no se puede usar un valor constante.

En efecto, el valor de cierta cantidad de dinero hoy es diferente al valor de la misma cantidad en el pasado o en el futuro, por básicamente tres razones :

- Por el concepto propio del **interés**, que representa directamente el cambio del valor del dinero en el tiempo, o sea, que el interés es un alquiler que se paga por el uso del dinero, para el que lo recibe prestado, o la tasa de retorno, desde el punto de vista del que lo presta.
- Internamente en el país, por la **inflación** (que tiene en nuestros países modificaciones cada mes).
- Por la **devaluación**, un factor externo que determina las variaciones relativas del valor de nuestra moneda con relación al de las monedas extranjeras fuertes, que también están cambiando, pero normalmente a tasas menores que las nuestras.

Las tres fuentes de variación del valor del dinero en el tiempo normalmente se reúnen por un solo término general, denominado **interés corriente**. Si uno se coloca dentro del punto de vista del inversionista, él desea recuperar el dinero que presta al menos con un interés corriente igual, pero ojalá superior a la tasa mínima de retorno, que es el punto crítico para la aceptación o rechazo de la viabilidad económica de un proyecto.

Para un análisis adecuado, que incluya las variaciones del dinero con relación al tiempo, se deben utilizar las relaciones matemáticas de equivalencia del valor del dinero en el tiempo, que son básicamente tres ecuaciones muy sencillas, y se incluyen en todos los libros de ingeniería económica (2, 78, 178).

7.4.4. Valor presente neto. Relación beneficio/costo

Como se mencionó anteriormente, el criterio decisorio adoptado para éste análisis de factibilidad económica es el del **valor presente neto máximo**.

El término **presente** se refiere a que los resultados de los análisis de la evaluación económica que van a ocurrir en los años venideros, se deben referir a la base de tiempo 0 o sea, en el momento que se hace el análisis. Todo valor del dinero futuro deberá ser transformado matemáticamente mediante las relaciones de equivalencia a la base de tiempo 0, o sea al **valor presente**.

Los análisis podrían referirse a las otras dos bases de referencia, a valores futuros o a valores de anualidades. Cuando se transforma el dinero a la base futura, por ejemplo, al final del período que se va a efectuar el análisis, todos los movimientos

de flujo de caja (ingresos y egresos a lo largo del período del análisis) deben transformarse matemáticamente a la misma base futura. La base de valor de anualidad implica que los valores presentes y los valores futuros se transforman matemáticamente a un valor equivalente de ingreso o egreso igual durante los (n) períodos o años de que consta el análisis.

El término **neto** se refiere a que se hace el análisis de evaluación no sobre los ingresos y egresos individualmente sino sobre la diferencia, o sea sobre los ingresos menos egresos.

Un proyecto **económicamente factible** según el criterio del valor presente neto indica entonces que la inversión permite recuperar completamente todos los egresos, ofrecer una rentabilidad igual a la tasa de retorno mínima y dejar un excedente que representa la ganancia neta de la inversión.

Finalmente, por la alta rentabilidad de la inversión en la tecnología BECOLSUB, se consideró adecuado (para fines de presentación principalmente) la adopción de la variable **relación Beneficio / Costo**, calculada como la relación de las diferencias acumuladas de los ingresos y los egresos totales, originados por las dos tecnologías de beneficio en consideración, en el período completo del análisis y con base en los valores presentes.

7.4.5. Utilización del programa ANEFSUB

No se incluyen en éste trabajo los algoritmos que contienen las ecuaciones utilizadas por tratarse de ecuaciones básicas de dominio común de análisis económico y financieros, y porque las funciones de costos particulares de la tecnología BECOLSUB están siendo actualmente ampliadas y mejoradas, a medida que se continúen las investigaciones programadas en Cenicafé.

En la Figura 127 se incluyen las informaciones básicas que caracterizan al **beneficiario tradicional y al beneficiario ecológico**. Todos los valores indicados en las casillas blancas pueden ser modificados por el usuario del programa; las unidades de las variables se indican a la derecha.

A la derecha del cuadro se encuentran cuatro botones. El botón extremo superior, Efectuar Análisis, le permite al usuario ejecutar el programa con los valores de entrada de la ventana Características del Beneficiario y con los valores de entrada de las otras ventanas, que se presentan a continuación. El segundo botón, Glosario, le permite al usuario encontrar cada una de las definiciones de las variables de que consta el programa; el siguiente botón, hacia abajo, Ayuda, le permite al usuario obtener una descripción general y de operación del programa. Oprimiendo el botón final, Salir, el usuario puede abandonar ésta ventana sin ejecutar el programa. Las variables que corresponden a esta ventana son las siguientes:

Nombre	Valor	Unidades	Nombre	Valor	Unidades
AguaConv	40	(Litros / kgCPS)	KGpARR	12,5	(Kg / Arroba)
AguaBec	3	(Litros / KgCPS)	KWpHP	1	(KW / HP)
CCpCPS	5	(decimal)	LitpM3	1000	(Litros / M3)
DíaspAño	40	(Días / Año)	LombpCPS	0,45	(Decimal)
DíaPico	0,025	(decimal)	ProdCPS	5.000	(@ CPS)
HoraspDíam	5	(Horas/día)	RedPerd	0,03	(decimal)
HoraspJor	8	(Horas/Día)			

Figura 127. Características básicas aplicables a los beneficiaderos tradicional y BECOLSUB.

- **AguaConv y AguaBec.** Consumo unitario del agua con la tecnología convencional y con la tecnología BECOLSUB.
- **CCpCPS.** Relación del café cereza al café pergamino seco.
- **CostoCont.** Valor unitario que se debe pagar por beneficiar sin el concepto ecológico; se calcula con base en las reglamentaciones del gobierno colombiano, a través del Ministerio del Medio Ambiente (103, 104).
- **DíaspAño.** Días por año trabajados en el beneficiadero.
- **DíaPico.** Valor de la producción diaria máxima en el año, expresada en %.
- **HoraspJor.** Horas por trabajadas por jornal.
- **KGpARR.** Relación numérica del número de kilogramos por cada arroba.
- **KWpHP.** Relación numérica del número de kilovatios por cada caballo de fuerza.
- **LitpM3.** Relación numérica del número de litros contenidos en un metro cúbico.
- **LombpCPS.** Relación del lombricompuesto por unidad de café pergamino seco obtenido.
- **ProdCPS.** Producción anual de café pergamino seco.
- **RedPerd.** Reducción de pérdidas físicas utilizando la tecnología BECOLSUB, en relación con el beneficio convencional.

En la Figura 128 se incluye información que **caracteriza a los tres módulos BECOLSUB iniciales**, que se construyen comercialmente, de 600, 1.000 y de 3.000kg de café cereza por hora; todos los valores de las casillas blancas pueden ser modifi-

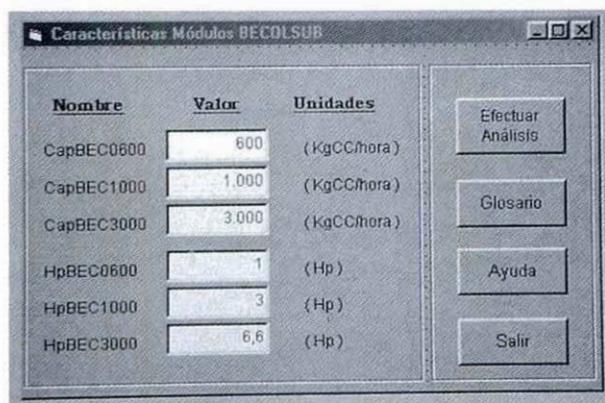


Figura 128. Características de los módulos BECOLSUB.

cados por el usuario del programa. Las unidades de las variables se indican a la derecha. Los botones de la derecha tienen la misma función de la anotada en la Figura 127.

Cada una de las variables representa las siguientes cantidades:

- **CapBEC0600, CapBEC1000, CapBEC3000.** Capacidades de procesamiento de los tres primeros modelos comerciales BECOLSUB.
- **HpBEC0600, HpBEC1000, HpBEC3000.** Potencias eléctricas de los motores de cada módulo comercial BECOLSUB.
- **CostoBEC0600, CostoBEC1000, CostoBEC3000.** Costos aproximados, en pesos colombianos, de cada uno de los modelos comerciales BECOLSUB.

De la misma forma que en la ventana anterior, a la derecha existen cuatro botones cuyas funciones son exactamente iguales a las descritas para la Figura 127.

En la Figura 129 se incluye la información que caracteriza las principales **variables económico-financieras** que deben considerarse para la evaluación; todos los valores indicados en las casillas blancas pueden ser modificados por el usuario del programa. Las unidades de las variables se indican a la derecha.

Las principales características económico-financieras consideradas en el estudio son:

- **AñosInvers.** Número de años de estudio para la inversión.
- **CostoAgua.** Costo unitario, por metro cúbico, del agua.
- **CostoKWH.** Costo unitario, por kilovatio-hora, de la energía eléctrica.
- **CostoLOMB.** Costo unitario, por kg, para la producción del lombricultivo.
- **CostoMO.** Costo unitario, por jornal, de la mano de obra.
- **Depreciac.** Valor de la tasa de depreciación de los equipos, calculada utilizando el método de depreciación lineal.

Nombre	Valor	Unidades	Nombre	Valor	Unidades
AñosInvers	5	(Años)	Intereses	0,3	(decimal)
CostoAgua	50	(\$)	PrecioCPS	31 025	(\$/@CPS)
CostoKWH	70	(\$/KWH)	PrecioLomb	1 000	(\$/@Lomb)
CostoCont	20	(\$/kgCC)	TasaAMOEM	0,15	(decimal)
CostoLOMB	50	(\$/KgLomb)	TasaDesc	0,34	(decimal)
CostoMO	4 000	(\$/Jornal)	TasaMant	0,04	(decimal)
Depreciac	0,1	(decimal)	TasaSubs	0	(decimal)
DTF	0,27	(decimal)	VidaUtil	10	(Años)

Figura 129. Características económico-financieras relacionadas con los módulos BECOLSUB.

- **DTF.** Valor actual de los intereses causados según el índice de Depósitos a Término Fijo, utilizado como referencia de la tasa de interés.
- **Intereses.** Tasas actuales de los intereses comerciales.
- **PrecioCPS.** Precio unitario de la venta del café (por arroba de café pergamino seco).
- **PrecioLomb.** Precio unitario de venta del lombricompuesto (por arroba).
- **TasaAMOEM.** Tasa de aumento anual de los costos de la mano de obra y de mantenimiento.
- **TasaDesc.** Tasa de descuento que se aplica para transformar flujos de caja futuros a valores presentes.
- **TasaMant.** Tasa de mantenimiento de los equipos.
- **TasaSubs.** Tasa de subsidio de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia que promueve la modernización o sustitución de los equipos financiando un porcentaje de los costos totales.
- **VidaUtil.** Vida útil promedio de los equipos.

De la misma forma que en las ventanas anteriores, a la derecha de la ventana existen cuatro botones, cuyas funciones son exactamente iguales a las descritas para la Figura 127.

En la Figura 130, Variables de respuesta, se incluye los resultados técnicos y económicos correspondientes a las informaciones incluidas en las tres ventanas de datos de entrada, descritas anteriormente. Las variables respuesta son:

- **CapBEC.** Capacidad del módulo BECOLSUB, calculada con base en los valores de la producción de la finca, el valor del día pico, el valor de conversión café cereza a café pergamino seco y las características de producción de los módulos BECOLSUB.
- **CostoBEC.** Costo del módulo BECOLSUB; valor total de la inversión en el módulo BECOLSUB, incluyendo los equipos y las modificaciones en la infraestructura del beneficiadero.
- **Inversión.** Valor pagado por el caficultor que es igual al CostoBEC menos el valor subsidiado por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Si los valores **CostoBEC** e **Inversión** fuesen iguales, el valor del subsidio es nulo.
- **UtiMargAP.** Utilidad marginal o adicional por la disminución de las pérdidas físicas convencionales que ocurren en el beneficio tradicional.

Variables de Respuesta

<u>Nombre</u>	<u>Valor</u>	<u>Unidades</u>
CapBEC	600	(KgCC/Hr)
CostoBEC	\$11.207.392	(\$)
HoraspDía	2,6	(Horas/día)
Inversión	\$11.207.392	(\$)
UtiMargAP	\$7.309.513	(\$)
UtiMargAgua	\$261.360	(\$)
UtiMargCont	\$2.599.473	(\$)
UtiMargLomb	\$6.624.070	(\$)
UtiTotalVPN	\$16.794.416	(\$)
Ben / Costo	1,5	(Decimal)

Carac BEN

Carac BEC

Carac EF

Resumen Datos
Entrada y
Respuesta

Hoja Electrónica

Ben/Costo VS
Variables

Leer del Disco
Grabar en Disco

Instrucciones

Glosario

Por Defecto

Terminar

Figura 130. Variables de respuesta correspondientes a cálculos físicos y económicos.

- **UtiMargAgua.** Utilidad marginal o adicional por el ahorro del agua; es igual al valor del ahorro de agua multiplicado por su costo unitario.
- **UtiMargCont.** Utilidad marginal o adicional por evitar tener que pagar al gobierno los costos de contaminar el agua utilizada en el beneficio convencional.
- **UtiMargLomb.** Utilidad marginal o adicional por la producción del lombricultivo.
- **UtiTotalVPN.** Utilidad total, obtenida de la suma de las utilidades marginales o adicionales, expresada según el criterio decisorio del Valor Presente Neto.
- **Ben/Costo.** Relación de beneficios totales sobre los costos totales expresados en valores presentes netos.

En la Figura 130, a la derecha, se incluyen 12 botones, que al oprimirlos ofrecen diferentes opciones de modificar los datos de entrada, efectuar cálculos adicionales, obtener respuestas en formatos especiales, o en gráficos, grabar los resultados en el disco de su computador, obtener ayudas o terminar sus indagaciones. La función de cada botón se explica a continuación:

CaracBEN, abre la ventana Características de los Beneficiaderos (Figura 127).

CaracBEC, abre la ventana Características de los módulos BECOLSUB (Figura 128).

CaracEF, abre la ventana Características Económico-financieras (Figura 129).

Resumen Datos Entrada y Respuesta (Figura 131), en donde se presentan, en

BENEFICIO		ECON.FIN		VAR_RESP	
AguasConv	40 L/A.gCPS	AñoInven	5 Años	CapBEC	600 KgCC/Hr
AguasBec	3 L/A.gCPS	CostoAguas	50 \$	CostoBierE	\$11,207.39, \$
CCpCPS	5 decimal	CostoCont	20 \$/g.C	HorasDía	2.6 \$
DíasAño	\$/Kg.CC	CostoWH	70 \$/A.WH	Inversion	\$11,207.39, \$
DíaPico	40 Días/Año	LIME	50 \$/g.Lomb	UtiMargAgua	\$22,049.08, \$
HorasDiali	0.025 Horas/Día	CostoMO	4000 \$/lojal	UtiMargLomb	\$261.360 \$
HorasExplor	5 Horas/Día	Depreciatio	0.1 %	UtiMargCont	\$16,896.57, \$
KGpARR	8 Horas/Año	DTF	0.27 %	UtiMargLomb	\$6,624.070 \$
KWpHP	12.5 Kg/Amoiba	Intereses	0.3 %	UtiTotalVPN	\$45,831.059 decimal
LimpM3	1 Kw/HP	PrecioCPS	31025 \$/kgCPS	Ben/Costo	4.1
LombpCPS	1000 Litros/M3	PrecioLomb	1000 \$/g.Lomb		
ProdCPS	1000 Decimal	TasaAMDEI	0.15 %		
ReduccionPeri	5000 @ CPS	TasaDesic	0.34 %		
	0.03 %	TasaMant	0.04 %		
BECOLSUB		TasaSubs	0 %		
CapB600	600 KgCC/hr	VidaUti	10 Años		
CapB1000	1,000 KgCC/hr				
CapB300	3,000 KgCC/hr				
HpB600	1 Hp				
HpB1000	3 Hp				
HpB3000	6.6 Hp				

Figura 131. Resumen de los datos de entrada y de respuesta del programa ANEFSUB.

una hoja electrónica producida autónomamente por el propio programa de computación, el resumen de los datos de entrada y de respuesta correspondiente a la información de las ventanas presentadas en las figuras anteriores.

La hoja electrónica descrita presenta particularmente la ventaja de que se puede copiar integralmente o las celdas seleccionadas con el indicador digital, en el portafolio del programa Windows 95 ó 98 y después pegarse o transportarse a cualquier programa que trabaje bajo el mismo ambiente de computación.

Hoja Electrónica. Al pulsar el botón Hoja Electrónica se presenta otra hoja electrónica, igualmente originada autónomamente por el mismo programa, y que inicialmente está vacía. Al margen izquierdo de la ventana se permite indicar el rango deseado de análisis de la variables: **Pérdidas ahorradas y Pagos contaminación** que en el presente momento son las dos variables económicas que más ventajas presentan en el análisis del beneficio ecológico; al pulsar el botón **Calcular**, se obtienen las relaciones de los ingresos sobre los egresos, (Beneficio/Costo) expresados en forma de valores presentes netos para cada una de las combinaciones de la variables de estudio. En la Figura 132 se indican los valores de 3 a 7 % como pérdidas ahorradas y de 30 a 120 pesos por kg de café cereza mal beneficiado. En las celdas de la hoja electrónica aparecen los valores de las razones de beneficio/costo correspondientes.

Si se pulsa el botón **Graficar** se abre otra ventana que contiene los mismos resultados de la hoja electrónica, pero en la forma de gráfico de barras, (Figura 133) que el programa crea automáticamente. Los valores de las celdas pueden señalarse y co-

	3 %Pérd	4 %Pérd	5 %Pérd	6 %Pérd	7 %Pérd			
30 \$/kg	1,6	1,9	2,3	2,6	2,9			
50 \$/kg	1,8	2,2	2,5	2,8	3,2			
70 \$/kg	2,1	2,4	2,7	3,1	3,4			
90 \$/kg	2,3	2,6	3,0	3,3	3,6			
110 \$/kg	2,5	2,9	3,2	3,5	3,9			
130 \$/kg	2,8	3,1	3,4	3,8	4,1			

Figura 132. Resultados de la relación beneficio/costo vs. pérdidas físicas y pago por contaminación.

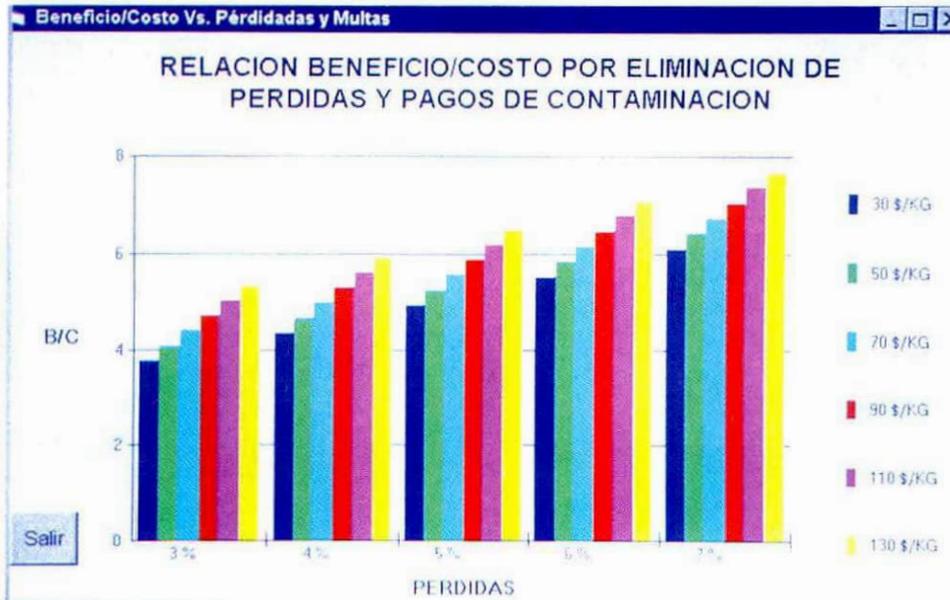


Figura 133. Gráfico de la relación beneficio/costo, ajustada teniendo en cuenta la eliminación de las pérdidas físicas y los pagos por contaminación.

piarse, utilizando el botón inferior – izquierdo para almacenarlos temporalmente en el portafolio del sistema operacional y trasladarlos, o copiarlos, a cualquier otro programa, que corra bajo el ambiente de Windows 95 ó 98. Adicionalmente e inmediatamente se obtiene el gráfico de barras, queda copiado en el portafolio del programa y puede también trasladarse a cualquier otro programa, como por ejemplo, a un procesador de texto para hacer un informe.

El siguiente botón hacia abajo, (Figura 130), Ben/Costo vs Variables, abre una nueva ventana, de Simulación para Retornos Deseados (Figura 134) en donde se señala la **variable de interés** de estudio, como se indica en la Figura 135, e inmediatamente se indica un valor predeterminado, que puede ser escogido, de **Relación Beneficio/Costo deseada**. Al apretar el botón **Calcular** se inicia un proceso de búsqueda automático del valor de la variable deseada mediante el algoritmo

Simulación para Retornos Deseados

Variable de Interés:

Relación Beneficio / Costo deseado:

Ben/Costo Final

Calcular
 Por Defecto
 Grabar en Disco
 Salir

Figura 134. Selección de la variable de estudio y de la relación beneficio/costo deseada.

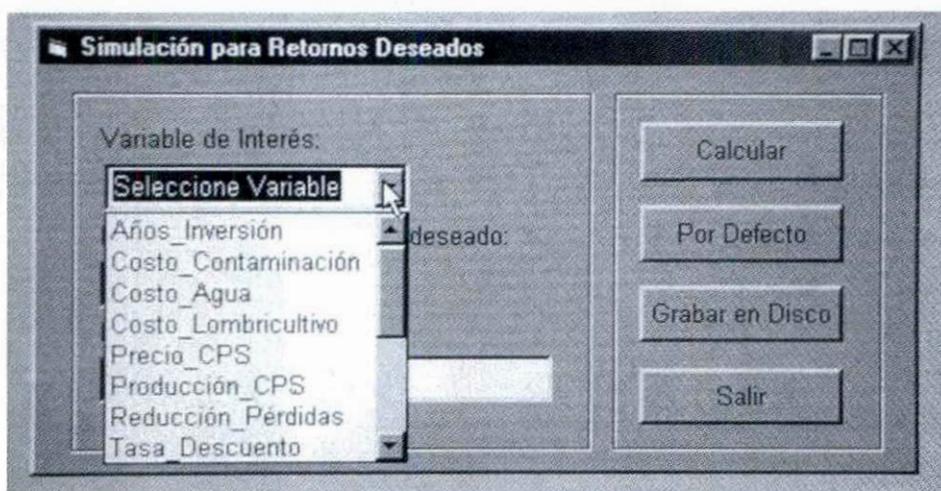


Figura 135. Selección de la variable de estudio.

iterativo, para solución de ecuaciones por el método de la "Regula Falsi" (32) hasta obtener el valor Ben/Costo indicado, como se indica en la Figura 136.

Debe tenerse presente que todos los resultados enunciados se calculan para los valores que el usuario indicó en las ventanas de las Figuras 127, 128 y 130. Cualquier modificación de alguno de estos datos, originará diferentes resultados.

El botón **Por Defecto** de las Figuras 130, y 135 permite borrar todas las alteraciones que el usuario haya efectuado a las variables independientes, después de haber iniciado la sesión de simulación, y son reemplazadas por los valores por defecto, de inicio del programa, que solo tienen el interés de iniciar el programa indicando resultados, los cuales pueden no tener ningún sentido real para el usuario.

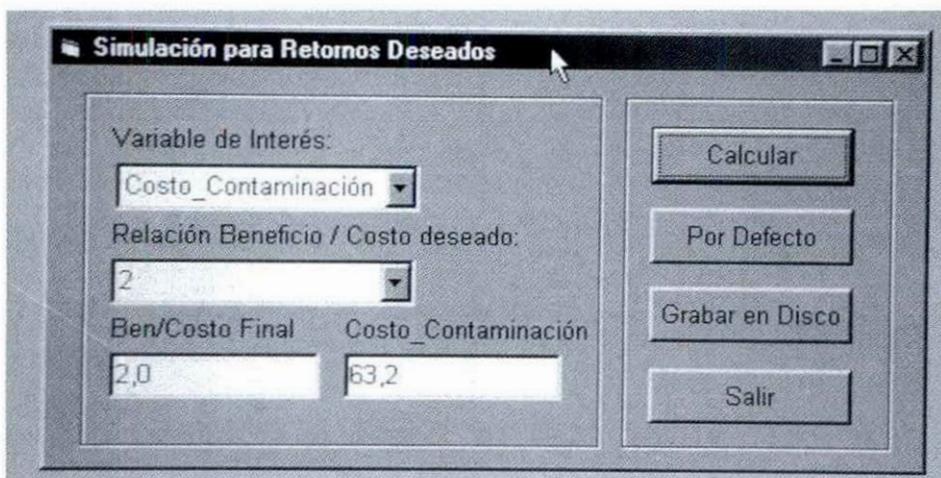


Figura 136. Resultado del valor de la variable de estudio.

Finalmente, existen en la Figura 130 dos botones adicionales, **Leer del Disco** y **Grabar en Disco**, que le permiten al usuario leer ó grabar los datos de entrada y de respuesta en el disco duro de su computador, en el subdirectorio, que seleccione, para lo cual el programa le ayuda a localizarlo mediante la misma tecnología de grabar en directorios y subdirectorios del sistema operacional Windows 95 ó 98. Esta opción es de la mayor importancia como herramienta de análisis para cuantificar monetariamente las ventajas de la tecnología BECOLSUB.

En general, los resultados obtenidos mediante algunos estudios preliminares utilizando el programa aquí presentado indican que las ventajas económicas de la tecnología BECOLSUB, hacen que se pague de 1 a 3 años la inversión efectuada para la sustitución de la tecnología.

CAPÍTULO

Tratamiento Anaeróbico de Aguas Residuales





TRATAMIENTO ANAERÓBICO DE AGUAS RESIDUALES ⁵⁰

Como se indicó en la Sección 1.2. Cenicafé en 1983 estableció dos líneas de investigación simultáneas para dar respuesta al problema de la contaminación por causa de las aguas residuales de beneficio húmedo del café, como se practica tradicionalmente en Colombia; la primera consistió en cuestionar y proponer alternativas para todas las etapas de beneficio que ocasionan la contaminación iniciando los trabajos de diseño y evaluación del desmucilagador, lavador, limpiador, DESMULACLA (14, 150), lo que resultó en la nueva tecnología BECOLSUB presentada en las secciones anteriores de este libro. La segunda consistió en tratar las aguas contaminadas por medio de bioreactores anaeróbicos en donde bacterias metanogénicas se encargan de minimizar la carga orgánica contaminante. Se presentan en ésta sección avances de esta tecnología.

8.1. SISTEMA MODULAR DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO DE AGUAS RESIDUALES DE BENEFICIO DEL CAFÉ - SMTA ⁵¹

Desde el mes de Noviembre de 1984 Cenicafé intensificó los estudios de descontaminación de aguas residuales del proceso de beneficio húmedo de café, a través del proyecto de biodigestión anaeróbica llevado a cabo entre la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y la firma T. Wiles and Associates del Reino Unido (40), la cual prestó su asesoría hasta el año de 1989.

Toda la información generada durante este último estudio, ha permitido llegar a proponer un **Sistema Modular de Tratamiento Anaeróbico** SMTA (Figuras 137 y 138), el cual es el prototipo propuesto y evaluado actualmente por Cenicafé como planta de tratamiento de aguas residuales de lavado del café, cuyo aporte contaminante corresponde a la cuarta parte de la contaminación que generan los subproductos del proceso de beneficio húmedo de café (195, 196).

⁵⁰ Preparado por Zambrano, F. D. y Rodríguez V, N. Química Industrial, Cenicafé.

⁵¹ Para obtener los más avanzados datos sobre este tema se recomienda revisar el documento recién publicado (Septiembre, 1999) sobre **Tratamiento de Aguas Residuales del Lavado del Café** (197).



Figura 137. Reactores hidrolítico y metanogénico del sistema de descontaminación de aguas residuales del lavado del café (194).

A partir de 1995 un SMTA consta de una unidad de 8.000L fabricada en plastilona que hace las veces de tanque de almacenamiento y reactor hidrolítico y de una unidad de 2.000L ó reactor anaeróbico (189), que permiten la depuración del agua contaminada a expensas de microorganismos anaeróbicos que consumen la contaminación presente en el agua residual. Un SMTA contempla la separación de fases hidrolítica acidogénica de la fase metanogénica, la cual combina las tecnologías de flujo ascendente, manto de lodos UASB y filtro anaeróbico UAF (194).

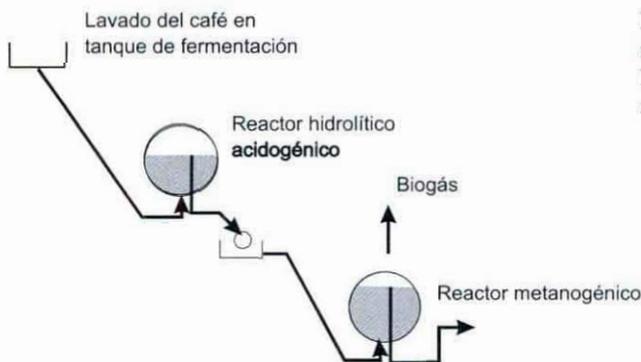


Figura 138. Esquema del sistema de tratamiento de aguas de lavado del café, por medio de reactores metanogénicos.

Tabla 55. Caracterización de la borra del café procedente de la Fábrica de Café Liofilizado, Chinchiná, utilizada para preparar el manto de lodos anaeróbicos.

Parámetro	Unidad	Valor	Método
Humedad	(% b.h.)	77,7	105 C, 16 h.
Nitrógeno Total	(% b.s.)	1,7	Kjeldah
Cenizas	(% b.s.)	0,2	575 C, 2 h.
Fósforo	(% b.s.)	0,06	Colorimétrico.
Potasio	(% b.s.)	0,07	EAA
Calcio	(% b.s.)	0,03	EAA
Magnesio	(% b.s.)	0,01	EAA
Hierro	(ppm)	101	EAA
Manganeso	(ppm)	7	EAA
Zinc	(ppm)	8	EAA
Cobre	(ppm)	30	EAA
Boro	(ppm)	7	Colorimétrico
Níquel	(ppm)	<0,7	ICP
Sólidos Volátiles	(% b.s.)	99,8	575 C, 2 h.
Sólidos Suspendidos	(% b.s.)	97,0	GF/C: 1.2um 105 C, 16 h
Sólidos Suspendidos Volátiles	(% b.s.)	96,8	2g, 600 C, 3h
DQO	(g O ₂ /g borra seca)	1,3	Dicromato
pH	(Lodo al 6% en peso)	3,6	pH Metrohm
Titulación al pH 7.5	(mg NaOH/g borra seca)	2,3	
Grasa	(% b.s.)	26,0	No reportado
Fibra	(% b.s.)	48,0	No reportado

Para preparar el manto de lodos UASB se utiliza borra de café, subproducto de la Fábrica de Café Liofilizado ubicada en el municipio de Chinchiná; en la Tabla 55 se presentan las características de la borra de café, subproducto de la extracción del café soluble.

El filtro anaeróbico UAF está conformado por anillos de polietileno reciclado de baja densidad (0,925g/cc), de 4 cm de longitud, área específica de contacto de 171m²/m³ de reactor, conformando un medio empacado con una porosidad del 78%.

En la actualidad el SMTA instalado en Cenicafé funciona con los residuos de lavado de café procedentes del beneficio para el pequeño caficultor donde el consumo máximo de agua es de 5L/kg cps y donde además se han adoptado el despulpado y transporte de pulpa sin agua y el lavado del café en los tanques de fermentación tradicional adaptados a **Tanques tina**, utilizando para ello cuatro enjuagues de la masa lo que permite tener dicho consumo de agua y alcanzar concentraciones de los residuos superiores a 25,000ppm de DQO (187). En los SMTA se requiere neutralizar las aguas residuales y balancear químicamente el lodo que contiene los

microorganismos sólo durante el arranque. Después de estas etapas preliminares todo el proceso de descontaminación lo efectúan los microorganismos.

Los **primeros modelos de SMTA instalados por Cenicafé en fincas aledañas al municipio de Chinchiná, Caldas** (Figura 137), se probaron con éxito tratando en el día pico hasta 20kg de Demanda Química de Oxígeno (DQO), contenidos en un volumen máximo de 700L de agua residual de lavado, los cuales se originan durante el lavado del café procedente de 750kg de café en cereza. Dicha cantidad de café producida en el día pico equivale al 2% de la cosecha anual estimada para una finca cuya producción sea de 7,8 ton (625@) cps/año, lo cual se da en un poco más del 80% de los cafetales colombianos con áreas menores a 5 hectáreas, asumiendo cafetales tecnificados (189).

En 1994 las eficiencias alcanzadas por los SMTA de la zona de Chinchiná, alcanzaron en promedio una remoción del 92,3 % de la contaminación expresada como DQO (60), equivalente en términos de DBO5 y superior a la exigida por la Legislación Colombiana en el Decreto 1594 de 1984 (102) (Tabla 56) .

Durante este mismo año el primer modelo de SMTA instalado en Cenicafé mostró una remoción promedio de 88,5 %. Una evaluación realizada durante una prueba de esfuerzo, simulando 47 días pico continuos y lavando diariamente el café procedente de 600kg de café en cereza, mostró una remoción neta del 90,7% de la contaminación, lo que corresponde a aplicar una carga de 8,2kgDQO/m³.día (130). La Tabla 57 muestra la caracterización efectuada a las corrientes líquidas del SMTA durante esta prueba de esfuerzo.

El mayor inconveniente que se tuvo en los primeros modelos de los SMTA para evitar las sobrecargas que originaban las fallas, fue el sobredimensionamiento que presentan los tanques fermentadores tradicionales, lo cual permite retener una mayor cantidad de café en baba para fermentar y originar volúmenes de agua superiores a los previstos para tratar diariamente en estos sistemas. A lo anterior se sumó el descuido por parte de los usuarios que no mantienen limpias las tuberías y lavan las máquinas de aspersión dentro de los tanques de fermentación, contenido tóxico que va luego a los SMTA ocasionándoles temporalmente un funcionamiento deficiente.

Tabla 56. SMTA prototipos instalados en finca y promedios de remoción de DQO estimadas. 1994.

FINCA	NETA	ESTIMADA*
Buenos Aires	89,9 %	99,2%
Fundación Manuel Mejía	91,6 %	98,1%
La Magnolia	95,3 %	97,9 %
Promedio	92,3 %	98,4 %

* Calculada a partir de la DQO de las aguas residuales de lavado en tanque-tina: 27.400 ppm

Tabla 57. Características de las corrientes líquidas del SMTA Cenicafé durante pruebas de esfuerzo

Parámetro	AFLUENTE	EFLUENTE
Temperatura	23°C	28°C
PH	3,9	7,3
DQO	31.320 ppm	2.910 ppm
Sólidos Totales	23.110 ppm	3.540 ppm
Sólidos Suspendidos	12.300 ppm	1.070 ppm
NTk	661 ppm	328 ppm
Fósforo	59 ppm	14 ppm
Acidos Grasos Volátiles		6,3 meq/L
Alcalinidad		1.920 ppm

Es común la práctica de utilizar el efluente de reactores anaeróbicos en riego de cultivos con el fin de incorporar al suelo su materia orgánica estable y el nitrógeno y fósforo que se encuentran en forma disponible para las plantas, lo que permite ayudar a la fertilización del suelo (60). Esta aplicación se está dando en algunos de los sitios donde se encuentran los SMTA instalados. Se ha cuestionado el efecto incrementándose la erosión con esta práctica, dada la topografía pendiente de la zona cafetera. Para dar una idea de cuál sería tal efecto, se hacen los cálculos de riego para el día pico sobre 5ha de cafetal, utilizando los 700L efluentes del SMTA; basta mencionar que tal cantidad de líquido equivaldría a una precipitación lluviosa de 0,013mm, equivalente entre 150 y 385 veces menos que la tasa de evapotranspiración dentro del cafetal, la cual se estima para las condiciones de Chinchiná, entre 5 y 2mm en días soleados y sombreados, respectivamente.

La **prueba de esfuerzo** realizada en el SMTA de Cenicafé, llevó a plantear una estrategia que permite ampliar la cobertura de tratamiento manteniendo los mismos costos, en fincas con producciones de 18 ton (1.438@) de cps año, al brindarse la posibilidad de almacenar mas volumen de agua residual en la primera unidad, utilizando materiales de construcción más económicos y dosificación posterior. En septiembre de 1995 en los SMTA se utilizó una estrategia de operación y manejo por distribución de cosecha que condujo al dimensionamiento óptimo de los reactores hidrolítico-acidogénico y metanogénico del sistema, tendientes a reducir los costos asociados a la instalación y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales. Esta estrategia contemplaba el dimensionamiento de las unidades que conforman el sistema, teniendo en cuenta la factibilidad de almacenar (a bajo costo) el agua residual para luego diferir su tratamiento. De acuerdo con lo anterior este mismo año la inversión para construir un SMTA se redujo a 40 US\$/ton (0,50 \$US/@) cps.

En Septiembre de 1993 la inversión para construir un SMTA era de 128 US\$/ton (1,6 \$US/@) cps, que incluía entre otros, reformas a los beneficiaderos para despulpar sin agua y redondear los tanques para lavar, Impuesto al Valor Agregado IVA, mano de obra, transporte de los tanques esféricos hasta la finca, 5 % de imprevistos y

60m de manguera de polietileno para conducción del ARL. A la luz de las observaciones llevadas a cabo durante la operación de los SMTA, se estima que se puede reducir su costo reemplazando y optimizando el funcionamiento de algunas partes que lo constituyen, como es el caso del primer tanque esférico ó reactor hidrolítico, recubrimientos y líneas de conducción en general.

Los principios que rigen el funcionamiento de un SMTA, entre ellos el incremento de temperatura en la segunda unidad utilizando la energía solar, se cumplen si el consumo específico de agua para beneficio de café es menor ó igual a 5L por kilogramo de cps. Un beneficiadero tradicional donde se consumen entre 40 y 50L/kg cps, para despulpar/transportar pulpa y lavar/clasificar el café, necesitaría 30 volúmenes más para poner en funcionamiento su planta de tratamiento. Otro beneficiadero donde se consuman, sólo para el lavado del café entre 20 y 25L/kg cps, necesitaría 15 volúmenes más para efectuar su tratamiento.

8.2. PRODUCCIÓN DE LODO METANOGÉNICO PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ POR BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA

En el tratamiento de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café mediante biodigestión anaeróbica utilizando reactores híbridos UAF/UASB, se hace necesario ejecutar 3 etapas: la maduración del lodo, el arranque y la operación.

8.2.1. Maduración del lodo

Éste debe ser la fuente y el soporte de las bacterias metanogénicas que cumplen un importante papel en la digestión anaeróbica, pues son las encargadas de la etapa final del proceso, en donde la mayor parte de la materia orgánica presente en el sustrato se convierte en CO_2 y CH_4 .

8.2.2. Arranque

Una vez maduro, el lodo metanogénico se carga en el reactor que es alimentado con las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café a una concentración de 300ppm de DQO, neutralizadas con NaOH hasta pH 7,5 y a una temperatura de 36°C y con recirculación del efluente durante aproximadamente un mes. Bajo estas mismas condiciones, pero ya sin recirculación, se continua operando el reactor durante dos meses, aproximadamente, con el fin de llevarlo a régimen estacionario. Cuando el reactor se opera a temperatura ambiente el período de arranque es mayor aproximadamente en 6 meses.

En la práctica se considera que se ha alcanzado dicho régimen cuando una simple regresión lineal demuestra que los parámetros del proceso no muestran dependen-

cia con el tiempo, o más sencillamente, si el cultivo se ha mantenido en condiciones constantes de temperatura y alimentación en un período comprendido entre 2 y 7 veces el tiempo de retención hidráulica (88).

8.2.3. Operación

Una vez terminada la etapa de arranque y estabilización del reactor se realiza el tratamiento propiamente dicho, utilizando las aguas residuales del beneficio del café sin neutralizar.

El arranque de una planta de tratamiento de aguas residuales mediante digestión anaeróbica puede requerir de varios meses; el arranque está directamente relacionado con la madurez del lodo utilizado como inóculo, es decir, la cantidad de biomasa activa inoculada y del tipo de sustrato.

El UASB es un modelo de reactor caracterizado por que las aguas residuales ingresan por el fondo del reactor y ascienden. La velocidad de salida del líquido crea una selección constante para los microorganismos que pueden adherirse y formar los gránulos; éstos pueden tener varios milímetros de diámetro y acumularse en el reactor en gran cantidad (81).

Los gránulos usualmente presentan una apariencia bien definida; la configuración granular tiene varias ventajas de ingeniería: los microorganismos están empacados densamente, no hay pérdida de espacio en el soporte inerte, el gránulo esférico provee el máximo radio de espacio para los microorganismos y muestran excelentes propiedades de sedimentación por su gran tamaño (81).

El crecimiento de los gránulos en un sistema de tratamiento de aguas residuales biodegradables con un alto contenido de carbohidratos incluye una amplia variedad de morfotipos bacterianos que aseguran la conversión sucesiva del sustrato primario a productos terminados como CH_4 y CO_2 . Recientemente se han hecho observaciones que convergen a defender la organización estructural de la población microbiana en el gránulo (81).

Debido a la importancia de tener gránulos de buen tamaño dentro del reactor híbrido diseñado por Cenicafé, en la zona UASB, se quiere tener un reactor, de acuerdo con la denominación de la biotecnología, del tipo de células inmovilizadas debido a su efectividad en el tratamiento de las aguas residuales. En este caso la borra de café hace de soporte poroso y el estiércol de cerdo o vacuno de inóculo bacteriano.

Para la ejecución de la primera etapa, se generó y estandarizó una metodología para la producción del lodo anaeróbico a partir de la borra de café, para madurar rápida y económicamente el lodo, pilar fundamental para el éxito de un tratamiento anaeróbico de aguas residuales.

Para la producción del lodo metanogénico se utilizó borra de café fresca que ha demostrado ser un excelente soporte para la biomasa, con una granulometría superior a los 2mm por presentar una excelente sedimentabilidad, de acuerdo con los

ensayos de laboratorio realizados por Isaza (86) y a una concentración de 100g de sólidos totales/litro de reactor de acuerdo con las recomendaciones dadas por Zambrano (189).

La borra se inoculó con fuentes de bacterias metanogénicas que fueran fáciles de encontrar en la zona cafetera y para ello se utilizaron estiércol de cerdo y de vacuno (diluidos con agua a una concentración 1:1), con una concentración de 1,5% de SSV, en b.s. Se agregó agua residual del lavado del café hasta una DQO final de 4500 ppm y se neutralizó con hidróxido de sodio.

De igual manera se realizaron estudios con y sin adición de nutrimentos, para evaluar el efecto de la adición de fuentes de nitrógeno, fósforo y azufre sobre el tiempo de maduración del lodo.

Como fuente de nitrógeno se escogió la úrea, como fuente de fósforo el fosfato diamónico (DAP) y como fuente de azufre el sulfato de amonio, por ser abonos de fácil consecución en las fincas cafeteras, además de tener unos costos similares. La úrea se agregó a razón de 163mg/kg de borra seca, el DAP se agregó a razón de 963mg/kg de borra seca y el sulfato de amonio se agregó a razón de 934mg/kg de borra seca.

El estudio para evaluar el efecto de la temperatura sobre el tiempo de maduración del lodo se realizó a temperatura ambiente y a 36°C. Al analizar la información sobre producción de biogás acumulado y metano acumulado, se pudo inferir que:

Los tratamientos a 36°C mostraron siempre mayor producción de biogás y de metano que sus análogos a temperatura ambiente.

En cuanto a la borra inoculada con estiércol de vacuno, es evidente la importancia de adicionarle nutrimentos, tanto a temperatura ambiente como a 36°C, la cual se refleja en la producción de biogás acumulado. Un comportamiento similar se presenta en la producción de metano.

En el caso de la borra inoculada con estiércol de cerdo no se observan diferencias, después del día 30 para los tratamientos a 36°C, en cuanto a la producción de biogás, en los tratamientos con y sin nutrimentos.

La mayor **producción de biogás** acumulado al día 75 se presentó para el tratamiento borra + estiércol de vacuno + nutrimentos, a 36°C con 3.149ml. Al realizar la comparación con los otros tratamientos se puede apreciar que los tratamientos que tenían como inóculo estiércol de cerdo a 36°C, le siguen en producción con aproximadamente 2.000ml, es decir, el 64%.

De igual forma, la mayor producción de metano húmedo medio, acumulado al día 75 se presentó para el tratamiento borra + estiércol de vacuno + nutrimentos, a 36°C con 2.523ml, y una eficiencia de producción de metano del 93,1%. Al realizar la comparación de eficiencias como metano seco producido bajo condiciones nor-

males con los otros tratamientos, se puede apreciar que los tratamientos que tenían como inóculo estiércol de cerdo a 36°C le siguen en producción con aproximadamente el 61,8% para el que tenía nutrientes y 51,81% para el que no tenía nutrientes.

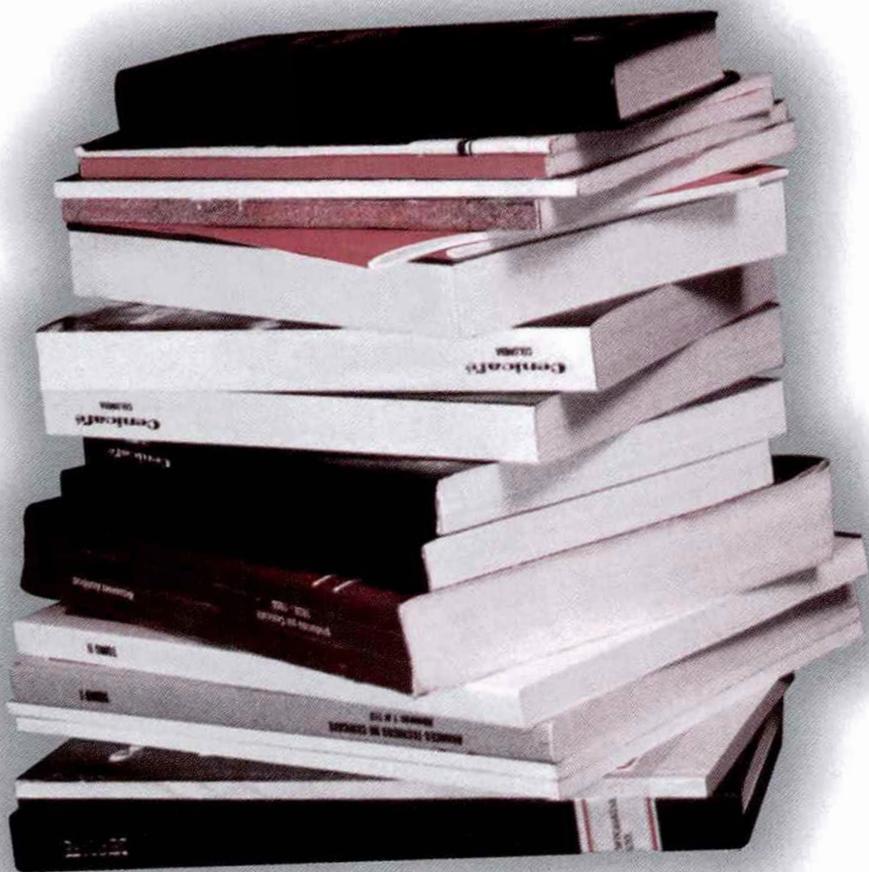
A los 25 días, los tratamientos inoculados con estiércol de cerdo, de vacuno y con nutrientes a 36°C presentaron prueba de combustión positiva. A los 30 días, los tratamientos inoculados con estiércol de cerdo y de vacuno y con nutrientes a temperatura ambiente, presentaron prueba de combustión positiva.

Del presente estudio se concluye:

- Se comprueba que la borra de café fresca, por sus propiedades físicas, es un excelente soporte para microorganismos anaeróbicos.
- La temperatura tiene una gran influencia sobre la actividad metanogénica.
- La utilización de inóculos metanogénicos favorece el tiempo de maduración de la borra de café.
- En términos generales, la adición de fuentes de nitrógeno, fósforo y azufre, disponibles en los fertilizantes utilizados en el cultivo del café tiene un efecto positivo en el incremento de la actividad metanogénica del lodo.
- El estiércol de cerdo se muestra como el mejor inóculo metanogénico y no precisa la adición de nutrientes, pues el comportamiento de los tratamientos que tenían este inóculo fue muy similar en cuanto a la producción de biogás y de metano, con y sin nutrientes. Por el contrario, se podría presentar alguna inhibición en la actividad metanogénica al utilizar los nutrientes, como pudo ser el caso del tratamiento que tenía nutrientes e inóculo de cerdo a temperatura ambiente.
- El estiércol de vacuno exhibe un buen comportamiento cuando recibe suplementación con nutrientes, tanto a temperatura ambiente como a 36°C.
- En términos de eficiencia de producción de metano, el mejor tratamiento es aquel en el que se utiliza estiércol de vacuno, suplementado con nutrientes y a 36°C.
- Hay una tendencia bien definida hacia la presencia de correlación entre la producción de metano y el contenido de Na⁺. Tanto para los tratamientos a 36°C como a temperatura ambiente, la mayor producción de metano húmedo se presentó para aquellos tratamientos cuya concentración de Na⁺ fue menor.

CAPÍTULO

Bibliografía





BIBLIOGRAFÍA

1. AGUDELO G., D. Estudio de señales electrónicas para reconocimiento de objetos duros. Chinchiná, Cenicafé-Universidad Nacional, 1999. 39 p. (Experimento ING-0410).
2. AHUJA, N. H.; WALSH, A. M. Ingeniería de costos y administración de proyectos, Mexico, Ediciones Alfaomega, 1989. 373 p.
3. ALVAREZ G., J. Despulpado del café sin agua. Chinchiná, Cenicafé, 1991. 6p. (Avances Técnicos Cenicafé No 164).
4. ALVAREZ G., J. Despulpadora de café accionada a pedal. Chinchiná, Cenicafé, 1991. 8p. (Avances Técnicos Cenicafé No 168).
5. ALVAREZ H., J.R. Separador agua – pulpa de café. Chinchiná, Cenicafé, 1990. 8p. (Avances Técnicos Cenicafé No 155).
6. ALVAREZ G., J. Evaluación técnica de módulos BECOLSUB al nivel de caficultores. Chinchiná, Cenicafé, 1997. 78 p. (Proyecto de Investigación ING-1112).
7. ALVAREZ G., J. Informe anual. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola. Octubre 93 - Septiembre 1994. Chinchiná, Cenicafé, 1994. p. 1-37.
8. ALVAREZ G., J. Informe anual. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola. Octubre 94 - Septiembre 1995. Chinchiná, Cenicafé, 1995. 14 p.
9. ALVAREZ H., J.R. Diseño de un beneficiadero para pequeño caficultor. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola. Octubre 93-Septiembre 94. Chinchiná, Cenicafé, 1994. p. 5-8.
10. ALVAREZ H., J. R. Evaluación y validación de la tecnología del beneficio ecológico y manejo de subproductos BECOLSUB, en 11 subestaciones de Cenicafé. Chinchiná, Cenicafé, 1997. 38 p. (Proyecto de Investigación ING-1113).

11. ALVAREZ H., J.R. Informe anual. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ*. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola. Octubre 95 - Septiembre 1996. Chinchiná, Cenicafé, 1996. p. 2-5
 12. ALVAREZ G., J.; GONZALEZ R., F.O.; ALVAREZ H., J.R.; FERNANDEZ, A.; LOPEZ A., R.; ROA M., G. Secado solar rotativo para café. Chinchiná, Cenicafé, 1989. 8 p. (Avances Técnicos Cenicafé No 144).
 13. ALVAREZ H., J. R.; MEJIA G., F. Manejo de quemadores eléctricos para secado de café. Chinchiná, Cenicafé, 1981. 19 p. (Boletín Técnico Cenicafé No. 7).
 14. ALVAREZ H., J. R.; ROA M., G. Diseño, construcción y evaluación de un equipo para el desmucilaginado, lavado y clasificado del café despulpado. Chinchiná, Cenicafé, 1984. 23 p. (Proyecto INAGA-46).
 15. AMERINE, M.; PANGBORN, R. M.; ROESSLER, E.B. Principles of sensory evaluation of food. New York, Academic Press, 1973. 602 p.
 16. AMORIM, H.V.; CRUZ, A.R.; ANGELO, A.J.; DIAZ, R.M.; MELO, M.; TEIXEIRA, A.A.; GUTIERREZ, L.E.; ORY, R.L. Biochemical physical and organoleptical changes during raw coffee quality deterioration. *In: Colloque Scientifique International sur le Café*, 8. Abidjan, Novembre 28 - Decembre 3, 1977. París, ASIC, 1977. p. 183-186.
 17. AMORIM, H.V.; MALAVOLTA, E.; TEIXEIRA, A.A.; CRUZ, V.F.; MELO, M.; GUERCIO, M.A.; FOSSA, E.; BREVIGLIERI, O.; FERRARI, S.E.; SILVA, D.M. Relationship between some organic compounds of the brazilian green coffee with the quality of the beverage. *In: Colloque International sur la Chimie des Cafés Verts, Torrefiés et leurs Derivés*, 6. Bogotá, 4-9 juin, 1973. París, ASIC, 1973. p. 113-127.
 18. ARANDA, E. El vermicompostaje: Una nueva alternativa para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico. *In: Seminario Internacional sobre Biotecnología en Agroindustria Cafetera*, 2. Manizales, 4 - 7 de noviembre de 1991. Resúmenes. 10 p.
 19. ARISTIZÁBAL T., I. D. Diseño, construcción y evaluación de un hidrociclón para lavar y clasificar café fermentado. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, 1995. 220 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
 20. AUTODESK. Mechanical Desktop 2.0. Estados Unidos, Autodesk, 1998. (Programa en CD).
 21. BARBOSA, L. F.; PARREIRA, P.; ICUNO, H.; LOURENCO,S.; GOMES, F.P.; CAMPOS, H. Influencia do tempo de secagem sobre o rendimento do café despulpado. Sao Pablo, Secretaria de Agricultura, Departamento de Producao Vegetal, 1963. 27 p.
- BAUMEISTER, T.; AVALLONE, E.; BAUMEISTER III, T. MARKS Manual del ingeniero mecánico. 8. ed. México, Mc Graw Hill, 1984. 3 Vols.

23. BLACK A., T. Evaluación al Programa de Beneficio Ecológico del Café. Informe Final. Santafé de Bogotá, Universidad de los Andes. Programa de Magister en Economía del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1966. 176 p.
24. BORLAND. Quattro Pro for Windows. User's Guide. Version 5.0. Scotts Valley, Borland International, 1991.
25. BOUSO J., L. Equipos de separación sólido-líquido. Alimentación, Equipos y Tecnología 4(3):89-94.1985.
26. BOYCE, D. S. Processing yield from parchment coffee demucilaged mechanically and by natural fermentation. Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico 46 (4): 334-341.1982.
27. BOYCE, D.S. The absorption of water by washed parchment coffee when stored under water. Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico 45 (3): 191-192. 1961.
28. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Drying cereal grains. Westport, The AVI Publishing, 1974. 265 p.
29. BUITRAGO B., O.; ALVAREZ G., J.; OSPINA M., J. E.; ROA M., G. Implementación del secado mecánico de café en carros secadores. Ingeniería e Investigación No. 25: 3-9. 1991.
30. CALLE V., H. Algunos métodos de desmucilaginado y sus efectos sobre el café pergamino. Cenicafé 16: 3 - 11. 1965.
31. CARBONEL, R.; VILANOVA, T. Beneficiado rápido y eficiente del café mediante el uso de soda cáustica. Santa Tecla, Ministerio de Ganadería. Centro Nacional de Agronomía, 1952. 142 p.
32. CARNAHAN, B.; LUTHER, H. A.; WILKES, J. O. Applied numerical methods. New York, John Wiley & Sons, 1969. 604 p.
33. CASE, E M. Fermentación en la producción de café. Revista del Instituto de la Defensa del Café de Costa Rica 2(13):462-467. 1935.
34. CASTILLO Z., J. Mejoramiento genético del café en Colombia. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. 50 años de Cenicafé 1938-1958 Conferencias conmemorativas. Chinchiná, Cenicafé, 1990. p. 46-53.
35. CASTLE, T. New language for cupping coffee. Tea & Coffee Trade Journal 158 (4): 18-22. 1986.
36. CASTRO Q., G. Estudio comparativo del lavado y clasificación del café fermentado en canalón y canal semisumergido. Informe Final. Chinchiná, Cenicafé, 1987. 85p.
37. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE. Cenicafé. Análisis de la encuesta sobre beneficio y calidades de café. Chinchiná, Cenicafé, 1984. 160 p.

38. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Anuario Meteorológico 1994. Chinchiná, Cenicafé, 1979. 457 p.
39. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Beneficio ecológico del café. Chinchiná, Cenicafé, 1995. 131p.
40. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE. Cenicafé. Biodigestión anaeróbica de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café. Chinchiná, Cenicafé, 1992. 92 p. (Proyecto QIN 01-00).
41. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Fundamentos del beneficio húmedo del café. Chinchiná, Cenicafé, 1991. 236p.
42. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial. Octubre 1991 - Septiembre 1992. Chinchiná, Cenicafé, 1992. s.p.
43. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial. Octubre 1993 - Septiembre 1994. Chinchiná, Cenicafé, 1994. s.p.
44. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial. Octubre 1994 - Septiembre 1995. Chinchiná, Cenicafé, 1995. p.v.
45. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE. Cenicafé. Manual del beneficio del café. Chinchiná, Cenicafé, 1991. 236 p.
46. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Tecnología del cultivo del café. Manizales, Comité Departamental de Cafeteros de Caldas, Cenicafé, 1987. 404 p.
47. CLARKE, R. J.; MACRAE, R. Coffee. Vol. 1. Chemistry. Essex, Elsevier Applied Science Publishers, 1985. 306 p.
48. CLEVES, R. Rendimiento de beneficiado de café. San José, Oficina del Café, 1968. 24p. (Proyecto I cosecha 1967/68).
49. CLIFFORD, M.N.; WILSON, K.C. Coffee: botany, biochemistry and production of beans and beverage. Londres, Croom Helm, 1985. 457p.
50. COMITE DEPARTAMENTAL DE CAFETEROS DE ANTIOQUIA. El beneficio del café. Medellín, Comité Departamental de Cafeteros de Antioquia, 1991. 213 p.
51. CONSULTORÍAS AGROPECUARIAS E.A.T. Estudio sobre pérdidas en el beneficio del café en el Departamento de Caldas. Manizales, Comité de Cafeteros de Caldas, 1995. 265 p.
52. CORREA P., A. Evaluación del secado del café *Coffea arabica* en un secador intermitente de flujos concurrentes. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, 1987. 258 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).

53. COSTE, R. Caféiers et cafés. Paris, G. P. Maisonneuve et Larose, 1989. 373 p.
54. COSTE, R. El café. Barcelona, Blume, 1969. 285 p.
55. CRUZ G., M. C. Almacenamiento de café pergamino seco a granel, utilizando aireación mecánica controlada. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1991. 170 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
56. CHALARCA, J. El café en la vida de Colombia. Bogotá, FEDERACAFÉ, 1987. 171 p.
57. DAGET, N. Vocabulario de los términos organolépticos utilizados en la degustación del café. Lausanne, Laboratorio de Metrología Sensorial. Departamento de Investigación y Desarrollo Nestlé, 1980. 13 p.
58. DÁVILA A., M.T.; POSADA F., F.J. Evaluación de CL50 de insecticidas en lombriz de tierra alimentada con pulpa de café. *In*: Congreso "Socolen", 20. Cali, 13 - 16 de julio de 1993. Resúmenes. Cali, SOCOLEN, 1993. p. 110.
59. DÁVILA A., M.T.; RAMÍREZ, G., C.A. Informe de actividades en lombricultivos instalados en la Central de Beneficio Ecológico de Anserma. Chinchiná, Cenicafé, 1996. 57 p.
60. DEMUYNCK, M.; NYNS; NAVEAU, H. Agricultural uses of digested effluents. Louvain, University of Louvain, s.f. s.p.
61. DÍAZ O. A. Transporte hidráulico de café en sus diferentes estados y de la pulpa, en un canal abierto. Cali, Universidad del Valle, 1987. 76 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
62. EDWARDS, C.A. Breakdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms. *In*: EDWARDS, C. A.; NEUHAUSER, E. F. (eds.) Earth worms in waste and environmental management. The Hague, SPB Academic Publishing, 1988. p. 21-31.
63. ESCOBAR C., J.C.; BETANCOURTH, A. Lombriz roja de California. *Agrobjetivos* No 4: 18-19. 1990.
64. ESTEVES R., J. P.; REYES J., V. R. Secador por deshumidificación de aire e inversión de flujo, diseño y evaluación. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1990. 255 p. (Tesis: Ingeniería Mecánica).
65. FAIRES, V. M. Diseño de elementos de máquinas. 4. ed. México, Editorial. Pomaire, 1996. 330 p.
66. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Defectos del café y su clasificación. Bogotá, FEDERACAFÉ, s.f. (Afiche).
67. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Manual del cafetero colombiano. 4. ed. Bogotá, FEDERACAFÉ, 1979. 209 p.

68. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Norma de calidades de café. Santafé de Bogotá, FEDERACAFÉ, 1988. 4 p.
69. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Programa de incentivos para transformación a beneficiaderos ecológicos. Santafé de Bogotá, FEDERACAFE, 1994. 11 p.
70. FERNANDEZ Q., A. Estudio de almacenamiento de semilla de café variedad Colombia. Chinchiná, Cenicafé, 1988. 70 p. (Informe final de la investigación realizada en desarrollo del año sabático).
71. FERNANDEZ Q., A., VELEZ, P., C. Estimación de propiedades térmicas del café. Cali, Universidad del Valle – Cenicafé, 1995. 35 p.
72. FERRUZZI, C. Manual de lombricultura. Madrid, Mundiprensa, 1987. 137 p.
73. FOURNEY, G.; TCHANA, E.; GUYOY, B.; VINCENT, J.C. Etude d'une démulagination rapide du café Arábica par trois substances enzymatiques. *In: Colloque Scientifique Internationale sur le Café*, 13. Paipa, 21-25 aout, 1989. Paris, ASIC, 1989. p. 331-341.
74. FREIRE, A. C. F.; MIGUEL, A. E. Rendimiento e qualidade do café colhido nos diversos estagios de maturacao, em Varginha-MG. *In: Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras*, 12. Caxambu, 28-31 de outubro, 1985. Rio de Janeiro, IBC -GERCA, 1985. p. 176-179.
75. FUKUNAGA, E. T. A new mechanical coffee demucilaging machine. Hawaii, Agricultural Experiment Station, 1957. 18 p. (Bulletin No. 115)
76. GÓMEZ M., R. Aireación nocturna en el silo 16. Bello, ALMACAFE, 1990. 3 p. (Memorando RADT 18866).
77. GONZÁLEZ R., F. O. Estudios comparativos de secadores solares por convección natural para café pergamino. Cali, Universidad del Valle, 1988. 192 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
78. GRANT, L. E.; IRESON, W. G.; LEAVENWORTH, S. R. Principles of engineering economy. New York, John Wiley & Sons, 1990. 591 p.
79. GUERRERO A., J. D. Determinación rápida de la calidad del café cereza. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, 1992. 80p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
80. GUERRERO A., J. D. Evaluación preliminar de medidores MH-2 DIES. Chinchiná, Cenicafé, 1992. 8p.
81. GUIOT, S.; PAUSS, A.; COSTERTON, J. Structured model of the anaerobic granule consortium. *In: International Symposium on Anaerobic Digestion*. Sao Paulo, 12-16 May, 1991. Paper preprints 1-10.
82. HALL, C. W. Drying farm crops. Reynoldsburg, Agricultural Consulting Associates, 1957. 336 p.

83. HALL, A. S.; HALOWENCO, A. R. ; LAUGHLIN, H. G. Diseño de elementos de máquinas. México, Editorial Mc Graw Hill, 1971. 170 p. (Serie Schaum).
84. ILLY, A.; VIANI, R. Espresso Coffee: The chemistry of quality. Londres, Academic Press Limited, 1995. 253 p.
85. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. ICONTEC. Requisitos que deben cumplir las despulpadoras de café de cilindro horizontal. Bogotá, Icontec, 1981. 2p. (Norma Colombiana Cenicafé-ICONTEC No 2090).
86. ISAZA H., J.D. Granulometría y test de sedimentabilidad de la borra fresca. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial 1993-1994. Chinchiná, Cenicafé, 1994. s.p. (Mecanografiado).
87. JARAMILLO G.,B. Propiedades físicas del café pergamino *Coffea arabica*. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1989. 45p. (Tesis: MS Departamento de Física).
88. LEQUERICA, J. L.; FLORS, A.; MADARRO, A.; VALLES, S. Producción de CH₄ por fermentación anaerobia. II. Cinética del proceso. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos* 20(3): 327-346. 1980.
89. LINGLE, T. R. Desarrollo del café de especialidades-gourmet, orgánico y otros. San Salvador , Asociación de Cafés Especiales de Estados Unidos de América, 1995. 17 p.
90. LINGLE, T. R. The coffee cupper's handbook. A systematic guide to the sensory evaluation of coffee's flavor. Washington, Coffee Development Group, 1986. 32 p.
91. LONDOÑO R., G.E.; PEREZ G., J.E. Hidrociclones: alternativa en la separación sólido-líquido. Medellín, Universidad Pontificia Bolivariana, 1988. 253 p.
92. LOPEZ P., H. Diseño, construcción y evaluación mecánica de un secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. Cali, Universidad Autónoma de Occidente, 1985. 220 p. (Tesis: Ingeniería Mecánica).
93. LOPEZ, C.I.; BAUTISTA,E.; MORENO, E.; DENTAN,E. Factors related to the formation of "overfermented coffee beans" during the wet processing method and storage of coffee. *In*: Colloque Scientifique Internationale sur le Café, 13. Paipa, 21-25 aout, 1989. Paris, ASIC, 1989. p. 373 - 384.
94. LOPEZ, J.; OSPINA J. Ecuación de capa delgada para el café pergamino. Chinchiná, Cenicafé, 1990. 183 p. (Informe de año sabático).
95. MARQUEZ G., S.M. Canal semisumergido para la clasificación del café cereza y pergamino húmedo. Informe científico. Chinchiná, Cenicafé, 1988. 32 p.
96. MARTINEZ T., D. G. Aprovechamiento de la energía calórica no utilizada en las estufas campesinas para el secado mecánico de café. Chinchiná, Cenicafé, 1999. 120 p. (Proyecto de Investigación ING-0816).

97. MENCHU, J.F. La determinación de la calidad del café. Guatemala, Asociación Nacional del Café. Subgerencia de Asuntos Agrícolas, 1971. 51 p. (Boletín No 8).
98. MENCHU, J.F. La eliminación mecánica del mucílago del café. Boletín de Promecafé No 46: 8-10. 1990.
99. MENCHU, J. F. Manual de beneficiado del café. Guatemala, Asociación Nacional del Café, s.f. 119p.
100. MENCHU, J.F. Manual práctico de beneficios de café. Guatemala, Asociación Nacional de Café. Subgerencia de Asuntos Agrícolas, 1973. 96 p. (Boletín No 13).
101. MINISTERIO DE INDUSTRIA Y COMERCIO DE COLOMBIA. Proceso para la transformación del café cereza a café pergamino lavado que incluye el despulpado sin agua, el desmucilaginado, lavado y limpiado del café pergamino y la mezcla del mucílago con la pulpa, mediante la utilización de despulpadora, desmucilaginator y tornillo sinfín. A favor de Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Santafé de Bogotá, Noviembre de 1995. (Patente No 95031744).
102. MINISTERIO DE SALUD. Decreto número 1594 de 1984. Santafé de Bogotá. Ministerio de Salud, 1984. 48p.
103. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Fijación de las tarifas mínimas de las tasas retributivas por vertimientos líquidos para los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendedos Totales (SST). Resolución Número 0273. Santafé de Bogotá, Abril 1 de 1997. 2p.
104. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Reglamentación de las tasas retributivas por la utilización directa o indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se establecen las tarifas de éstas. Decreto Número 901. Santafé de Bogotá, Abril 1 de 1997. 9p.
105. MONTENEGRO C., J. Y. Secador eléctrico estático para café, de baja capacidad, inversión de flujo y recirculación de aire. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional, 1992. 160 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
106. MONTOYA, E.C. Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. Pereira, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Industrial, 1989. 161 p. (Tesis: Investigación de Operaciones).
107. MONTOYA, E.C.; OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. Cenicafé 41(1):19-33. 1990.
108. MORENO R., G.; CASTILLO Z., J. La variedad Colombia. Una variedad con resistencia a la roya (*Hemileia vastratix* Berk. y Br.). Chinchiná, Cenicafé, 1984. 25 p. (Boletín Técnico No. 9).

109. MORENO R., G.; MORENO G., E.; CADENA G., G. Características del grano y de la bebida de la variedad Colombia de *C. arabica*, evaluadas por paneles de diferentes países. Chinchiná, Cenicafé, 1995. 5 p.
110. OLIVEROS T., C.E. Desmucilaginado mecánico del café. Chinchiná, Cenicafé, 1989. 15 p.
111. OLIVEROS T., C. E. Secador de café IFC. Chinchiná, Cenicafé, 1989. 18 p.
112. OLIVEROS T., C.E., Desmucilaginado mecánico del café. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Informe Anual de labores de la Disciplina de Ingeniería Agrícola. 1988-1989. Chinchiná, Cenicafé, 1989. 15 p.
113. OLIVEROS T., C. E., Rheological properties of mucilage and mucilage-coffee beans suspensions. Journal of Food Process Engineering 19(3): 331-342. 1996.
114. OLIVEROS T., C. E.; ALVAREZ G., J.; ALVAREZ M., F.; RAMÍREZ G., C. A.; ÁLVAREZ H. J. R. El BECOLSUB 100: beneficio ecológico para pequeños productores. Chinchiná, Cenicafé, 1999. 4 p. (Avances Técnicos Cenicafé No 261).
115. OLIVEROS T., C. E.; ALVAREZ M., F.; MONTOYA R., E. C. Metodología para el escalamiento de agitadores mecánicos utilizados en procesos con fluidos no-Newtonianos. Revista Facultad Nacional de Agronomía. Medellín 50(1): 31-54. 1997.
116. OLIVEROS T., C. E.; ROA M., G. Coeficientes de fricción, ángulos de reposo y densidades aparentes de café *Coffea arabica*, variedad Caturra. Cenicafé 36(1): 22-38. 1985.
117. OLIVEROS T., C. E.; ROA M., G. El desmucilaginado mecánico del café. Chinchiná, Cenicafé, 1995. 8 p. (Avances Técnicos Cenicafé No 216).
118. OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G. Instrucciones para utilizar el medidor de humedad para café pergamino Cenicafé - I. Chinchiná, Cenicafé. Disciplina de Ingeniería Agrícola, 1989. 13 p. (Documento interno).
119. OLIVEROS T., C. E.; ROA M., G. Pérdidas de presión por el paso del aire a través del café pergamino, variedad Caturra, dispuesto a granel. Cenicafé 37(1): 23-37. 1986.
120. OLIVEROS T., C.E.; ROA M., G.; ALVAREZ G., J. Medidor rústico de humedad para café pergamino. Cenicafé 40(2): 40-53. 1989.
121. OLIVEROS T., C. E.; SANZ U., J.R; RAMIREZ G., C.A.; ALVAREZ H., J.R.; ROA M., G.; ALVAREZ G., J. Desmucilaginosos mecánicos de café. Chinchiná, Cenicafé, 1995. 4 p. (Avances Técnicos Cenicafé No. 217).
122. OROZCO C., F. J. Descripción de especies y variedades de café. Chinchiná, Cenicafé, 1986. 29 p. (Boletín Técnico No. 11).

123. OSPINA M., J. E. Evaluación del prototipo modificado, intermitente de flujos concurrentes. Chinchiná, Cenicafé, 1990. 69 p. (Informe de labores de año sabático).
124. OSPINA M., J. E. Silo secador Cenicafé. Chinchiná, Cenicafé, 1990. 57 p. (Informe de labores de año sabático).
125. PARRA, C. A. Informe anual. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ*. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola 1998 - 1999. Chinchiná, Cenicafé, 1999. 20 p.
126. PARRA R., H. Transporte de café cereza por cable aéreo de gravedad. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1989. 141 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
127. PASCUAS L., R T. Estudio de la retención en pulpa del efluente líquido-sólido resultante del beneficio ecológico del café. Neiva, Universidad Surcolombiana, 1996. 92 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
128. PATIÑO T., A. Evaluación de cafeductos. Chinchiná, Comité Departamental de Cafeteros de Antioquia-Cenicafé, 1990. 64 p.
129. PATIÑO V., F. Diseño y construcción de un transportador mecánico de café cereza por cable aéreo. Cali, Universidad del Valle, 1992. 326 p. (Tesis: Ingeniería Mecánica).
130. PAVCO. Manual Técnico. Tuberías y Accesorios Sanitaria PVC. 15 p.
131. POISSON, J. Aspects chimiques et biologiques de la composition du café vert. *In: Colloque Scientifique International sur le Café*, 8. Abidjan, Novembre 28- Decembre 3, 1977. París, ASIC, 1977. p. 33-58.
132. POPOV, E P. Introducción a la mecánica de sólidos. México, Editorial Limusa, 1976. 652 p.
133. PUERTA Q., G.I. El beneficio y la calidad del café. Chinchiná, Cenicafé, 1995. 45 p.
134. PUERTA Q., G.I. Ensayos de conservación de café cereza y su influencia en la calidad de la bebida. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFE*. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial 1994-1995. Chinchiná, Cenicafé, 1995. p.v.
135. PUERTA Q., G.I. Escala para la evaluación de la calidad de la bebida de café verde *Coffea arabica* L., procesado por vía húmeda. Cenicafé 47 (4): 231-234. 1996.
136. PUERTA Q., G.I. Estado actual de las investigaciones en Cenicafé sobre el defecto sabor fenólico en el café colombiano. Chinchiná, Cenicafé, 1995. 84 p.

137. PUERTA Q., G.I. Evaluación de varias preparaciones de enzimas pectolíticas de la empresa Coldanzimas en el proceso de fermentación del beneficio húmedo de café. Informe final. Chinchiná, Cenicafé, 1994. 108 p.
138. PUERTA Q., G.I. Evaluaciones de calidad del café colombiano procesado por vía seca. Cenicafé 47 (2): 85-90. 1996.
139. PUERTA Q., G.I. Calidad de las variedades de café *Coffea arabica* L. cultivadas en Colombia. Cenicafé 49 (4): 265-278. 1998
140. PUERTA Q., G.I. La evaluación sensorial del café. Chinchiná, Cenicafé, 1995. 9 p.
141. PUERTA Q., G.I. Reconocimiento del deterioro en la calidad física y de la bebida del café por mercadeo de pergamino húmedo. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial. 1992-1993. Chinchiná, Cenicafé, 1993. 149 p.
142. PUERTA Q., G.I.; PEREZ L., C.M.; GONZALEZ M., M.J. Factores que influyen en la aparición del defecto fenólico en el café colombiano. Chinchiná, Cenicafé, 1996. 10 p.
143. PUERTA Q., G.I.; QUICENO O. A.L.; ZULUAGA V., J. La calidad del café verde: Composición, proceso y análisis. Chinchiná, Cenicafé, 1988. 251 p.
144. RAMIREZ G., C.A. Evaluación económica y ecológica del módulo "DESMULAC" con respecto al proceso tradicional de café por vía húmeda. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola 1993-1994. Chinchiná, Cenicafé, 1994. 11 p.
145. RAMIREZ, G., C.A. Evaluación técnica y económica de módulos BECOLSUB 600 y 1000 Móviles, para el beneficio ecológico del café. Chinchiná, Cenicafé. 1997. 51 p. (Proyecto de Investigación ING-1114).
146. RAMIREZ G., C.A.; ALVAREZ G., J. El secador solar parabólico. Chinchiná, Cenicafé, 1996. 13 p.
147. REYMOND, D. Utilisation de critères analytiques pour définir la qualité du café boisson. In: Colloque Scientifique International sur le Café, 10. Salvador, 11-14 de octubre de 1982. París, ASIC, 1982. p. 159-175.
148. RINCÓN S., O. La lombriz de tierra. Revista ESSO Agrícola 35 (1): 18 - 23. 1988.
149. RIOS A., S. Caracterización química del mucílago del café. In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DEL CAFÉ, Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial. 1995-1996. Chinchiná, Cenicafé, 1996. 43 p.

150. ROA M., G. Desmucilaginado, lavado y clasificado del café, módulo DESMULACLA. Programa de investigación sobre Beneficio del Café procesado vía húmeda. Chinchiná, Cenicafé, 1984. 8 p.
151. ROA M., G. Diseño, construcción y evaluación de una central para el beneficio ecológico de café. Chinchiná, Cenicafé, 1992. 75 p.
152. ROA M., G. Informe anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola. 1990-1991. Chinchiná, Cenicafe, 1991. p.v.
153. ROA M., G. Natural drying of cassava. East Lansing, Michigan State University, 1974. 234 p. (Tesis: Ph.D.).
154. ROA M., G.; MACEDO, I.C. Grain drying in stationary bins with solar heated air. *Solar Energy* 18: 445-449. 1976.
155. ROA M., G.; TREJOS R., R.; CRUZ G., M. Conservación del café pergamino y trillado durante su almacenamiento y transporte. Chinchiná, Cenicafé – ALMACAFE, 1992. 92 p.
156. RODRIGUEZ G., A. Campaña de defensa y restauración de suelos. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, Cenicafé. Conferencias Commemorativas. 50 años de Cenicafé, 1938-1988. Chinchiná, Cenicafé, 1990. p. 9-14.
157. RODRIGUEZ, N. Maduración de lodo de borra para reactores anaeróbicos. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial 1993-1994. Chinchiná, Cenicafé, 1994. 40 p. (Mecanografiado).
158. RODRIGUEZ, N. Maduración de lodo de borra para reactores anaeróbicos. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial 1994-1995. Chinchiná, Cenicafé, 1995. 105 p. (Mecanografiado).
159. RODRIGUEZ, N. Metanogénesis de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café. Chinchiná, Cenicafé, 1994. 51 p. (Experimento QIN 0203) (Mecanografiado).
160. ROSSI, S.J.; ROA M., G. Aplicacao de métodos de análise numérica e regrecao nao linear para estimacao de condutividade térmica e difusividade térmica para cereais. *In*: Congresso da Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 6. Sorocaba, S.P., 1976.
161. ROSSI, S.J.; ROA M., G. Secagem e armazenamento de produtos agropecuarios com uso de energía solar e ar natural. São Paulo, Academia de Ciencias do Estado de São Paulo, 1980. 295 p. (Aciesp n° 22).
162. SALAZAR A., J. N. La pulpa de café transformada por la lombriz es un buen abono para almacigos de café. Chinchiná, Cenicafé, 1992. 2p. (Avances Técnicos Cenicafé No 178).

163. SALAZAR M., C.A. Clasificación hidráulica de café mediante un hidrociclón. Medellín, Universidad Nacional. Facultad de Minas, 1996. 294 p. (Tesis: Magister en Recursos Hidráulicos).
164. SANZ U., J.R. Desarrollo de un desmucilagador mecánico para café. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola 1993.* Chinchiná, Cenicafé, 1994. 17 p.
165. SIERRA G., F. Evaluación de la pérdida de calidad de la semilla de café, variedad Caturra durante su beneficio. Cali, Universidad del Valle, 1988. 155 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
166. SIERRA G., F.; FERNANDEZ Q., A.; ROA M., G.; ARCILA P., J. Evaluación de la pérdida de calidad de la semilla de café durante su beneficio. *Cenicafé* 41 (3): 69-79. 1990.
167. SIVETZ, M.; DESROSIER, N.W. *Coffee technology.* Westport, Avi Publishing Company, 1979. 716 p.
168. STIRLING, H. G. Further experiments on the factors affecting quality in stored arabica coffee. *Kenya Coffee* 40 (466):28-35. 1975.
169. TARGHETTA A., L.; LOPEZ R., A. Transporte y almacenamiento de materias primas en la industria básica. Tomo 2. Madrid, Editorial Blume, 1970. s.p.
170. TEIXEIRA, A.; AZEVEDO, A.M.G. DE ; SEELSCHOPP, J.; STEIN, N.; GORF, R. *In: Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, 10. Pocos de Caldas, Agosto 29-Setembro 1, 1983. Anais. Sao Paulo, IBC-GERCA, 1983. 249-254.*
171. THOMPSON, T.L ; PEART, R. M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying new model. *Transactions of the ASAE* 11(4): 582-86. 1968.
172. TORRES A.,S.E. Clasificación de café pergamino en canal de correteo y en máquina de aire-zaranda. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 1990. 80 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
173. TREJOS R., R.A.; ROA M., G. Determinación de la humedad relativa de equilibrio y del calor latente de vaporización del café pergamino y trillado. Chinchiná, Cenicafé, 1986. 170 p.
174. TREJOS R., R.; ROA M., G., LOPEZ Z., J. CRUZ, M. Implementación del modelo de Thompson para la simulación del enfriamiento y secado del café pergamino. Chinchiná, Cenicafé, 1991. 37 p.
175. TREJOS R., R.; ROA M., G.; OLIVEROS T., C.E. Humedad de equilibrio y calor latente de vaporización del café pergamino y del café verde. *Cenicafé* 40(1):5-15. 1989.
176. VALENCIA M., A. Cosecha y recibo de café en el beneficiadero. Chinchiná, Cenicafé, 1976. 8 p.

177. VALENZUELA T., R. Transporte neumático del café pergamino y la pulpa fresca de café. Neiva, Universidad Surcolombiana, 1989. 78 p. (Tesis: Ingeniería Agrícola).
178. VARELA V., R. Evaluación económica de inversiones. Santafé de Bogotá. Grupo Editorial Norma, 1989. 512 p.
179. VASQUEZ M., R.; HIDALGO U., G. Influencia del desmucilaginado mecánico del café y de diferentes períodos de espera al secado sobre la calidad. *Noticiero del Café* 6 (64): 3-4, 1991.
180. VASQUEZ M., R.; MONTERO H. M. Pérdida de sólidos del endospermo del café durante el beneficio. *In: Simposio sobre Caficultura Latinoamericana*, 14. Ciudad de Panamá, Mayo 20-24, 1991. Tegucigalpa, IICA-PROMECAFÉ, 1994. p. 543 - 547.
181. VELASQUEZ, H., J.; ALVAREZ, G. J. Rastrillo revolver para el secado solar del café pergamino. Chinchiná, Cenicafe, 1991. 4 p. (Avances Técnicos Cenicafe No. 193).
182. VILLABONA G., S. Estudio de la clasificación del café brocado en el canal de correteo. Chinchiná, Cenicafe, 1995. 45p.
183. WILBAUX, R. El beneficio del café. Roma, FAO, 1960. 232 p. (Boletín no oficial de trabajo).
184. WILBAUX, R. Les caféiers au Congo Belge. Technologie du café Arabica et Robusta. Bruxelles, Ministère des Colonies. Direction de l'Agriculture des Forests et de l'Elevage, 1956. 213 p.
185. WRINGLER, G. Coffee. New York, Longman Scientific & Technical, 1988. 639 p.
186. ZAMBRANO F., D. A. Experimentos realizados en el laboratorio de biodigestión: Biodigestión anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. *In: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ*. Cenicafe. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial. Chinchiná, Cenicafe, 1988. 23 p.
187. ZAMBRANO F., D. A. Fermente y lave su café en el tanque tina. Chinchiná, Cenicafe, 1993. 8p. (Avances Técnicos Cenicafe No. 197).
188. ZAMBRANO F., D. A. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química industrial. Octubre 1988-Septiembre 1989. Chinchiná, Cenicafe, 1989. 22 p.
189. ZAMBRANO F., D. A. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial 1992-1993. Chinchiná, Cenicafe, 1993. 36 p. (Mecanografiado).
190. ZAMBRANO F., D. A. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química Industrial 1993-1994. Chinchiná, Cenicafe, 1994. 71 p. (Mecanografiado).

APENDICE - A

Tabla 58. Densidades y equivalencias aproximadas de peso entre los diferentes estados del café, de la pulpa y del cisco.

Densidad kg/m ³	Estados del Café, Pulpa y Cisco									
	CC	CB	CL	CSA	CPS	CA	PF	PM	C	
600	<i>CC</i>	1,0	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,4	0,5	0,04
800	<i>CB</i>	1,7	1,0	0,7	0,5	0,4	0,3	0,7	0,8	0,07
650	<i>CL</i>	2,4	1,5	1,0	0,8	0,5	0,4	1,0	1,2	0,10
520	<i>CSA</i>	3,1	1,9	1,3	1,0	0,7	0,6	1,2	1,5	0,13
380	<i>CPS</i>	4,5	2,7	1,9	1,5	1,0	0,8	1,8	2,2	0,19
680	<i>CA</i>	5,6	3,3	2,3	1,8	0,2	1,0	2,2	2,7	0,23
270	<i>PF</i>	2,5	1,5	1,0	0,8	0,6	0,5	1,0	1,2	0,11
420	<i>PM</i>	2,1	1,3	0,9	0,7	0,5	0,4	0,8	1,0	0,09
370	<i>C</i>	23,8	14,3	9,8	7,7	5,3	4,3	9,5	11,4	1,00

- CC = Café Cereza.
 CB = Café en Baba.
 CL = Café Lavado.
 CSA = Café Seco de Agua.
 CPS = Café Pergamino Seco.
 CA = Café en Almendra o Café Verde.
 PF = Pulpa Fresca.
 PM = Pulpa Mojada.

APENDICE - B**DESCRIPCION Y ORIGEN DE LOS PRINCIPALES
TÉRMINOS ORGANOLÉPTICOS Y SABORES DEL CAFÉ ⁵⁴**

Los siguientes son los principales sabores que pueden encontrarse en una bebida de café. La descripción corresponde en su mayoría a la que hace el departamento de Investigación del Laboratorio de Metrología Sensorial de la Nestlé (Suiza) (57).

ACEITOSO

Se llama así a un café con sabor a aceite frito, debido a una torrefacción extremada, café algo viejo, que presenta un sabor a grasa, pero no rancio.

ACIDEZ

Es una cualidad propia de los cafés arábica beneficiados por una vía húmeda. Es un sabor que se aprecia por el sentido del gusto en la parte lateral de la lengua. Es el sabor y aroma característico de ciertos ácidos como el cítrico, láctico, clorogénico, o de frutas cítricas como el limón o la naranja. Es una de las características más apreciadas en el café colombiano.

Característica normal de los cafés Arábica, especialmente de aquellos cultivados a gran altitud, algunos de ellos se buscan debido a este sabor tan particular como el café de Kenia, su intensidad se modifica por el grado de torrefacción y no parece poder expresarse objetivamente midiendo el pH. A veces un exceso de acidez puede ser un defecto para cafés normalmente neutros como el "Robusta".

Los expertos distinguen tres clases de acidez:

- Deseable natural: ácido.
- Indeseable natural: ácido, agrio, vinoso.
- Indeseable: desarrollada durante el proceso, acompañada de astringencia. Sensación picante y ligeramente astringente.

ACRE

Sensación a la vez amarga y astringente, rasposa y desagradable que se encuentra especialmente en ciertos cafés Robusta de mala calidad, está relacionada con la presencia de muchos granos defectuosos como granos negros.

Se le denomina también sensación áspera.

AGUADO

Se refiere a la falta de cuerpo o consistencia de un café. Es el caso extremo de una bebida "ligera" que ha sido preparada con demasiada agua, es poco concentrada y poco "tostada".

⁵⁴ Capítulo tomado de DAGET, N. (57); AMERINE et al (15) y Puerta *et al* (143).

191. ZAMBRANO F., D. A. Informe anual de actividades de la Disciplina de Química industrial 1994-1995. Chinchiná, Cenicafé, 1995. 83 p. (Mecanografiado).
192. ZAMBRANO F., D. A. Lavado del café en los tanques de fermentación. Cenicafé 45(3): 106-118. 1994.
193. ZAMBRANO F., D. A. Prueba exploratoria de maduración de borra semidescompuesta para producción de lodo metanogénico. Chinchiná, Cenicafé, 1989. 22 p.
194. ZAMBRANO F., D. A., ISAZA, H. J. D., RODRIGUEZ V., N.; LÓPEZ P., U. Tratamiento de aguas residuales del lavado del café. Chinchiná, Cenicafé, 1999. 26 p. (Boletín Técnico Cenicafé No. 20).
195. ZAMBRANO F., D. A., ZULUAGA V., J. Contribución al estudio de los residuos del proceso de beneficio húmedo de café. *In*: REUNIÓN del Grupo de Proceso y Control de Calidad de Café. Bucaramanga, 1989. sp.
196. ZAMBRANO F., D. A.; ZULUAGA V., J. Balance de materia en un proceso de beneficio húmedo del café. Cenicafé 44(2): 45-55. 1993.
197. ZAPATA, J. Dispositivo electrónico para control de temperatura por termopares. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. Informe Anual de actividades de la Disciplina de Ingeniería Agrícola 1989-1990. Chinchiná, Cenicafé, 1990. 19 p.
198. ZULUAGA V., J. Los factores que determinan la calidad del café verde. *In*: CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Cenicafé. 50 años de Cenicafé 1938-1958. Conferencias conmemorativas. Chinchiná, Cenicafé, 1990. p. 167-183.
199. ZULUAGA V., J.; ZAMBRANO F., D. A. Manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café para el control de la contaminación. Chinchiná, Cenicafé, 1993. 4 p. (Avances Técnicos Cenicafé No. 187).

AGRIO

Se desarrolla normalmente si persisten las condiciones que originan el sabor a “fruta” y “vinoso”. Se origina por falta de control en la recolección y beneficio del café.

AMARGOR

Característica generalmente normal en los cafés, debida a su constitución química, afectada por su grado de torrefacción y por la manera de preparar la bebida. Esta característica es deseable hasta cierto grado. Las cafés Robusta son más amargos que los Arábica.

APAGADO

Un café se llama apagado cuando el conjunto de las características organolépticas da una impresión de redondez, pero le falta carácter. Se parece al sabor “insípido”: falta del sabor característico del café, es equivalente a una taza débil.

AROMA

Es la primera cualidad que el catador percibe en la bebida del café al oler la muestra. Está compuesto por sustancias volátiles como aldehidos, cetonas, ácidos, ésteres etc.

Su intensidad, cualidad y tipo indican la calidad del café, condiciones de cultivo y beneficio. El tipo de aroma puede ser: tostado, dulce, leguminoso, terroso, químico etc.

AROMATICO

Café que manifiesta plenamente el aroma característico de su naturaleza y de su origen.

ASTRINGENTE

En medicina califica a ciertos cuerpos que provocan una contracción o crispación de los tejidos. El término se ha extendido a todos los efectos de los polifenoles.

Los ácidos provocan la astringencia.

Para los cafés, la astringencia se asimila a la acidez indeseable. Se relaciona con la mayor o menor presencia de café pintón o verde.

Aparece regularmente en los cafés bajos, sobre todo en los producidos en zonas donde llueve durante la cosecha y por tal razón, se recolectan antes de su completa maduración.

Este sabor va desde una marcada astringencia hasta un suave sabor a paja o grama, que se hace cada vez menos perceptible a medida que se beneficia mejor el café y se gana en altura.

CEBOLLA

Es causado por falta de control en el proceso de fermentación; sobrefermentación o cuando la fermentación de los azúcares del mucílago no fué completa o fué dispareja.

El proceso da origen a la formación de ácido propiónico que es la causa del sabor a cebolla.

Aparece también en los café almacenados húmedos.

CONTAMINACIONES

El café bien preparado y seco, es susceptible de adquirir con mucha facilidad sabores y olores extraños, si las condiciones durante el almacenamiento no son las adecuadas. Entre las contaminaciones más comunes se tienen:

- **SACO**

Es una característica de los cafés almacenados durante mucho tiempo en sacos.

Un sabor extraño que puede presentarse en infusiones de café preparadas con cafés poco tostados.

- **CAUCHO**

Sabor particular que recuerda el olor que despiden los neumáticos de los vehículos al calentarse por el frotamiento contra la calzada.

- **HUMO**

El humo es un aroma y sabor parásitos, adquiridos a menudo por malas condiciones de preparación o de almacenamiento del producto. La característica puede depender también de condiciones inadecuadas durante la torrefacción.

- **LEÑOSO (de madera)**

Recuerda el olor de la madera seca. Puede deberse a la presencia de muchos granos defectuosos (blaqueados, esponjosos, secos), cuya torrefacción no puede desarrollar las características aromáticas, o a la utilización de un café demasiado viejo que ha perdido sus principios aromáticos y sólo conserva el soporte leñoso.

- **PAPEL**

Sabor característico de ciertos cafés que han sido empacados en bolsas de papel o de infusiones que son preparadas utilizando un filtro de papel de mala calidad.

- **QUÍMICOS**

Característica detectable al percibir el aroma. Puede tener su origen durante el almacenamiento con fungicidas o cerca a otros reactivos químicos; o debido a una contaminación del café durante el cultivo o beneficio.

CUERPO

Esta cualidad organoléptica del café está asociada a los sólidos solubles presentes en la bebida de café. El catador lo percibe en la lengua como una mayor o menor concentración que se denomina “cuerpo completo o lleno” o “cuerpo delgado o ligero”, respectivamente.

DURO

Café que sorprende al paladar por una sensación no táctil, sino mixta. Cuando el amargor y la acidez de un café no están envueltos por la redondez del cuerpo. Es un café mal equilibrado y al límite puede ponerse acre.

ENVEJECIDO

Es un café que ha perdido todas o parte de sus características organolépticas típicas, pero aún es mejor que un café viejo.

Este defecto es el resultado natural del envejecimiento del grano, aunque esté bien procesado. Se acentúa más en climas húmedos y cálidos. Si el almacenamiento se realiza bajo condiciones de 20 °C de temperatura y 65% de humedad, el defecto aparece más lentamente.

FRUTA

El sabor recuerda al de la piña madura. Se desarrolla por sobrefermentación o mal lavado del café o por mezcla de café recién despulpado con granos dejados en el tanque de fermentación de cosechas anteriores.

FUERTE

Que tiene cuerpo, un fuerte sabor y olor característicos. Se origina por mezclas de café y exceso de torrefacción.

HEDIONDO (“STINKER”)

Los granos hediondos se desarrollan por malas condiciones de cosecha o de beneficio, que originan durante la torrefacción un olor a podrido y fermentado. La presencia de algunos granos hediondos en la bebida, la hace desagradable e imbebible.

IMPRESIÓN GLOBAL

Se refiere a la calificación general y clasificación de una bebida de café según su calidad. Por la impresión global se acepta o rechaza la calidad de un café. Está relacionada con todas las propiedades percibidas con el sentido del olfato (aromas) y gusto (cuerpo, amargo y acidez).

MOHOSO

Este defecto es el resultado del almacenamiento de café a medio secar. El grado de mohosidad depende de las condiciones de temperatura y humedad del sitio de almacenamiento, así como del tiempo durante el cual se almacene.

También aparece como un sabor a cosecha vieja muy marcada, en café que se decoloró (blanqueó) muy rápidamente, por haber sido dejado con más del 12% de humedad.

La característica de moho también depende de las condiciones de cosecha, beneficio y limpieza de los equipos utilizados.

RIO

Este es un defecto grave pero afortunadamente raro en los cafés lavados. Proviene del fruto reventado y caído al suelo a causa de la lluvia y que allí se sobrefermenta y enmohece. Generalmente son daños individuales los que causan la mala calidad de la taza, aún cuando en algunas ocasiones ha aparecido el sabor en forma suave, diluido en toda la muestra por causas no determinadas.

SABOR

El sabor predominante en una bebida de café es el resultado de la intensidad y grado en

que se presenten el aroma, el cuerpo, la acidez y el amargor del café. El sabor puede ser propio, equilibrado, o definirse como “verde”, “contaminado”, “sucio”, fermento.

SOBREFERMENTADO

Este defecto se puede presentar en diferentes grados y todos se deben a malas prácticas en el proceso de fermentación y beneficio.

Puede originarse en los tanques de fermentación, en las casetas de los patios, en las tolvas de los secadores o en los propios secadores.

En los tanques se debe a la descomposición del mucílago; durante el proceso de secado se debe a la acción enzimática anormal bajo condiciones permanentes y óptimas de temperatura para acelerar su actividad.

Entre los grados de sobrefermentación se tienen: fruta, cebolla, agrio y típico (cuando el tiempo de la sobrefermentación es demasiado largo, se presenta el olor a vinagre penetrante y si se alarga en presencia de natas y pulpa de café, puede aparecer el sabor a “queso”).

SUCIO

Es un defecto que puede tener diferentes causas: cosecha antes de la madurez del fruto, principios de fermentación en frutos que han sido amontonados, mal lavado, mal secado, o reabsorción de humedad del grano por malas condiciones durante el almacenamiento.

TERROSO

Este sabor se puede considerar como “sucio” muy marcado y desagradable aunque predomina el sabor bien definido a tierra húmeda.

Es un sabor común en los cafés naturales y lavados (beneficio seco).

Se percibe un sabor y olor a tierra recién removida, especialmente en cafés de baja calidad. Se debe a malas condiciones de preparación, secado sobre tierra (en vez de cemento), Es un sabor propio en algunos tipos de café debido a su origen.

VERDE

Es un sabor característico de bebidas preparadas con grano inmaduro. Se presenta en café recién cosechado y beneficiado, o de principio de cosecha.

VIEJO

Es un café que ha sido tostado y se ha almacenado durante demasiado tiempo. El café cambia de aroma y adquiere una característica muy desagradable.

VINOSO

El origen de este defecto está en la cosecha de café sobremaduro, el retraso entre la recolección y el despulpado del fruto. También se origina por sobrefermentación o por lavado incompleto del café.

Mientras más se retrase el despulpado, el sabor “vinoso” originalmente dulzón y agradable se hace cada vez más agrio hasta constituir un defecto completo.

OTRAS CARACTERÍSTICAS

Existen otros sabores que dependiendo de su intensidad pueden constituir o no, defectos.

DULZON

Característica asociada a una sensación adulcerada, ligeramente azucarada.

EQUILIBRADO, REDONDO, LLENO O COMPLETO

Es un café que contiene todas las características de sabor sin que ninguna sea especialmente aparente.

FRANCO

Es un café que no presenta aroma desagradable.

FRESCO

Es una característica positiva que se aplica a un café recién cosechado y tostado, cuyo aroma se destaca particularmente.

LODO

Caracteriza a una infusión que contiene gran cantidad de partículas en suspensión y un cuerpo desagradable.

NEUTRO

Que no presenta características predominantes, principalmente indeseables. Es un café que no es aromático, aunque esto no constituye un defecto muy marcado.

TOSTADO

Es una característica de intensidad relativa que depende de las componentes naturales del café, cuyo aroma cambia con el grado de tostación.

APENDICE - C

Fabricantes de la tecnología BECOLSUB autorizadas por la federación nacional de cafeteros de Colombia (Lista actualizada a septiembre de 1999).

AGROPIJAO

Att. ANGEL JIMENEZ ROJAS
Cl. 13 # 5-79
Tel. 54 4343
Pijao, Quindío
Nit. 94251815 - 4

INDUSTRIAS FIMAR

Att. JAIME RUEDA BALAGUERA
Cl. 23 # 17-14
Tel. 24 4572 - 24 2716
San Gil, Santander
Nit. 5.741.644

**INDUSTRIAS ELECTROMECÁNICAS
Y ECOLÓGICAS DE CARTAGO**

Att. MARTIN EMILIO MESA VELEZ
Cl. 1a # 3-123
Cartago, Valle
Nit. 70.810. 170

INDUSTRIAS INDUMETH

Att. BENEDICTO CUELLAR
Cl 9 # 31A-44 Res. Tel. 70 0584
Taller Tel. 70 05 22
Neiva
Nit. 813002962-9

INDUSTRIAS METALÚRGICAS

LA MACARENA - J.GALLO
Att. MARCO AURELIO GIRALDO
Zona Industrial La Macarena
Bodega # 12
Tel. 330 5565 - 332 5322
Dosquebradas
Nit. 891401635-0

INGEMÁQUINAS

Att. JAIRO RUEDA CARDENAS
Cra. 19A2 # 8-42
Urbanización Las Gaviotas
Tel. 0955 - 733556
Valledupar.

INGESEC CIA. LTDA.

Att. NELSON MOYA MOYA
Cra. 61A # 27-15 Sur
Apartado Aéreo 34136
Tel. 414 5957 - 414 5960
Nit. 800.049.968 - 8

JOSE HECTOR QUINTERO T.

Att. JOSE HECTOR QUINTERO T.
Cra. 27C # 17B-03
Tel. 64 5883
Santa Rosa de Cabal
Nit. 15.902.796

J.M.ESTRADA

Att. JORGE EDUARDO ESTRADA M.
Cra. 50 # 40-05
Tel. 279 0194 - 279 0023
Medellín
Nit. 890.900.174-4

METÁLICAS BOLIVAR.

Att. EDGAR JULIO VELASQUEZ
CÁRDENAS
Cl. 50 # 38-84 Entrada principal
Tel. 8413038
Ciudad Bolívar, Antioquia
Nit. 70.412.476

METALÚRGICAS APOLO

Att. CARLOS EDUARDO
SALDARRIAGA
Cra. 13 # 63-04
Tel. 094 - 261 9085
Medellín

PENAGOS HERMANOS Y CIA. LTDA.

Att. HERNANDO RODRIGUEZ
ARENAS
Cl. 28 # 20-80
Tel. 630 1600
Bucaramanga, Santander
Nit. 890200686-1

SOCIEDAD TÉCNICA LTDA.**"SOTEC"**

Att. CARLOS ALBERTO URIBE
Carretera al Magdalena, Kilómetro 9
Tel. 874 5691 - 874 7480
Fax 874 7590
Manizales
Nit. 890803937-1

**TALLER AGROINDUSTRIAL EL
CAFETERO ECOLÓGICO**

Att. JULIO HERMES NOVOA
MONTAÑEZ
Avenida 8 # 16-79
Barrio El Páramo
Tel. 71 22 64
Cúcuta
Nit. 63351589-0

TALLER AGROMETÁLICAS GALLEGO

Att. CARLOS MARIO GALLEGO S.
Cra. 10 # 8-20
Tel. 52 84 86
Belén de Umbría, Risaralda
Nit. 9.762.596-1

TALLER BECOL

Att. FREDY HERNAN PATIÑO T.
Cra. 3a. # 7A-01, Barrio Panorama
Tel. 850 7768
Chinchiná, Caldas
Nit. 75.144.921

TALLER BÚFALO

Att. DARIO ECHEVERRY GARCES
Avenida 30 de Agosto # 27 - 51
Tel. 336 1069
Nit. 1355745
Pereira, Risaralda

TALLER CALDAS

Att. JORGE ALVARO BEDOYA C.
Cra. 6 # 12 - 49
Tel. 850 7125
Chinchiná
Nit.000015898211

TALLER CITARA

Att. ROGELIO HORACIO ORTIZ
RINCON
Cl. 49 # 44-204
Tel. 8411102
Bolívar, Antioquia
Nit. 74.005.621

TALLER IND.DESCAFÉ

Att. ALONSO PATIÑO OROZCO
Cra. 5 Bis # 14 A-52
Tel. 850 7482
Chinchiná
Nit. 75143762-0

TALLER INDUSILOS

Att. JOSE LONDOÑO V.
Cra. 17 # 9-43
Verdúm, Etapa II
Tel. 50 42 45
Chinchiná, Caldas
Nit. 4.413.333

TALLER INDUSTRIAL RUÍZ

Att. MANUEL BENITEZ GRANADA
Cra. 50 # 50-24
Tel. 69 65 52
Sevilla, Valle
Nit. 2.646.548

TALLER URIEL OSPINA VÁSQUEZ

Att. URIEL OSPINA
Cra. 5a. # 12-44
Tels. 8400347 - 8502163
Chinchiná, Caldas
Nit. 15.906.021



UNA PUBLICACIÓN DE CENICAFÉ.



Biblioteca Cenicafé



C006842