

# BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ



Gonzalo Roa M.  
Carlos E. Oliveros F.  
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.



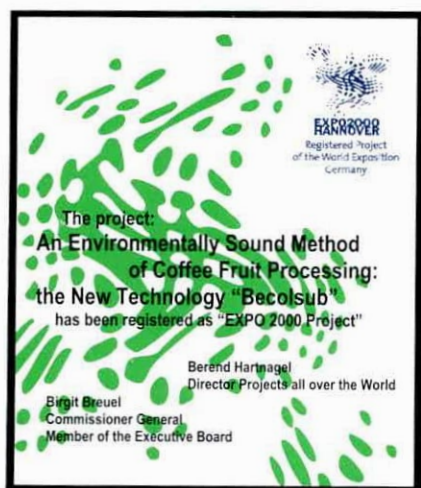
Federación Nacional de  
Cafeteros de Colombia

**Cenicafé**

Centro Nacional de Investigaciones de Café  
"Pedro Uribe Méila"



# 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 Cenicafe 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:

Diseño y Diagramación:

Fotografías:

Héctor Fabio Ospina Ospina - Ing. Agr. M.Sc.

Gonzalo Gallego González.

Gonzalo Hoyos Salazar.

Disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafe

---

1a. Edición, Noviembre de 1999

3.000 ejemplares

# TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                                 | Página    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Presentación .....                                                                              | 1         |
| Prólogo .....                                                                                   | 5         |
| <b>1. GENERALIDADES .....</b>                                                                   | <b>7</b>  |
| 1.1. DEFINICIÓN .....                                                                           | 11        |
| 1.2. PROCEDIMIENTOS COMPLEMENTARIOS PARA REALIZAR<br>EL BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ .....      | 12        |
| 1.3. CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS<br>POR EL BENEFICIO DEL CAFÉ .....          | 13        |
| 1.4. CONSUMO DE AGUA Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO .....                                          | 13        |
| 1.5. EVALUACIÓN PARCIAL DEL BENEFICIO ECOLÓGICO<br>DESARROLLADO POR CENICAFÉ .....              | 14        |
| <b>2. LA CALIDAD DEL CAFÉ .....</b>                                                             | <b>15</b> |
| 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<br>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<br>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        |
| <b>3.</b> | <b>BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ .....</b>                                                          | <b>51</b> |
| 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.      | DESPULPADORA 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<br>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<br>Y PULPA FRESCA DE CAFÉ .....                                | 106 |
| 3.13. TRANSPORTE Y MEZCLA DE LA PULPA<br>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 sinfin .....                                   | 111 |
| 3.13.4. Construcción del tornillo sinfin .....                                                              | 111 |
| 3.14. BENEFICIADERO ECOLÓGICO CON MANEJO<br>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 EFLUENTE<br>LÍQUIDO SÓLIDO RESULTANTE DE LOS MÓDULOS BECOLSUB ..... | 120 |
| 3.18. EVALUACIONES DE CAMPO DEL MÓDULO<br>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<br>BECOLSUB 600 MÓVIL .....                               | 125 |
| 3.18.4. Control de la contaminación con el módulo<br>BECOLSUB 1000 MÓVIL .....                              | 127 |
| 3.19. CENTRAL DE BENEFICIO ECOLÓGICO<br>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<br>por desmucilaginado mecánico .....                         | 135 |
| 3.19.3.4. Secado de café en los secadores CENICAFÉ-IFC,<br>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<br>de la CBEA (1992-1993) .....                                          | 140        |
| 3.19.3.11. | Central de Anserma como generadora<br>de tecnología de beneficio .....                                                     | 141        |
| 3.20.      | CURSO INTERNACIONAL SOBRE<br>EL BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ .....                                                         | 143        |
| 3.21.      | COMERCIALIZACIÓN DEL MÓDULO BECOLSUB .....                                                                                 | 143        |
| <b>4.</b>  | <b>SECADO DEL CAFÉ .....</b>                                                                                               | <b>145</b> |
| 4.1.       | CONTENIDO DE HUMEDAD DEL CAFÉ .....                                                                                        | 147        |
| 4.2.       | DETERMINADOR DE HUMEDAD CENICAFÉ MH-2 .....                                                                                | 148        |
| 4.3.       | EVALUACIÓN DE LOS MEDIDORES<br>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<br>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<br>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<br>de Flujos Concurrentes .....                    | 187        |
| <b>5.</b> | <b>RENDIMIENTO DEL CAFÉ CEREZA A CAFÉ PERGAMINO SECO .....</b>                    | <b>189</b> |
| 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<br>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<br>de Beneficio Ecológico de Anserma .....  | 199        |
| <b>6.</b> | <b>LOMBRICULTURA CON SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ .....</b>                              | <b>201</b> |
| 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        |
| <b>7.</b> | <b>RENTABILIDAD DEL BENEFICIO ECOLÓGICO .....</b>                                 | <b>211</b> |
| 7.1.      | BENEFICIOS ECONÓMICOS<br>DE LA TECNOLOGÍA NO CONTAMINANTE .....                   | 213        |
| 7.2.      | GENERALIDADES SOBRE LAS EVALUACIONES<br>ECONÓMICAS DE INVERSIONES .....           | 214        |

|           |                                                                                                                                                          |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.3.      | EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR<br>DEL PROGRAMA DE BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ .....                                                                    | 217        |
| 7.4.      | EVALUACIÓN ECONÓMICA MEDIANTE SOFTWARE<br>DESARROLLADO EN CENICAFÉ. Programa "ANEFSUB" .....                                                             | 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 ANEFSUB .....                                                                                                                   | 224        |
| <b>8.</b> | <b>TRATAMIENTO ANAERÓBICO DE AGUAS RESIDUALES .....</b>                                                                                                  | <b>235</b> |
| 8.1.      | SISTEMA MODULAR DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO DE<br>AGUAS RESIDUALES DE BENEFICIO DEL CAFÉ - SMTA .....                                                      | 237        |
| 8.2.      | PRODUCCIÓN DE LODO METANOGÉNICO PARA EL TRATAMIENTO<br>DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE BENEFICIO<br>HÚMEDO DEL CAFÉ POR BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA ..... | 242        |
| 8.2.1.    | Maduración del lodo .....                                                                                                                                | 242        |
| 8.2.2.    | Arranque .....                                                                                                                                           | 242        |
| 8.2.3.    | Operación .....                                                                                                                                          | 243        |
| <b>9.</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                                                                                                                | <b>247</b> |
|           | APÉNDICE - A .....                                                                                                                                       | 265        |
|           | APÉNDICE - B .....                                                                                                                                       | 266        |
|           | APÉNDICE - C .....                                                                                                                                       | 272        |



# ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                     | Página |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Figura 1.</b> 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     |
| <b>Figura 2.</b> Calidad física del café obtenido con desmucilaginado mecánico sin previa eliminación de flotes y sin zarandear el café despulpado.                                                                                 | 30     |
| <b>Figura 3.</b> Esquema de silos metálicos utilizados para estudios de almacenamiento de café en laboratorio, con aire enfriado y forzado mecánicamente.                                                                           | 34     |
| <b>Figura 4.</b> 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     |
| <b>Figura 5.</b> Contenido de humedad del café como función de las condiciones del aire tratado y del tiempo de almacenamiento.                                                                                                     | 37     |
| <b>Figura 6.</b> Contenido de humedad del café enfriado en condiciones ambientales, como función del tiempo de almacenamiento.                                                                                                      | 37     |
| <b>Figura 7.</b> Granos decolorados como función de las condiciones controladas del aire de enfriamiento mecánico, falta de enfriamiento y el almacenamiento tradicional en sacos.                                                  | 38     |
| <b>Figura 8.</b> 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     |
| <b>Figura 9.</b> Influencia de la temperatura del aire de secado en la viabilidad de la semilla de café secada en capas delgadas.                                                                                                   | 43     |
| <b>Figura 10.</b> Efecto del tiempo y temperatura de almacenamiento del café, durante su almacenamiento prolongado.                                                                                                                 | 44     |
| <b>Figura 11.</b> Germinación normal de las semillas de café obtenidas por desmucilaginado mecánico.                                                                                                                                | 46     |
| <b>Figura 12.</b> Esquema del sistema de transporte por gravedad, de café cereza por cable.                                                                                                                                         | 55     |
| <b>Figura 13.</b> Tolla seca para la recepción del café cereza.                                                                                                                                                                     | 58     |
| <b>Figura 14.</b> 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     |
| <b>Figura 15.</b> Despulpadoras de eje horizontal, operadas sin agua.                                                                                                                                                               | 61     |

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



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



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

|                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 85.</b> 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 |
| <b>Figura 86.</b> Esquema del determinador de Humedad CENICAFÉ MH-2 .....                                                                                                                                                                               | 149 |
| <b>Figura 87.</b> Banco de ocho determinadores de humedad CENICAFÉ MH-2 para control del café recibido y secado en la CBEA. ....                                                                                                                        | 151 |
| <b>Figura 88.</b> Comparación de dos medidores indirectos de humedad con relación al método estándar de estufa. ....                                                                                                                                    | 154 |
| <b>Figura 89.</b> Secador solar rotatorio para café. ....                                                                                                                                                                                               | 156 |
| <b>Figura 90.</b> 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 |
| <b>Figura 91.</b> Secador Solar con estructura de marquesina de plástico en forma parabólica.....                                                                                                                                                       | 157 |
| <b>Figura 92.</b> Comparación del secador de capas de café dispuestas en los carros tradicionales y en el secador solar parabólico .....                                                                                                                | 158 |
| <b>Figura 93.</b> Comparación de los efectos de remoción del rastrillo tradicional y el rastrillo revolvedor CENICAFÉ .....                                                                                                                             | 159 |
| <b>Figura 94.</b> Rastrillo provisto de un muelle o resorte para prolongar su vida útil ..                                                                                                                                                              | 159 |
| <b>Figura 95.</b> Ventilador centrífugo forzando aire a un silo-secador CENICAFÉ.. ...                                                                                                                                                                  | 161 |
| <b>Figura 96.</b> Relaciones de caudales y presiones por el paso del aire a través de capas de granos de café pergamino. ....                                                                                                                           | 163 |
| <b>Figura 97.</b> Curvas de secado de capa fija sin inversión del flujo del aire.....                                                                                                                                                                   | 167 |
| <b>Figura 98.</b> Curvas de secado de capa fija con inversión de la dirección del flujo del aire .....                                                                                                                                                  | 167 |
| <b>Figura 99.</b> 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 |
| <b>Figura 100.</b> 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 |
| <b>Figura 101.</b> Equipo de secado "EScafé" para el aprovechamiento de energía calorífica en los hogares campesinos .....                                                                                                                              | 172 |
| <b>Figura 102.</b> Secadores intermitentes de flujos concurrentes, CENICAFÉ-IFC. ....                                                                                                                                                                   | 173 |
| <b>Figura 103.</b> Esquema de un secador intermitente de flujos concurrentes, CENICAFÉ-IFC. ....                                                                                                                                                        | 174 |
| <b>Figura 104.</b> Diagrama tridimensional de un Secador Intermitente, de Flujos Concurrentes, CENICAFÉ-IFC. ....                                                                                                                                       | 175 |
| <b>Figura 105.</b> Uniformidad en las diferencias entre las humedades absolutas de entrada y de salida al secador.....                                                                                                                                  | 176 |
| <b>Figura 106.</b> Curva de secado obtenida en los secadores CENICAFÉ-IFC. Se caracteriza por la reducción lineal, y humedad uniforme durante el tiempo de secado. ....                                                                                 | 176 |



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



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

# ÍNDICE DE TABLAS

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

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



|                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 44.</b> Tasas de producción de lombricompuesto obtenidas en la CBEA, 1996..                                                                                                                       | 138 |
| <b>Tabla 45.</b> 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 |
| <b>Tabla 46.</b> Comparación del daño mecánico producido por la utilización del rastrillo tradicional y el rastrillo revolovedor, de dientes, CENICAFÉ.                                                    | 160 |
| <b>Tabla 47.</b> Selección del sistema y especificaciones de secado según la producción de la finca                                                                                                        | 161 |
| <b>Tabla 48.</b> Caudales recomendados para el secado del café pergamino en capas estáticas.                                                                                                               | 162 |
| <b>Tabla 49.</b> Poder calorífico de algunos combustibles utilizados en Colombia.                                                                                                                          | 166 |
| <b>Tabla 50.</b> Tiempo total de secado para cada plataforma y para cada prueba, en un secador solar de carros. Humedad final = 11%.                                                                       | 170 |
| <b>Tabla 51.</b> Valores obtenidos de la energía disponible, la energía utilizada en el secado, el tiempo de secado y el contenido de humedad final.                                                       | 173 |
| <b>Tabla 52.</b> Pérdidas o ganancias por comercialización del café lavado*.                                                                                                                               | 193 |
| <b>Tabla 53.</b> Pérdidas de peso del café durante el proceso de fermentación según Carbonel y Vilanova (32).                                                                                              | 195 |
| <b>Tabla 54.</b> Pérdidas de peso del café durante el proceso de fermentación según Boyce (27).                                                                                                            | 195 |
| <b>Tabla 55.</b> Caracterización de la borra del café procedente de la Fábrica de Café Liofilizado, Chinchiná, utilizada para preparar el manto de lodos anaeróbicos.                                      | 239 |
| <b>Tabla 56.</b> SMTA prototipos instalados en finca y promedios de remoción de DQO estimadas. 1994.                                                                                                       | 240 |
| <b>Tabla 57.</b> Características de las corrientes líquidas del SMTA Cenicafe durante pruebas de esfuerzo                                                                                                  | 241 |
| <b>Tabla 58.</b> 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<br>café, en función de la velocidad y de la concentración .....                    | 76     |
| Ecuación < 2 >                                                                                                                             |        |
| Pérdidas de presión en una tubería horizontal de agua<br>con café, en función de la velocidad y de la concentración .....                  | 76     |
| Ecuación < 3 >                                                                                                                             |        |
| Producción de la finca en kilogramos de cps por día<br>$PFKPpD = PF@PpA \times REL@aK \times PDP / 100$ .....                              | 119    |
| Ecuación < 4 >                                                                                                                             |        |
| Producción de la finca en kilogramos de cc por día<br>$PFKCCpD = PFKPpD \times RelCCaP$ .....                                              | 119    |
| Ecuación < 5 >                                                                                                                             |        |
| Capacidad horaria de la unidad BECOLSUB<br>$CapB = PFKCCpD / HorOp$ .....                                                                  | 119    |
| Ecuación < 6 >                                                                                                                             |        |
| Caudal específico como función de la pérdida<br>de presión específica para café pergamino. ....                                            | 162    |
| Ecuación < 7 >                                                                                                                             |        |
| Pérdida de presión específica como función de<br>la pérdida del caudal específico para café pergamino .....                                | 162    |
| Ecuación < 8 >                                                                                                                             |        |
| Potencia necesaria para que el ventilador suministre el caudal<br>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<br>la temperatura del aire que fluye con un caudal Q. ....                          | 166    |

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