

|   |              |
|---|--------------|
| <b>ÍNDICE.</b>  | <b>i.</b>    |
| <b>RELACIÓN DE TABLAS.</b>  | <b>ix.</b>   |
| <b>RELACIÓN DE FIGURAS.</b>   | <b>xvii.</b> |
| <b>1. ANTECEDENTES.</b>   | <b>3.</b>    |
| 1.1. Generalidades sobre la caficultura colombiana.                                       | 4.           |
| 1.2. Producción de café en Colombia.  | 4.           |
| 1.3. El proceso de beneficio húmedo del café.   | 5.           |
| 1.3.1. Beneficio convencional del café.   | 6.           |
| 1.3.2. Beneficio ecológico del café.  | 6.           |
| 1.3.3. Análisis del proceso de beneficio húmedo del café.                                 | 7.           |
| 1.3.4. Desventajas del beneficio convencional<br>y ventajas del beneficio ecológico.      | 8.           |
| 1.4. Principales subproductos del proceso del café.                                       | 11.          |
| 1.4.1. Pulpa de café.   | 12.          |
| 1.4.1.1. Abono orgánico a partir de la pulpa de café.                                     | 12.          |
| 1.4.1.2. Hongos comestibles y medicinales utilizando pulpa de café.                       | 13.          |
| 1.4.1.3. Ensilaje de pulpa de café.   | 15.          |
| 1.4.1.4. Pectinas a partir de la pulpa de café.   | 15.          |
| 1.4.1.5. Biocombustibles de pulpa de café.  | 15.          |
| 1.4.2. Mucílago de café.  | 17.          |
| 1.4.2.1. Abono de mucílago de café.   | 18.          |
| 1.4.2.2. Alimentación animal a partir de mucílago de café.                                | 18.          |
| 1.4.2.3. Producción de pectinas de mucílago de café.                                      | 18.          |
| 1.4.2.4. Biocombustibles del mucílago de café.  | 18.          |
| 1.4.3. Mucílago fermentado de café.   | 19.          |
| 1.5. Características físico-químicas y microbiológicas de las aguas residuales del café.  | 20.          |
| 1.6. Legislación Ambiental Colombiana relacionada con las aguas residuales.               | 27.          |
| 1.6.1. Decreto N° 2811 de 1974.   | 27.          |
| 1.6.2. Decreto N° 1594 de 1984.   | 28.          |
| 1.6.3. Decreto N° 901 de 1997.  | 30.          |
| 1.6.4. Resolución N° 273 del 1997.  | 31.          |
| 1.6.5. Reglamento de agua potable y saneamiento (RAS).                                    | 31.          |
| 1.6.6. Decreto N° 3100 del 2003.  | 31.          |
| 1.6.7. Decreto N° 3440 del 2004.  | 31.          |
| 1.6.8. Los beneficiaderos de café y la legislación ambiental colombiana.                  | 32.          |
| 1.6.9. Contaminación generada en el beneficio del café según el tipo de<br>beneficiadero. | 32.          |
| 1.7. Sistemas de tratamiento utilizados para las aguas residuales del café.               | 34.          |
| 1.7.1. Tratamiento preliminar.  | 34.          |
| 1.7.2. Tratamiento primario.  | 35.          |
| 1.7.3. Tratamiento secundario.  | 36.          |
| 1.7.3.1. Tratamientos físico-químicos utilizados como tratamientos secundarios.           | 36.          |
| 1.7.3.2. Procesos biológicos utilizados como tratamientos secundarios.                    | 37.          |
| 1.7.3.2.1. Tratamientos biológicos aerobios.  | 37.          |
| 1.7.3.2.1.1. Lodos activados.   | 38.          |

|  |     |
|--|-----|
| 1.7.3.2.1.2. Filtros percoladores.   | 38. |
| 1.7.3.2.1.3. Biodiscos.  | 39. |
| 1.7.3.2.1.4. Lagunas de maduración.  | 39. |
| 1.7.3.2.2. Tratamientos biológicos anaerobios.                                       | 40. |
| 1.7.3.2.2.1. Lagunas anaerobias.   | 41. |
| 1.7.3.2.2.2. Reactor de Manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente.              | 41. |
| 1.7.3.2.2.3. Filtros anaeróbicos.  | 43. |
| 1.7.3.2.3. Comparación entre los tratamientos aeróbicos y anaeróbicos.               | 44. |
| 1.7.3.2.4. Investigaciones adelantadas en Cenicafé.                                  | 45. |
| 1.7.3.2.4.1. Investigaciones a escala de laboratorio.                                | 46. |
| 1.7.3.2.4.2. Investigaciones a escala de planta piloto.                              | 48. |
| 1.7.3.2.4.3. Investigaciones a escala de campo.                                      | 50. |
| 1.7.4. Tratamiento terciario.  | 52. |
| 1.8. Sistemas de tratamiento naturales de aguas residuales.                          | 53. |
| 1.8.1. Sistemas de aplicación al suelo.  | 53. |
| 1.8.1.1. Riego.  | 54. |
| 1.8.1.2. Escorrentía sobre cubierta vegetal.   | 55. |
| 1.8.1.3. Infiltración – Percolación.   | 56. |
| 1.8.2. Sistemas Acuáticos.   | 57. |
| 1.8.2.1. Humedales.  | 57. |
| 1.8.2.1.1. Potencial de los humedales en el tratamiento de aguas residuales.         | 57. |
| 1.8.2.1.2. Clasificación de los humedales artificiales.                              | 58. |
| 1.8.2.1.3. Ventajas y desventajas de los humedales artificiales.                     | 60. |
| 1.8.2.1.4. Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales.                     | 61. |
| 1.8.2.1.5. Diseño de humedales artificiales.   | 62. |
| 1.8.2.1.5.1. Tiempo de detención hidráulica.   | 62. |
| 1.8.2.1.5.2. Área Transversal.   | 65. |
| 1.8.2.1.5.3. Ancho del estanque.   | 65. |
| 1.8.2.1.5.4. Área necesaria.   | 65. |
| 1.8.2.1.5.5. Carga hidráulica.   | 66. |
| 1.8.2.1.5.6. Carga orgánica.   | 66. |
| 1.8.2.1.5.7. Diseño hidráulico.  | 68. |
| 1.8.2.1.5.7.1. Humedales de flujo libre.   | 68. |
| 1.8.2.1.5.7.2. Humedales de flujo subsuperficial.                                    | 70. |
| 1.8.2.1.5.8. Procedimiento para el diseño de humedales artificiales.                 | 71. |
| 1.8.2.1.6. Manejo de humedales artificiales.   | 72. |
| 1.8.2.1.6.1. Control de mosquitos.   | 72. |
| 1.8.2.1.6.2. Cosecha de la vegetación.   | 73. |
| 1.8.2.1.6.3. Vida silvestre.   | 73. |
| 1.8.2.1.6.4. Monitoreo y Control.  | 73. |
| 1.8.2.2. Sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas.                         | 73. |
| 1.8.2.2.1. Potencial de las plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales. | 74. |
| 1.8.2.2.1.1. Experiencias en el tratamiento de las aguas residuales del café.        | 75. |
| 1.8.2.2.2. Clasificación de las plantas acuáticas.                                   | 77. |
| 1.8.2.2.3. Ventajas y desventajas del uso de plantas acuáticas.                      | 77. |

|   |             |
|---|-------------|
| 1.8.2.2.4. Mecanismos de remoción de contaminantes en sistemas con plantas acuáticas.                           | 78.         |
| 1.8.2.2.5. Diseño de sistemas de tratamiento con plantas acuáticas.   | 79.         |
| 1.8.2.2.6. Análisis de las constantes de la tasa de remoción de los constituyentes.                             | 82.         |
| 1.8.2.2.6.1. Modelamiento de la remoción de la DBO.   | 82.         |
| 1.8.2.2.6.2. Modelamiento de la remoción de los SST.  | 83.         |
| 1.8.2.2.6.3. Impacto del TRH sobre las constantes de la tasa de remoción para la DBO y los SST.                 | 83.         |
| 1.8.2.2.6.4. Impacto del decaimiento de la vegetación en sistemas acuáticos de tratamiento.                     | 83.         |
| 1.8.2.2.7. Manejo de sistemas de tratamiento con plantas acuáticas.   | 84.         |
| 1.8.2.2.7.1. Control de mosquitos.  | 84.         |
| 1.8.2.2.7.2. Manejo de la vegetación.   | 84.         |
| 1.8.2.2.7.3. Manejo de lodos.   | 84.         |
| 1.8.2.2.8. Especies acuáticas utilizadas en la presente investigación.  | 85.         |
| 1.8.2.2.8.1. Jacinto acuático ( <i>Eichhornia crassipes</i> ).  | 85.         |
| 1.8.2.2.8.2. Lechuga de agua ( <i>Pistia stratiotes</i> ).  | 87.         |
| 1.8.2.2.8.3. Enea ( <i>Typha angustifolia</i> ).  | 89.         |
| 1.8.2.2.8.4. Oreja de agua ( <i>Salvinia auriculata</i> ).  | 91.         |
| 1.8.2.2.8.5. Densidades operacionales de las plantas en el tratamiento de aguas residuales.                     | 93.         |
| 1.8.2.2.9. Utilización de la biomasa proveniente de los sistemas de tratamiento.                                | 94.         |
| 1.9. Los Biosistemas Integrados.  | 95.         |
| 1.9.1. Biosistemas Integrados en Sistemas Acuáticos de Tratamiento.   | 97.         |
| <b>2. OBJETIVOS.</b>  | <b>101.</b> |
| <b>3. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS EFLUENTES DEL SMTA EN SISTEMAS ACUÁTICOS DE TRATAMIENTO (Ensayo 1).</b> | <b>105.</b> |
| 3.1. Introducción.  | 105.        |
| 3.2. Objetivos.   | 107.        |
| 3.3. Materiales y métodos.  | 108.        |
| 3.3.1. Lugar donde se realizó la investigación.   | 108.        |
| 3.3.2. Fecha de realización.  | 108.        |
| 3.3.3. Materiales.  | 109.        |
| 3.3.3.1. Sustratos.   | 109.        |
| 3.3.3.2. Material biológico.  | 111.        |
| 3.3.3.3. Materiales de laboratorio.   | 112.        |
| 3.3.3.4. Materiales de construcción   | 112.        |
| 3.3.4. Métodos.   | 113.        |
| 3.3.4.1. Construcción de las lagunas de experimentación.  | 114.        |
| 3.3.4.2. Regulación del flujo del agua a postratar.   | 118.        |
| 3.3.4.3. Determinación de la Porosidad y la Conductividad Hidráulica de las lagunas.                            | 118.        |
| 3.3.4.4. Densidad de arranque de las plantas evaluadas.   | 124.        |
| 3.3.4.5. Evaluación de la depuración alcanzada con las macrófitas.  | 126.        |

|  |             |
|--|-------------|
| 3.3.4.6. Muestréos y análisis del agua.  | 127.        |
| 3.3.4.7. Variables climáticas.   | 137.        |
| 3.3.4.8. Muestreo y caracterización de la biomasa.   | 138.        |
| 3.3.5. Análisis de la información.   | 141.        |
| 3.4. Resultados y Discusión.   | 143.        |
| 3.4.1. Condiciones climáticas durante el ensayo.   | 143.        |
| 3.4.1.1. Tasas de evaporación y evapotranspiración.  | 144.        |
| 3.4.2. Resultados de las variables evaluadas durante el proceso de depuración.                                   | 145.        |
| 3.4.2.1. Caudales.   | 146.        |
| 3.4.2.2. pH.   | 149.        |
| 3.4.2.3. Temperatura.  | 150.        |
| 3.4.2.4. Tiempo de detención hidráulica.   | 151.        |
| 3.4.2.5. Oxígeno disuelto.   | 152.        |
| 3.4.2.6. Alcalinidad y Relación de Alcalinidad.  | 154.        |
| 3.4.2.7. Color y Turbiedad.  | 155.        |
| 3.4.2.8. Constituyentes orgánicos.   | 156.        |
| 3.4.2.8.1. Sólidos Totales (ST).   | 156.        |
| 3.4.2.8.2. Sólidos Suspendedos Totales (SST).  | 158.        |
| 3.4.2.8.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO).   | 160.        |
| 3.4.2.8.4. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).   | 163.        |
| 3.4.2.8.5. Carga Hidráulica (L <sub>w</sub> ) y Carga Orgánica (C <sub>L</sub> ).                                | 165.        |
| 3.4.2.9. Nutrientos.   | 166.        |
| 3.4.2.9.1. Nitrógeno Total Kjeldahl (N-NTK).   | 166.        |
| 3.4.2.9.2. Nitrógeno amoniacal (N-NH <sub>3</sub> ) y Nitrógeno nítrico (N-NO <sub>3</sub> ).                    | 168.        |
| 3.4.2.9.3. Nitrógeno Orgánico y Nitrógeno Total.   | 171.        |
| 3.4.2.9.4. Fosfatos totales y filtrados.   | 173.        |
| 3.4.2.9.5. Potasio y Sulfatos.   | 175.        |
| 3.4.2.10. Coliformes Totales y Fecales.  | 176.        |
| 3.4.3. Determinación de los coeficientes de eliminación de nutrientes.   | 178.        |
| 3.4.4. Análisis estadístico de las variables respuesta.  | 181.        |
| 3.4.4.1. Análisis de varianza.   | 181.        |
| 3.4.4.2. Comparación de promedios mediante Prueba Tukey.   | 188.        |
| 3.4.5. Efecto de las lagunas experimentales en la remoción de los parámetros de interés.                         | 201.        |
| 3.4.6. Caracterización de la biomasa.  | 210.        |
| 3.4.6.1. Tasas de crecimiento.   | 210.        |
| 3.4.6.1.1. Tasas de crecimiento de las especies flotantes.   | 210.        |
| 3.4.6.1.2. Tasa de crecimiento de la especie emergente.  | 213.        |
| 3.4.6.1.3. Efecto de la concentración del afluente sobre la tasa de crecimiento de las especies evaluadas.       | 217.        |
| 3.4.6.2. Contenido de minerales.   | 220.        |
| 3.4.7. Obtención de ecuaciones de regresión múltiple.  | 228.        |
| 3.5. Conclusiones.   | 229.        |
| <b>4. EFECTO DE LA CARGA ORGÁNICA DE LOS EFLUENTES DEL SMTA EN SISTEMAS ACUÁTICOS DE TRATAMIENTO (Ensayo 2).</b> | <b>235.</b> |

|  |      |
|--|------|
| 4.1. Introducción.   | 235. |
| 4.2. Objetivos.  | 236. |
| 4.3. Materiales y métodos.   | 237. |
| 4.3.1. Lugar donde se realizó la investigación.  | 237. |
| 4.3.2. Fecha de realización.   | 237. |
| 4.3.3. Materiales.   | 237. |
| 4.3.4. Métodos.  | 239. |
| 4.3.4.1. Densidad de arranque de las plantas evaluadas.  | 239. |
| 4.3.4.2. Evaluación de la depuración alcanzada con las macrófitas.   | 239. |
| 4.3.4.3. Muestras y análisis del agua.   | 240. |
| 4.3.4.4. Variables climáticas.   | 240. |
| 4.3.4.5. Muestreo y caracterización de la biomasa.   | 241. |
| 4.3.5. Análisis de la información.   | 241. |
| 4.4. Resultados y Discusión.   | 242. |
| 4.4.1. Condiciones climáticas en las que se desarrolló el ensayo.  | 242. |
| 4.4.2. Resultados de las variables evaluadas durante el proceso de depuración.   | 243. |
| 4.4.2.1. Caudales.   | 244. |
| 4.4.2.2. pH.   | 245. |
| 4.4.2.3. Temperatura.  | 245. |
| 4.4.2.4. Tiempo de detención hidráulica.   | 245. |
| 4.4.2.5. Alcalinidad y Relación de Alcalinidad.  | 246. |
| 4.4.2.6. Constituyentes orgánicos.   | 247. |
| 4.4.2.6.1. Sólidos Totales (ST).   | 247. |
| 4.4.2.6.2. Sólidos Suspendidos Totales (SST).  | 249. |
| 4.4.2.6.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO).   | 250. |
| 4.4.2.6.4. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).   | 251. |
| 4.4.2.6.5. Carga Hidráulica (L <sub>w</sub> ) y Carga Orgánica (C <sub>L</sub> ).  | 253. |
| 4.4.2.7. Nutrientes.   | 254. |
| 4.4.2.7.1. Nitrógeno Total Kjeldahl (N-NTK).   | 254. |
| 4.4.2.7.2. Nitrógeno amoniacal (N-NH <sub>3</sub> ) y Nitrógeno nítrico (N-NO <sub>3</sub> ).  | 256. |
| 4.4.2.7.3. Nitrógeno Orgánico y Nitrógeno Total.   | 258. |
| 4.4.2.7.4. Fosfatos totales y filtrados.   | 259. |
| 4.4.2.7.5. Potasio y Sulfatos.   | 261. |
| 4.4.2.8. Coliformes Totales y Fecales.   | 263. |
| 4.4.3. Análisis estadístico de las variables respuesta.  | 266. |
| 4.4.3.1. Efecto de las lagunas experimentales en la remoción de los parámetros de interés.   | 274. |
| 4.4.4. Caracterización de la biomasa.  | 281. |
| 4.4.4.1. Tasas de crecimiento.   | 281. |
| 4.4.4.2. Efecto de la carga orgánica del afluente sobre la tasa de crecimiento de las especies evaluadas.                                  | 285. |
| 4.4.4.3. Contenido de minerales.   | 289. |
| 4.4.5. Comparación de promedios obtenidos de las variables respuesta a los 3 regímenes de caudal (ensayos 1 y 2) mediante la Prueba Tukey. | 296. |
| 4.4.6. Selección de la mejor especie para el postratamiento de las aguas mieles del café.  | 303. |

|   |             |
|---|-------------|
| 4.4.7. Obtención de ecuaciones de regresión múltiple.   | 305.        |
| 4.5. Conclusiones.  | 307.        |
| <b>5. MONOCULTIVO vs COMBINACIÓN DE ESPECIES EN SISTEMAS ACUÁTICOS CON EFLUENTES DE LOS SMTA (Ensayo 3).</b>                  | <b>313.</b> |
| 5.1. Introducción.  | 313.        |
| 5.2. Objetivos e hipótesis.   | 314.        |
| 5.3. Materiales y métodos.  | 315.        |
| 5.3.1. Lugar donde se realizó la investigación.   | 315.        |
| 5.3.2. Fecha de realización.  | 315.        |
| 5.3.3. Materiales.  | 315.        |
| 5.3.4. Métodos.   | 317.        |
| 5.3.4.1. Densidad de arranque de las plantas evaluadas.   | 317.        |
| 5.3.4.2. Evaluación de la depuración alcanzada con las macrófitas.  | 317.        |
| 5.3.4.3. Muestras y análisis del agua.  | 318.        |
| 5.3.4.4. Variables climáticas.  | 319.        |
| 5.3.4.5. Muestreo y caracterización de la biomasa.  | 319.        |
| 5.3.5. Análisis de la información.  | 319.        |
| 5.4. Resultados y Discusión.  | 320.        |
| 5.4.1. Condiciones climáticas en las que se desarrolló el ensayo.   | 320.        |
| 5.4.2. Resultados de las variables evaluadas durante el proceso de depuración.  | 321.        |
| 5.4.2.1. Caudales.  | 321.        |
| 5.4.2.2. pH.  | 322.        |
| 5.4.2.3. Temperatura.   | 323.        |
| 5.4.2.4. Tiempo de detención hidráulica.  | 323.        |
| 5.4.2.5. Constituyentes orgánicos.  | 325.        |
| 5.4.2.5.1. Sólidos Totales (ST).  | 325.        |
| 5.4.2.5.2. Sólidos Suspendidos Totales (SST).   | 326.        |
| 5.4.2.5.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO).  | 327.        |
| 5.4.2.5.4. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).  | 333.        |
| 5.4.2.5.5. Carga Hidráulica (L <sub>w</sub> ) y Carga Orgánica (C <sub>L</sub> ).   | 334.        |
| 5.4.2.6. Nutrientes.  | 335.        |
| 5.4.2.6.1. Nitrógeno Total Kjeldahl (N-NTK).  | 335.        |
| 5.4.2.6.2. Nitrógeno amoniacal (N-NH <sub>3</sub> ) y Nitrógeno nítrico (N-NO <sub>3</sub> ).                                 | 337.        |
| 5.4.2.6.3. Nitrógeno Orgánico y Nitrógeno Total.  | 339.        |
| 5.4.2.6.4. Fosfatos totales y filtrados.  | 341.        |
| 5.4.2.6.5. Potasio y Sulfatos.  | 342.        |
| 5.4.2.7. Coliformes Totales y Fecales.  | 345.        |
| 5.4.3. Análisis estadístico de las variables respuesta.   | 347.        |
| 5.4.3.1. Comparación de promedios mediante Prueba Tukey.  | 351.        |
| 5.4.3.2. Efecto de las líneas en la remoción de los parámetros de interés.  | 352.        |
| 5.4.3.3. Ecuaciones de regresión para la mejor especie ( <i>E. crassipes</i> ).   | 354.        |
| 5.4.3.4. Coeficientes cinéticos de eliminación de la DQO y la DBO <sub>5</sub> para la mejor especie ( <i>E. crassipes</i> ). | 357.        |
| 5.4.4. Caracterización de la biomasa.   | 357.        |
| 5.4.4.1. Tasas de crecimiento.  | 357.        |

|  |             |
|--|-------------|
| 5.4.4.2. Contenido de minerales.   | 364.        |
| 5.5. Conclusiones.   | 373.        |
| <b>6. EVALUACIÓN A ESCALA DE FINCA CAFETERA.</b>   | <b>377.</b> |
| 6.1. Introducción.   | 377.        |
| 6.2. Objetivos.  | 378.        |
| 6.3. Materiales y métodos.   | 379.        |
| 6.3.1. Lugar donde se realizó la investigación.  | 379.        |
| 6.3.2. Fecha de realización.   | 379.        |
| 6.3.3. Materiales.   | 379.        |
| 6.3.3.1. Sustratos.  | 379.        |
| 6.3.3.2. Material biológico.   | 379.        |
| 6.3.3.3. Lagunas.  | 379.        |
| 6.3.4. Métodos.  | 381.        |
| 6.3.4.1. Densidad de arranque de las plantas evaluadas.  | 381.        |
| 6.3.4.2. Evaluación de la depuración alcanzada en el sistema de tratamiento.                                       | 381.        |
| 6.3.4.3. Variables climáticas.   | 381.        |
| 6.4. Resultados y Discusión.   | 383.        |
| 6.5. Conclusiones.   | 391.        |
| <b>7. APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA GENERADA EN SISTEMAS ACUÁTICOS DE TRATAMIENTO.</b>                             | <b>395.</b> |
| 7.1. Introducción.   | 395.        |
| 7.1.1. Cultivo de hongos comestibles y medicinales.  | 395.        |
| 7.1.1.1. Descripción de los géneros de hongos evaluados en la presente investigación.                              | 396.        |
| 7.1.1.2. Cultivo de hongos comestibles y medicinales sobre subproductos agrícolas generados en la zona cafetera.   | 397.        |
| 7.1.1.3. Cultivo de hongos comestibles sobre biomasa de macrófitas.  | 398.        |
| 7.1.1.4. Cultivo de hongos comestibles en sustratos que utilicen biomasa de macrófitas y subproductos del café.    | 399.        |
| 7.1.2. Producción de abono orgánico.   | 400.        |
| 7.1.2.1. Compostaje.   | 400.        |
| 7.1.2.2. Lombricompostaje.   | 400.        |
| 7.1.2.2.1. Lombricompostaje con biomasa de macrófitas.   | 401.        |
| 7.2. Objetivos e hipótesis.  | 402.        |
| 7.3. Materiales y métodos.   | 403.        |
| 7.3.1. Lugar donde se realizó la investigación.  | 403.        |
| 7.3.2. Fecha de realización.   | 403.        |
| 7.3.3. Materiales.   | 403.        |
| 7.3.3.1. Sustratos.  | 403.        |
| 7.3.3.2. Material biológico.   | 403.        |
| 7.3.4. Métodos.  | 404.        |
| 7.3.4.1. Aprovechamiento de la biomasa de sistemas acuáticos en la producción de hongos comestibles y medicinales. | 404.        |
| 7.3.4.1.1. Cultivo de hongos del género <i>Pleurotus</i> spp.  | 404.        |
| 7.3.4.1.2. Cultivo del hongo <i>Lentinula edodes</i> .   | 405.        |

|   |             |
|---|-------------|
| 7.3.4.1.3. Metodología para el cultivo de los hongos comestibles y medicinales.   | 405.        |
| 7.3.4.1.4. Análisis de la información.  | 409.        |
| 7.3.4.2. Aprovechamiento de la biomasa de sistemas acuáticos en la producción de abono orgánico mediante la lombricultura.  | 409.        |
| 7.3.4.2.1. Análisis de la información.  | 411.        |
| 7.4. Resultados y Discusión.  | 412.        |
| 7.4.1. Cultivo de hongos comestibles del género <i>Pleurotus</i> spp.   | 412.        |
| 7.4.1.1. Etapa de adecuación de sustratos e inoculación.  | 412.        |
| 7.4.1.2. Etapa de Incubación.   | 415.        |
| 7.4.1.2.1. Tiempo de incubación.  | 417.        |
| 7.4.1.3. Etapa de Fructificación.   | 417.        |
| 7.4.1.3.1. Precocidad.  | 419.        |
| 7.4.1.3.2. Tiempo de fructificación.  | 419.        |
| 7.4.1.4. Análisis de la información.  | 420.        |
| 7.4.1.4.1. Rendimientos.  | 420.        |
| 7.4.1.4.2. Análisis de varianza.  | 421.        |
| 7.4.2. Cultivo del hongo comestible y medicinal <i>Lentinula edodes</i> .   | 423.        |
| 7.4.2.1. Etapa de adecuación de sustratos e inoculación.  | 423.        |
| 7.4.2.2. Etapa de Incubación.   | 425.        |
| 7.4.3. Producción de abono orgánico mediante la lombricultura.  | 426.        |
| 7.4.3.1. Lombricompuestos a partir de la biomasa inicial de <i>E. crassipes</i> .   | 426.        |
| 7.4.3.2. Lombricompuestos a partir de biomasa seca proveniente de sistemas acuáticos de tratamiento.  | 428.        |
| 7.4.3.3. Lombricompuestos a partir de biomasa fresca proveniente de sistemas acuáticos de tratamiento.  | 431.        |
| 7.4.3.4. Comparación en los valores N, P, K obtenidos en los lombricompuestos provenientes de biomasa fresca y seca de las plantas utilizadas en los sistemas acuáticos de tratamiento. | 434.        |
| 7.5. Conclusiones.  | 437.        |
| <b>8. ANÁLISIS DE LAS VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS DIFERENTES COMBINACIONES DE SISTEMAS ACUÁTICOS ESTUDIADOS.</b>   | <b>443.</b> |
| 8.1. Sistema acuático de tratamiento utilizando <i>E. crassipes</i> como única especie.   | 443.        |
| 8.2. Sistema acuático de tratamiento utilizando una mezcla de <i>E. crassipes</i> , <i>P. stratiotes</i> y <i>S. auriculata</i> .   | 444.        |
| 8.3. Sistema acuático de tratamiento utilizando en serie <i>E. crassipes</i> , <i>P. stratiotes</i> , <i>T. angustifolia</i> y <i>S. auriculata</i> .                                   | 445.        |
| <b>9. CONCLUSIONES GENERALES.</b>   | <b>449.</b> |
| <b>10. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.</b>   | <b>455.</b> |
| <b>11. BIBLIOGRAFÍA.</b>  | <b>459.</b> |
| <b>12. ANEXOS.</b>  | <b>485.</b> |
| <b>13. GLOSARIO.</b>  | <b>505.</b> |

## RELACIÓN DE TABLAS.

|  |      |
|--|------|
| <b>Tabla 1.1.</b> Producción de café en Colombia en los últimos 7 años.  | 5.   |
| <b>Tabla 1.2.</b> Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1 kilogramo de café cereza en Colombia.                             | 11.  |
| <b>Tabla 1.3.</b> Caracterización de aguas residuales del beneficio del café.  | 21.  |
| <b>Tabla 1.4.</b> Caracterización, en el tiempo, de las aguas de despulpado de café.   | 22.  |
| <b>Tabla 1.5.</b> Caracterización, en el tiempo, de las aguas de lavado de café.   | 23.  |
| <b>Tabla 1.6.</b> Recuento microbiano en aguas de despulpado con 48 horas de generadas.  | 23.  |
| <b>Tabla 1.7.</b> Comparación de las características físico-químicas de las aguas residuales del beneficio del café con las aguas residuales domésticas.   | 24.  |
| <b>Tabla 1.8.</b> Características de las aguas residuales del café obtenidas utilizando 1 litro de agua/kg de fruto.                                       | 25.  |
| <b>Tabla 1.9.</b> Caracterización de los residuos líquidos del proceso de beneficio del café.  | 26.  |
| <b>Tabla 1.10.</b> Características de las aguas residuales del café generadas en El Salvador   | 26.  |
| <b>Tabla 1.11.</b> Algunas características de las aguas de lavado de café.   | 27.  |
| <b>Tabla 1.12.</b> Criterios de calidad del agua, según su uso. Decreto 1595/84.   | 29.  |
| <b>Tabla 1.13.</b> Normas de vertimiento a un cuerpo de agua.  | 30.  |
| <b>Tabla 1.14.</b> Contaminación generada en diferentes tipos de beneficiaderos húmedos de café, en Colombia.  | 32.  |
| <b>Tabla 1.15.</b> Comparación entre los tratamientos aerobios y anaerobios.   | 44.  |
| <b>Tabla 1.16.</b> Algunos tratamientos terciarios y su efecto buscado.  | 52.  |
| <b>Tabla 1.17.</b> Características y calidad esperada del efluente en sistemas de aplicación al suelo.   | 56.  |
| <b>Tabla 1.18.</b> Principales mecanismos de remoción y transformación de los contaminantes en los humedales artificiales.                                 | 62.  |
| <b>Tabla 1.19.</b> Valores indicativos para el diseño de humedales.  | 67.  |
| <b>Tabla 1.20.</b> Criterios típicos para el diseño de humedales y calidad de los efluentes esperados.   | 67.  |
| <b>Tabla 1.21.</b> Características típicas del medio en humedales de flujo subsuperficial.   | 68.  |
| <b>Tabla 1.22.</b> Criterios de diseño típicos y calidad del efluente esperada en sistemas de tratamiento con plantas acuáticas flotantes.                 | 81.  |
| <b>Tabla 3.1.</b> Descripción de los tratamientos evaluados en el ensayo.  | 113. |
| <b>Tabla 3.2.</b> Características del Agrobblack Esp. 6.   | 115. |
| <b>Tabla 3.3.</b> Condiciones climáticas en las que se desarrolló el ensayo.   | 144. |
| <b>Tabla 3.4.</b> Tasas de evaporación y evapotranspiración en el estado estable del ensayo.   | 144. |
| <b>Tabla 3.5.</b> Valores promedio de Caudal, pH y Temperatura, en el estado estable.  | 148. |
| <b>Tabla 3.6.</b> Valores promedio del volumen efectivo de las lagunas y del Tiempo de detención hidráulica durante todo el ensayo y en el estado estable. | 152. |
| <b>Tabla 3.7.</b> Valores promedio de O <sub>2</sub> disuelto, Alcalinidad y Relación de Alcalinidad, en el estado estable.                                | 153. |
| <b>Tabla 3.8.</b> Valores promedio de Color Verdadero y Turbiedad en el estado estable.  | 156. |
| <b>Tabla 3.9.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de los Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales en el estado estable.                    | 157. |

|  |      |
|--|------|
| <b>Tabla 3.10.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de la DQO total y DQO filtrada en el estado estable.   | 161. |
| <b>Tabla 3.11.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción DBO <sub>5</sub> , y valores promedio de Carga Hidráulica y Carga Orgánica aplicadas en el estado estable. | 163. |
| <b>Tabla 3.12.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Nitrógeno Kjeldahl, Total y filtrado, en el estado estable.   | 167. |
| <b>Tabla 3.13.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Nítrico, en el estado estable.  | 169. |
| <b>Tabla 3.14.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Nitrógeno Orgánico y Nitrógeno Total, en el estado estable.   | 172. |
| <b>Tabla 3.15.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Fosfatos totales y filtrados en el estado estable.  | 174. |
| <b>Tabla 3.16.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Potasio y Sulfatos en el estado estable.  | 176. |
| <b>Tabla 3.17.</b> Valores promedio de Coliformes totales y fecales en el estado estable.  | 177. |
| <b>Tabla 3.18.</b> Valores promedio de Remoción de Coliformes totales y fecales en el estado estable.  | 178. |
| <b>Tabla 3.19.</b> Valores del coeficiente cinético de eliminación en lagunas operando con afluentes sin diluir, en el estado estable.                                   | 179. |
| <b>Tabla 3.20.</b> Valores del coeficiente cinético de eliminación en lagunas operando con afluentes diluidos al 40%, en el estado estable.                              | 180. |
| <b>Tabla 3.21.</b> Valores del coeficiente cinético de eliminación en lagunas operando con afluentes diluidos al 10%, en el estado estable.                              | 180. |
| <b>Tabla 3.22.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para el Control Flotantes.                  | 182. |
| <b>Tabla 3.23.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>T. angustifolia</i> .               | 183. |
| <b>Tabla 3.24.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para el Control Emergente.                  | 184. |
| <b>Tabla 3.25.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>S. auriculata</i> .                 | 185. |
| <b>Tabla 3.26.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>P. stratiotes</i> .                 | 186. |
| <b>Tabla 3.27.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>E. crassipes</i> .                  | 187. |
| <b>Tabla 3.28.</b> Comparación de promedios en las variables porcentaje de remoción.   | 188. |
| <b>Tabla 3.29.</b> Comparación de promedios en las variables Coeficiente de eliminación.   | 189. |
| <b>Tabla 3.30.</b> Remoción promedio de contaminantes de cada laguna experimental (efecto del empaque, columna de agua, sedimentos y plantas).                           | 202. |
| <b>Tabla 3.31.</b> Remoción promedio de contaminantes de cada laguna experimental (efecto solamente de las plantas).   | 203. |
| <b>Tabla 3.32.</b> Tasa de crecimiento de las macrófitas, en g/m <sup>2</sup> -día, en el estado estable.  | 212. |
| <b>Tabla 3.33.</b> Tasa de crecimiento de <i>T. angustifolia</i> , en g/m <sup>2</sup> -día, en el estado estable.   | 214. |

|  |      |
|--|------|
| <b>Tabla 3.34.</b> Tasas de crecimiento de <i>T. angustifolia</i> , en cm/d.   | 215. |
| <b>Tabla 3.35.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>E. crassipes</i> .  | 220. |
| <b>Tabla 3.36.</b> N, P, K, tomados por <i>E. crassipes</i> durante el estado estable.   | 222. |
| <b>Tabla 3.37.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>P. stratiotes</i> .   | 223. |
| <b>Tabla 3.38.</b> N, P, K, tomados por <i>P. stratiotes</i> durante el estado estable.  | 225. |
| <b>Tabla 3.39.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>S. auriculata</i> .   | 226. |
| <b>Tabla 3.40.</b> N, P, K, tomados por <i>S. auriculata</i> durante el estado estable.  | 226. |
| <b>Tabla 3.41.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>T. angustifolia</i> .   | 227. |
| <b>Tabla 3.42.</b> N, P, K, tomados por <i>T. angustifolia</i> durante el estado estable.  | 228. |
| <b>Tabla 4.1.</b> Descripción de los tratamientos evaluados en el ensayo.  | 240. |
| <b>Tabla 4.2.</b> Condiciones climáticas en las que se desarrolló el ensayo.   | 242. |
| <b>Tabla 4.3.</b> Valores promedio de Caudal, pH y Temperatura.  | 244. |
| <b>Tabla 4.4.</b> Valores promedio de TRH, Alcalinidad y Relación de Alcalinidad.  | 246. |
| <b>Tabla 4.5.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de los Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales.   | 248. |
| <b>Tabla 4.6.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de la DQO total y DQO filtrada.   | 250. |
| <b>Tabla 4.7.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción DBO <sub>5</sub> , y valores promedio de Carga Hidráulica y Carga Orgánica aplicadas.                             | 252. |
| <b>Tabla 4.8.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Nitrógeno Kjeldahl, Total y filtrado.  | 255. |
| <b>Tabla 4.9.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Nítrico.   | 256. |
| <b>Tabla 4.10.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Nitrógeno Orgánico y Nitrógeno Total.   | 258. |
| <b>Tabla 4.11.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Fosfatos totales y filtrados.   | 260. |
| <b>Tabla 4.12.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Potasio y Sulfatos.   | 262. |
| <b>Tabla 4.13.</b> Valores promedio de Coliformes totales y fecales.   | 264. |
| <b>Tabla 4.14.</b> Valores promedio de Remoción de Coliformes totales y fecales.   | 265. |
| <b>Tabla 4.15.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>E. crassipes</i> . 1,5Q <sub>1</sub> .    | 266. |
| <b>Tabla 4.16.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>E. crassipes</i> . 2Q <sub>1</sub> .      | 267. |
| <b>Tabla 4.17.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>P. stratiotes</i> . 1,5Q <sub>1</sub> .   | 268. |
| <b>Tabla 4.18.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>P. stratiotes</i> . 2Q <sub>1</sub> .     | 269. |
| <b>Tabla 4.19.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>S. auriculata</i> . 1,5Q <sub>1</sub> .   | 270. |
| <b>Tabla 4.20.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>S. auriculata</i> . 2Q <sub>1</sub> .     | 271. |
| <b>Tabla 4.21.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>T. angustifolia</i> . 1,5Q <sub>1</sub> . | 272. |

|  |      |
|--|------|
| <b>Tabla 4.22.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para <i>T. angustifolia</i> . 2Q <sub>1</sub> . | 273. |
| <b>Tabla 4.23.</b> Remoción promedio de contaminantes de cada laguna experimental.   | 274. |
| <b>Tabla 4.24.</b> Tasa de crecimiento de las macrófitas, en g/m <sup>2</sup> -día.  | 281. |
| <b>Tabla 4.25.</b> Tasa de crecimiento de <i>T. angustifolia</i> , en g/m <sup>2</sup> -día, en el estado estable.   | 284. |
| <b>Tabla 4.26.</b> Tasa de crecimiento de <i>T. angustifolia</i> , en cm/d, para 1,5Q <sub>1</sub> .   | 285. |
| <b>Tabla 4.27A.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>E. crassipes</i> al inicio y al final del ensayo.  | 290. |
| <b>Tabla 4.27B.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>E. crassipes</i> al inicio y al final del ensayo.  | 291. |
| <b>Tabla 4.28A.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>P. stratiotes</i> al inicio y al final del ensayo.   | 292. |
| <b>Tabla 4.28B.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>P. stratiotes</i> al inicio y al final del ensayo.   | 293. |
| <b>Tabla 4.29A.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>S. auriculata</i> al inicio y al final del ensayo.   | 294. |
| <b>Tabla 4.29B.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>S. auriculata</i> al inicio y al final del ensayo.   | 294. |
| <b>Tabla 4.30A.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>T. angustifolia</i> al inicio y al final del ensayo.   | 296. |
| <b>Tabla 4.30B.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>T. angustifolia</i> al inicio y al final del ensayo.   | 296. |
| <b>Tabla 4.31.</b> Comparación de promedios en las variables porcentaje de remoción.   | 297. |
| <b>Tabla 4.32.</b> Comparación de promedios en las variables coeficiente de eliminación.   | 297. |
| <b>Tabla 4.33.</b> Puntaje global de las 4 especies acuáticas evaluadas a 3 regímenes de caudal y afluentes sin diluir.  | 304. |
| <b>Tabla 5.1.</b> Condiciones Climáticas bajo las que se desarrolló el Ensayo.   | 320. |
| <b>Tabla 5.2.</b> Valores promedio de Caudal, pH y Temperatura.  | 322. |
| <b>Tabla 5.3.</b> Valores promedio del tiempo de detención hidráulica.   | 324. |
| <b>Tabla 5.4.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de los Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales.   | 326. |
| <b>Tabla 5.5.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de la DQO total y DQO filtrada.   | 328. |
| <b>Tabla 5.6.</b> Coeficientes de eliminación de DQO en afluentes diluidos (d) y sin diluir (sd).  | 330. |
| <b>Tabla 5.7.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción DBO <sub>5</sub> , y valores promedio de Carga Hidráulica y Carga Orgánica aplicadas.                           | 333. |
| <b>Tabla 5.8.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Nitrógeno Kjeldahl, Total y filtrado.  | 336. |
| <b>Tabla 5.9.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Nítrico.   | 338. |
| <b>Tabla 5.10.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Nitrógeno Orgánico y Nitrógeno Total.   | 340. |
| <b>Tabla 5.11.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Fosfatos totales y filtrados.   | 341. |

|   |      |
|---|------|
| <b>Tabla 5.12.</b> Valores promedio y porcentajes de remoción de Potasio y Sulfatos.  | 343. |
| <b>Tabla 5.13.</b> Valores promedio de Coliformes totales y fecales.  | 345. |
| <b>Tabla 5.14.</b> Valores promedio de Remoción de Coliformes totales y fecales.  | 346. |
| <b>Tabla 5.15.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para la línea 1. (Mezcla plantas flotantes).   | 348. |
| <b>Tabla 5.16.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para la línea 2. (4 especies en serie).  | 349. |
| <b>Tabla 5.17.</b> Promedio, Desviación estándar, valores mínimos y máximos de las variables evaluadas en cada concentración para la línea 3. ( <i>E. crassipes</i> ).  | 350. |
| <b>Tabla 5.18.</b> Comparación de promedios en las variables porcentaje de remoción.  | 351. |
| <b>Tabla 5.19.</b> Comparación de promedios en las variables coeficiente de eliminación.  | 351. |
| <b>Tabla 5.20.</b> Remoción promedio de contaminantes de cada laguna experimental.  | 352. |
| <b>Tabla 5.21.</b> Puntaje global de las 3 líneas experimentales en el postratamiento de las aguas mieles del café.   | 353. |
| <b>Tabla 5.22.</b> Coeficientes cinéticos medios de eliminación de la DQO y DBO <sub>5</sub> utilizando <i>E. crassipes</i> . (Incluyendo los datos de los 3 ensayos).  | 358. |
| <b>Tabla 5.23.</b> Tasa de crecimiento de las macrófitas, en g/m <sup>2</sup> -día.   | 359. |
| <b>Tabla 5.24.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>E. crassipes</i> en la línea 3 al inicio y al final del ensayo.  | 366. |
| <b>Tabla 5.25.</b> Valores promedio del contenido de minerales de las 4 especies en la línea 2 al inicio y al final del ensayo.   | 368. |
| <b>Tabla 5.26A.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>E. crassipes</i> y <i>P. stratiotes</i> en la línea 1 al inicio y al final del ensayo.  | 370. |
| <b>Tabla 5.26B.</b> Valores promedio del contenido de minerales de <i>E. crassipes</i> y <i>P. stratiotes</i> en la línea 1 al inicio y al final del ensayo.  | 371. |
| <b>Tabla 6.1.</b> Valores medios de precipitación durante la cosecha principal en la zona de estudio.   | 383. |
| <b>Tabla 6.2.</b> Variables relacionadas con el funcionamiento del sistema integral de tratamiento de las aguas mieles en la finca San Bernardo.  | 383. |
| <b>Tabla 6.3.</b> Caracterización de afluentes y efluentes de los diferentes componentes del sistema integral de tratamiento de aguas mieles instalado en la finca San Bernardo.  | 384. |
| <b>Tabla 6.4.</b> Tiempo de detención hidráulica, carga hidráulica, carga orgánica y porcentajes de remoción de la DQO, DBO <sub>5</sub> , ST y SST en el sistema acuático de tratamiento.  | 386. |
| <b>Tabla 6.5.</b> Valores del Promedio, Desviación Estándar, Valor Mínimo y Valor Máximo de las variables utilizadas para la caracterización de los efluentes del sistema acuático de tratamiento, durante el estado estable.                               | 387. |
| <b>Tabla 6.6.</b> Valores del Promedio, Desviación Estándar, Valor Mínimo y Valor Máximo del TRH, Carga Hidráulica, Carga orgánica y de los porcentajes de remoción de la materia orgánica en el sistema acuático de tratamiento durante el estado estable. | 387. |

|  |      |
|--|------|
| <b>Tabla 6.7.</b> Porcentajes de remoción de la DQO, DBO <sub>5</sub> , ST y SST en el SMTA, sistema acuático de tratamiento y sistema integral de tratamiento instalado en la finca San Bernardo.   | 389. |
| <b>Tabla 6.8.</b> Promedio, Desviación Estándar, Valor Mínimo y Máximo de las variables utilizadas para la evaluar la remoción de la contaminación orgánica, en cada uno de los componentes del sistema integral de tratamiento durante el estado estable. | 390. |
| <b>Tabla 7.1.</b> Características del sustrato utilizado para el cultivo de <i>Pleurotus</i> spp. (Tratamientos 1 a 4).  | 412. |
| <b>Tabla 7.2.</b> Condiciones de adecuación de los sustratos para el cultivo de <i>Pleurotus</i> spp. (Tratamientos 1 a 4).  | 412. |
| <b>Tabla 7.3.</b> Características del sustrato utilizado para el cultivo de <i>Pleurotus</i> spp. (Tratamientos 5 y 6).  | 413. |
| <b>Tabla 7.4.</b> Condiciones de adecuación de los sustratos para el cultivo de <i>Pleurotus</i> spp. (Tratamientos 5 y 6).  | 414. |
| <b>Tabla 7.5.</b> Características del sustrato utilizado para el cultivo de <i>Pleurotus</i> spp. (Testigos).  | 414. |
| <b>Tabla 7.6.</b> Condiciones de adecuación de los sustratos para el cultivo de <i>Pleurotus</i> spp. (Tratamientos Testigo).  | 415. |
| <b>Tabla 7.7.</b> Condiciones de Incubación de los tratamientos con <i>Pleurotus</i> spp.  | 416. |
| <b>Tabla 7.8.</b> Condiciones de Fructificación de los tratamientos con <i>Pleurotus</i> spp.  | 418. |
| <b>Tabla 7.9.</b> Valor de la precocidad y duración de la cosecha en los tratamientos con <i>Pleurotus</i> spp.  | 419. |
| <b>Tabla 7.10.</b> Promedio, Desviación Estándar, Valores Mínimos y Máximos e Intervalos de Confianza para la variable Rendimiento.  | 420. |
| <b>Tabla 7.11.</b> Comparación de promedios en la variable rendimiento.  | 421. |
| <b>Tabla 7.12.</b> Promedio, Desviación Estándar, Valores Mínimos y Máximos para la variable Rendimiento en los testigos.  | 422. |
| <b>Tabla 7.13.</b> Características del sustrato utilizado para el cultivo de <i>L. edodes</i> .  | 423. |
| <b>Tabla 7.14.</b> Condiciones de Incubación de los tratamientos con <i>L. edodes</i> .  | 425. |
| <b>Tabla 7.15.</b> Condiciones climáticas del proceso de producción de abono orgánico.   | 426. |
| <b>Tabla 7.16.</b> Lombricompuestos obtenidos de biomasa de <i>E. crassipes</i> antes de ser utilizada en los sistemas acuáticos de tratamiento.   | 427. |
| <b>Tabla 7.17.</b> Contenido de minerales en tejidos frescos de <i>E. crassipes</i> , en su lombricompuesto y en un lombricompuesto de pulpa de café.  | 427. |
| <b>Tabla 7.18.</b> Lombricompuestos obtenidos de biomasa seca de diferentes plantas acuáticas y sus mezclas.   | 428. |
| <b>Tabla 7.19.</b> Contenido de minerales en lombricompuestos obtenidos de biomasa seca de diferentes plantas acuáticas.   | 429. |
| <b>Tabla 7.20.</b> Contenido de minerales en lombricompuestos obtenidos de biomasa seca de mezclas de diferentes plantas acuáticas.  | 430. |
| <b>Tabla 7.21.</b> Lombricompuestos obtenidos de biomasa fresca de diferentes plantas acuáticas y sus mezclas.   | 431. |
| <b>Tabla 7.22.</b> Contenido de minerales en lombricompuestos obtenidos de biomasa fresca de diferentes plantas acuáticas.   | 433. |

|  |      |
|--|------|
| <b>Tabla 7.23.</b> Contenido de minerales en lombricompuestos obtenidos de biomasa fresca de mezclas de diferentes plantas acuáticas.  | 434. |
| <b>Tabla 7.24.</b> Comparación entre los contenidos N, P, K de los lombricompuestos obtenidos de biomasa fresca y seca de las plantas utilizadas en los sistemas acuáticos de tratamiento y su valor fertilizante. | 435. |
| <b>Tabla 12.1.</b> Valores promedio de Caudal, pH, Temperatura, Alcalinidad, Relación de Alcalinidad y Sólidos Totales (Ensayo 1).   | 485. |
| <b>Tabla 12.2.</b> Valores promedio de SST, DQO total y filtrada, DBO <sub>5</sub> , Carga Hidráulica y Carga Orgánica (Ensayo 1).   | 486. |
| <b>Tabla 12.3.</b> Valores promedio de Remoción de DQO, DBO <sub>5</sub> , DQO filtrada y Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales (Ensayo 1).  | 487. |
| <b>Tabla 12.4.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para Control Flotantes. Ensayo 1.   | 487. |
| <b>Tabla 12.5.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para <i>T. angustifolia</i> . Ensayo 1.   | 488. |
| <b>Tabla 12.6.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para Control Emergente. Ensayo 1.   | 488. |
| <b>Tabla 12.7.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para <i>S. auriculata</i> . Ensayo 1.   | 488. |
| <b>Tabla 12.8.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para <i>P. stratiotes</i> . Ensayo 1.   | 489. |
| <b>Tabla 12.9.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para <i>E. crassipes</i> . Ensayo 1.  | 489. |
| <b>Tabla 12.10.</b> Tasa de crecimiento de las macrófitas flotantes, en g/m <sup>2</sup> -día (Ensayo 1).  | 489. |
| <b>Tabla 12.11.</b> Tasa de crecimiento de <i>T. angustifolia</i> , en g/m <sup>2</sup> -día (Ensayo 1).   | 490. |
| <b>Tabla 12.12.</b> Ecuaciones de regresión de los afluentes a las lagunas experimentales.   | 490. |
| <b>Tabla 12.13.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para <i>E. crassipes</i> . Ensayo 2.   | 491. |
| <b>Tabla 12.14.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para <i>P. stratiotes</i> . Ensayo 2.  | 492. |
| <b>Tabla 12.15.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para <i>S. auriculata</i> . Ensayo 2.  | 493. |
| <b>Tabla 12.16.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para <i>T. angustifolia</i> . Ensayo 2.  | 494. |
| <b>Tabla 12.17.</b> Ecuaciones de regresión para <i>E. crassipes</i> .   | 495. |
| <b>Tabla 12.18.</b> Ecuaciones de regresión para <i>P. stratiotes</i> .  | 496. |
| <b>Tabla 12.19.</b> Ecuaciones de regresión para <i>S. auriculata</i> .  | 497. |
| <b>Tabla 12.20.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para la línea 1. (Mezcla plantas flotantes). Ensayo 3.   | 498. |
| <b>Tabla 12.21.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para la línea 2. (4 especies en serie). Ensayo 3.  | 498. |
| <b>Tabla 12.22.</b> Componentes del análisis de varianza en las variables respuesta para la línea 3. ( <i>E. crassipes</i> ). Ensayo 3.  | 498. |

|  |      |
|--|------|
| <b>Tabla 12.23.</b> Ecuaciones de regresión para <i>E. crassipes</i> considerando los 3 ensayos.   | 499. |
| <b>Tabla 12.24.</b> Parámetros estadísticos de la ecuación de regresión lineal de la tasa de crecimiento de <i>E. crassipes</i> en función de la carga orgánica (Datos 3 ensayos).             | 500. |
| <b>Tabla 12.25.</b> Parámetros estadísticos de la ecuación de regresión lineal de la tasa de crecimiento de <i>E. crassipes</i> en función de la DQO afluyente (Datos 3 ensayos).              | 500. |
| <b>Tabla 12.26.</b> Parámetros estadísticos de la ecuación de regresión lineal de la tasa de crecimiento de <i>E. crassipes</i> en función de la DBO <sub>5</sub> afluyente (Datos 3 ensayos). | 501. |

## RELACIÓN DE FIGURAS.

|   |      |
|---|------|
| <b>Figura 1.1.</b> Partes del fruto de café.  | 6.   |
| <b>Figura 1.2.</b> Diagrama de flujo del beneficio convencional y del beneficio ecológico del café (Becolsub).                            | 7.   |
| <b>Figura 1.3.</b> Módulo Becolsub.   | 9.   |
| <b>Figura 1.4.</b> Tanque Tina para fermentar el mucílago y lavar el café.  | 10.  |
| <b>Figura 1.5.</b> Subproductos en el proceso del café.   | 12.  |
| <b>Figura 1.6.</b> Despulpadora y pulpa obtenida del beneficio del fruto.   | 13.  |
| <b>Figura 1.7.</b> Lombricultura con pulpa de café.   | 13.  |
| <b>Figura 1.8.</b> <i>Pleurotus pulmonarius</i> sobre pulpa de café.  | 14.  |
| <b>Figura 1.9.</b> Cultivo de hongos medicinales en subproductos del café.  | 15.  |
| <b>Figura 1.10.</b> Pulpa de café ensilada en silos – fosa.   | 16.  |
| <b>Figura 1.11.</b> Precipitación de pectinas del fruto de café.  | 16.  |
| <b>Figura 1.12.</b> Producción de etanol de pulpa y mucílago de café.   | 17.  |
| <b>Figura 1.13.</b> Desmucilagador y mucílago obtenido del beneficio del fruto.   | 17.  |
| <b>Figura 1.14.</b> Reactores Anaerobios Tipo Botella.  | 46.  |
| <b>Figura 1.15.</b> Borra de café semidescompuesta.   | 47.  |
| <b>Figura 1.16.</b> Reactores Anaerobios Tipo Columna.  | 48.  |
| <b>Figura 1.17.</b> Planta Piloto Biodigestión Anaerobia.   | 49.  |
| <b>Figura 1.18.</b> Reactores hidrolíticos.   | 51.  |
| <b>Figura 1.19.</b> Reactores metanogénicos.  | 51.  |
| <b>Figura 1.20.</b> Esquema de un humedal de flujo libre superficial.   | 58.  |
| <b>Figura 1.21.</b> Esquema de un humedal de flujo subsuperficial.  | 59.  |
| <b>Figura 1.22.</b> Postratamiento a escala de laboratorio.   | 76.  |
| <b>Figura 1.23.</b> Inflorescencia de <i>Eichhornia crassipes</i> .   | 85.  |
| <b>Figura 1.24.</b> <i>Pistia stratiotes</i> .  | 87.  |
| <b>Figura 1.25.</b> Inflorescencia de <i>Typha angustifolia</i> .   | 89.  |
| <b>Figura 1.26.</b> <i>Salvinia auriculata</i> .  | 91.  |
| <b>Figura 3.1.</b> Lugar de realización de la investigación.  | 108. |
| <b>Figura 3.2.</b> Reactores metanogénicos del SMTA.  | 109. |
| <b>Figura 3.3.</b> Aguas residuales provenientes del beneficio del café.  | 111. |
| <b>Figura 3.4.</b> Plantas acuáticas evaluadas.   | 112. |
| <b>Figura 3.5.</b> Diagrama de planta de la distribución de los tratamientos del ensayo.  | 114. |
| <b>Figura 3.6.</b> Construcción lagunas de experimentación.   | 116. |
| <b>Figura 3.7.</b> Dimensiones de las lagunas de experimentación.   | 117. |
| <b>Figura 3.8.</b> Protección de las lagunas de las aguas lluvias.  | 117. |
| <b>Figura 3.9.</b> Acondicionamiento de la alimentación a las lagunas de experimentación.   | 119. |
| <b>Figura 3.10.</b> Regulación del caudal de alimentación a las lagunas de experimentación.   | 120. |
| <b>Figura 3.11.</b> Caracterización de la grava.  | 121. |
| <b>Figura 3.12.</b> Esquema del permeámetro de carga constante.   | 122. |
| <b>Figura 3.13.</b> Densidad operacional de las macrófitas flotantes.   | 124. |
| <b>Figura 3.14.</b> Distribución y distancias de siembra de la planta emergente <i>T. angustifolia</i> en las lagunas de experimentación. | 125. |

|  |      |
|--|------|
| <b>Figura 3.15.</b> Siembra de la macrófita emergente.   | 126. |
| <b>Figura 3.16.</b> Lagunas testigo.   | 126. |
| <b>Figura 3.17.</b> Elementos de muestreo y medición <i>In Situ</i> de las aguas residuales.   | 128. |
| <b>Figura 3.18.</b> Caracterización físico-química de las aguas residuales. I.   | 131. |
| <b>Figura 3.19.</b> Caracterización físico-química de las aguas residuales. II.  | 134. |
| <b>Figura 3.20.</b> Caracterización físico-química de las aguas residuales. III.   | 136. |
| <b>Figura 3.21.</b> Determinación de las tasas de evaporación y evapotranspiración.  | 138. |
| <b>Figura 3.22.</b> Cosecha de las plantas flotantes.  | 139. |
| <b>Figura 3.23.</b> Selección y marcaje de los tallos y hojas de la planta emergente.  | 140. |
| <b>Figura 3.24.</b> Biomasa de <i>T. angustifolia</i> .  | 140. |
| <b>Figura 3.25.</b> Adecuación de las plantas para su aprovechamiento.   | 141. |
| <b>Figura 3.26.</b> Diferencias en los porcentajes de remoción de la DBO <sub>5</sub> durante los muestreos realizados en el ensayo.                   | 147. |
| <b>Figura 3.27.</b> Intervalos de confianza para las variables porcentaje de remoción y coeficiente de eliminación de la DBO <sub>5</sub> .            | 190. |
| <b>Figura 3.28.</b> Intervalos de confianza para las variables porcentaje de remoción y coeficiente de eliminación de los sólidos suspendidos totales. | 192. |
| <b>Figura 3.29.</b> Intervalos de confianza para las variables porcentaje de remoción y coeficiente de eliminación del nitrógeno total.                | 195. |
| <b>Figura 3.30.</b> Intervalos de confianza para las variables porcentaje de remoción y coeficiente de eliminación del fósforo total.                  | 197. |
| <b>Figura 3.31.</b> Intervalos de confianza para las variables porcentaje de remoción y coeficiente de eliminación del potasio.                        | 200. |
| <b>Figura 3.32.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción de la DBO <sub>5</sub> en los tratamientos evaluados.                       | 205. |
| <b>Figura 3.33.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción de los SST en los tratamientos evaluados.                                   | 206. |
| <b>Figura 3.34.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción del N <sub>T</sub> en los tratamientos evaluados.                           | 207. |
| <b>Figura 3.35.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción del P <sub>T</sub> en los tratamientos evaluados.                           | 208. |
| <b>Figura 3.36.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción de K en los tratamientos evaluados.   | 209. |
| <b>Figura 3.37.</b> Tasa de crecimiento, en g/m <sup>2</sup> -d, de las especies acuáticas flotantes.  | 211. |
| <b>Figura 3.38.</b> Tasa de crecimiento en cm/d para <i>T. angustifolia</i> .  | 216. |
| <b>Figura 3.39.</b> Efecto de la concentración de DQO en el afluente sobre la tasa de crecimiento de las especies acuáticas ensayadas.                 | 217. |
| <b>Figura 3.40.</b> I. Aspecto de las lagunas al final del ensayo.   | 218. |
| <b>Figura 3.41.</b> II. Aspecto de las lagunas al final del ensayo.  | 219. |
| <b>Figura 4.1.</b> Liqueen presente en los reactores hidrolíticos – acidogénicos.  | 238. |
| <b>Figura 4.2.</b> Diagrama de planta de la distribución de los tratamientos del ensayo.   | 241. |
| <b>Figura 4.3.</b> Diferencias en los porcentajes de remoción de la DBO <sub>5</sub> durante los muestreos realizados en el ensayo.                    | 243. |

|  |      |
|--|------|
| <b>Figura 4.4.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción de la DBO <sub>5</sub> para las diferentes especies evaluadas a los regímenes de caudal de 1,5Q <sub>1</sub> y 2Q <sub>1</sub> .                   | 276. |
| <b>Figura 4.5.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción de los SST para las diferentes especies evaluadas a los regímenes de caudal de 1,5Q <sub>1</sub> y 2Q <sub>1</sub> .                               | 277. |
| <b>Figura 4.6.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción del N <sub>T</sub> para las diferentes especies evaluadas a los regímenes de caudal de 1,5Q <sub>1</sub> y 2Q <sub>1</sub> .                       | 278. |
| <b>Figura 4.7.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción del P <sub>T</sub> para las diferentes especies evaluadas a los regímenes de caudal de 1,5Q <sub>1</sub> y 2Q <sub>1</sub> .                       | 279. |
| <b>Figura 4.8.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción del K para las diferentes especies evaluadas a los regímenes de caudal de 1,5Q <sub>1</sub> y 2Q <sub>1</sub> .                                    | 280. |
| <b>Figura 4.9.</b> Tasa de crecimiento, en g/m <sup>2</sup> -d, de las especies acuáticas flotantes evaluadas durante todo el tiempo de duración del ensayo.   | 282. |
| <b>Figura 4.10.</b> Efecto de la carga orgánica aplicada sobre las tasas de crecimiento de las especies evaluadas.   | 286. |
| <b>Figura 4.11.</b> I. Aspecto de las lagunas al final del ensayo.   | 287. |
| <b>Figura 4.12.</b> II Aspecto de las lagunas al final del ensayo.   | 288. |
| <b>Figura 4.13.</b> III. Aspecto de las lagunas al final del ensayo.   | 289. |
| <b>Figura 4.14.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción de la DBO <sub>5</sub> para las diferentes especies evaluadas a los regímenes de caudal de Q <sub>1</sub> , 1,5Q <sub>1</sub> y 2Q <sub>1</sub> . | 299. |
| <b>Figura 4.15.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción de los SST para las diferentes especies evaluadas a los regímenes de caudal de Q <sub>1</sub> , 1,5Q <sub>1</sub> y 2Q <sub>1</sub> .             | 300. |
| <b>Figura 4.16.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción del N <sub>T</sub> para las diferentes especies evaluadas a los regímenes de caudal de Q <sub>1</sub> , 1,5Q <sub>1</sub> y 2Q <sub>1</sub> .     | 301. |
| <b>Figura 4.17.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción del P <sub>T</sub> para las diferentes especies evaluadas a los regímenes de caudal de Q <sub>1</sub> , 1,5Q <sub>1</sub> y 2Q <sub>1</sub> .     | 302. |
| <b>Figura 4.18.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción del K para las diferentes especies evaluadas a los regímenes de caudal de Q <sub>1</sub> , 1,5Q <sub>1</sub> y 2Q <sub>1</sub> .                  | 303. |
| <b>Figura 5.1.</b> Diagrama de planta de la distribución de los tratamientos del ensayo.   | 318. |
| <b>Figura 5.2.</b> Relación entre la DQO afluente y la razón entre los coeficientes de eliminación de la DQO diluida y sin diluir ( $K_{DQOd}/K_{DQOsd}$ ).  | 332. |
| <b>Figura 5.3.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción, para las variables DBO <sub>5</sub> , SST y N <sub>T</sub> , para la especie flotante <i>E. crassipes</i> considerando los 3 ensayos evaluados.   | 355. |
| <b>Figura 5.4.</b> Relación entre la carga aplicada y la tasa de remoción, para las variables P <sub>T</sub> y K, para la especie flotante <i>E. crassipes</i> considerando los 3 ensayos evaluados.                         | 356. |

---

|   |      |
|---|------|
| <b>Figura 5.5.</b> Efecto de la carga orgánica aplicada sobre las tasas de crecimiento de las especies flotantes.   | 361. |
| <b>Figura 5.6.</b> Efecto de la carga orgánica aplicada, DQO y DBO <sub>5</sub> del afluente sobre las tasas de crecimiento de la especie flotante <i>E. crassipes</i> (Todos los ensayos). | 362. |
| <b>Figura 5.7.</b> Insectos encontrados asociados a las macrófitas.   | 364. |
| <b>Figura 5.8.</b> Aspecto final de las 3 líneas experimentales durante la fase I.  | 365. |
| <b>Figura 6.1.</b> Evaluación del postratamiento a escala de Finca Cafetera.  | 380. |
| <b>Figura 6.2.</b> Esquema del sistema acuático de tratamiento acoplado al SMTA en la finca San Bernardo y localización de los puntos de muestreo.  | 382. |
| <b>Figura 7.1.</b> Metodología para el cultivo de macromicetos.   | 397. |
| <b>Figura 7.2.</b> Producción de semilla de hongos comestibles y medicinales.   | 406. |
| <b>Figura 7.3.</b> Adecuación de los sustratos para el cultivo de los hongos.   | 407. |
| <b>Figura 7.4.</b> Condiciones del cultivo de los hongos.   | 408. |
| <b>Figura 7.5.</b> Lombricompostaje utilizando biomasa de sistemas acuáticos de tratamiento.  | 410. |
| <b>Figura 7.6.</b> Producción de hongos comestibles.  | 424. |
| <b>Figura 7.7.</b> Producción de abono orgánico.  | 436. |

