

Ingeniería y café en Colombia

Engineering and Coffee in Colombia

C. E. Oliveros-Tascón^a, J. R. Sanz-Uribe^b

99
dossier

PALABRAS CLAVES

Beneficio ecológico, café, cosecha, ingeniería, secado, procesamiento.

KEY WORDS

Coffee, drying, ecological process, engineering, harvesting, processing.

RESUMEN

Los aportes de ingeniería son claves para la sostenibilidad económica, ambiental y social de la caficultura, que en Colombia desarrollan cerca de 600.000 familias. La ingeniería ha contribuido con tecnologías que han permitido hacer más eficientes y sostenibles las labores agrícolas y el procesamiento del café a través de trabajos de investigación rigurosos. Se han generado tecnologías para recolección del café, para el beneficio ecológico del café por vía húmeda con reducción en el consumo de agua y control de la contaminación de más del 90%; así mismo, se han entregado tecnologías apropiadas para el secado solar y mecánico de café.

ABSTRACT

Engineering contributions are crucial for the economic, environmental and social sustainability of coffee growing in Colombia, undertaken by approximately 600.000 families. Through rigorous research, engineering has allowed the development of technologies that render agricultural labors and processes more efficient and sustainable. Technologies have been developed for manual harvesting, wet processing of coffee with a reduction of over 98% of water consumption and over 90% of water contamination, and appropriate efficient solar and mechanical coffee dryers.

a Ph.D. en Ingeniería Agrícola. Investigador Principal, Centro Nacional de Investigaciones de café (CENICAFÉ), Chinchiná. Caldas, Colombia. ✉ Carlos.Oliveros@cafedecolombia.com

b Ph.D. en Ingeniería Mecánica. Investigador Científico II, Centro Nacional de Investigaciones de café (CENICAFÉ). Chinchiná, Caldas, Colombia. ✉ JuanR.Sanz@cafedecolombia.com

INTRODUCCIÓN

En las vertientes de las tres cordilleras que recorren el país, en un área de cerca de 890.000 hectáreas localizadas entre 1.200 y 1.800 m sobre el nivel del mar, se produce el café de alta calidad que exporta Colombia. Es el resultado del trabajo laborioso de casi 600.000 familias, de los suelos y climas, de las variedades que se cultivan, de la recolección cuidadosa de los frutos, solamente maduros, y del proceso de poscosecha realizado.

En la historia de la agricultura la ingeniería ha jugado un importante papel, al desarrollar tecnologías que han permitido incrementar la producción, con aprovechamiento eficiente de la mano de obra y los insumos, la reducción de costos y el manejo sostenible de los recursos suelo y agua, especialmente en los últimos años. En la caficultura en países como Brasil, las contribuciones de ingeniería en todas las etapas de la cadena han permitido la expansión de esta actividad, con menores costos de producción que en otros países. En Colombia los aportes a la producción de café, derivados de investigaciones en ingeniería, se concentran en las etapas de cosecha, beneficio y secado.

A finales de la década de los 60s fue creada la sección de Beneficio de Café de Cenicafé, la cual tenía como finalidad desarrollar tecnologías para hacer más eficiente el proceso utilizado para transformar los frutos en café pergamino seco, estado en el que se comercializa internamente este producto en Colombia. Posteriormente, a mediados de la década de los 80s la mencionada Sección cambió su nombre a Disciplina de Ingeniería Agrícola y su finalidad se centró en generar tecnologías apropiadas, competitivas y sostenibles para la cosecha y poscosecha de café, lo mismo que para la realización de labores agrícolas en este cultivo.

El empleo de equipos en el cultivo del café en Colombia es muy limitado, principalmente por la topografía de las zonas cafeteras, las condiciones climáticas, los suelos y el tamaño de las fincas, 95% de ellas con menos de 5 hectáreas sembradas en Café. En cosecha, además de los factores anteriores, la desuniformidad

de la maduración del café y los estándares exigidos limita el empleo de algunos equipos portátiles que, en el caso del Brasil, han permitido incrementar la eficiencia de la mano de obra en más del 100% y reducir los costos unitarios en más del 30%.

Cenicafé ha generado tecnologías exitosas, derivadas de aplicaciones de distintas ramas de la ingeniería, que han contribuido a la solución de desafíos encontrados en la producción, cosecha y poscosecha de café. Con ellas se ha buscado mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos, disminuir el impacto ambiental y mejorar las condiciones económicas y sociales de los productores.

LABORES AGRÍCOLAS

En la producción de café en Colombia se emplea mano de obra en todas las etapas, desde la elaboración de germinadores hasta la recolección. En algunas actividades —como recoger los frutos del suelo, para facilitar el manejo de la principal plaga del café (*Hypothenemus hampei*)— el rendimiento de la mano de obra es bajo y su costo elevado, por tal motivo se requiere utilizar herramientas o equipos. En la disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé se evaluó una aspiradora portátil de espalda diseñada en Italia para recoger otros frutos del suelo (castañas y olivas), en cafetales tecnificados con pendiente del terreno de hasta 100%, con la cual se obtuvieron resultados que indican que es viable técnica y económicamente para las condiciones de gran parte de la caficultura colombiana. A partir de estos resultados, una empresa colombiana inició la fabricación de esta tecnología con especificaciones más acordes a las plantaciones de café en Colombia y a menor costo que el equipo italiano.

COSECHA DE CAFÉ

La cosecha de café en Colombia es realizada por personas que cuidadosamente recolectan uno a uno los

frutos maduros en los árboles y los almacenan temporalmente en recipientes que cuelgan en la cintura. Cuando éste se llena, se vacía a costales que son transportados por el propio operario hasta lugares de acopio o hasta el beneficiadero de café, una vez terminan la jornada. El rendimiento de un recolector de café depende de factores inherentes a él, como la técnica que utilice y su motivación, y de factores atribuibles a la plantación, como la oferta y la distribución de los frutos maduros por recolectar, y la altura de los árboles, entre otros. En Colombia, se paga al destajo por cantidad de café recolectado a un precio previamente propuesto. La recolección de café es la actividad con mayor participación en los costos de producción en Colombia, pues participan con 35 a 40% de los costos de producción.

El único cambio significativo que ha tenido esta labor en 200 años es el paso de usar recipientes contruidos con fibras naturales, llamados canastos, a recipientes plásticos de igual forma, llamados cocos.

El uso de algunas tecnologías empleadas en Brasil para cosechar café en terrenos de mayor pendiente y en plantaciones de alta densidad, y el desarrollo de nuevas tecnologías de diseño propio se han dificultado, debido a que en la mayor parte de las zonas productoras la cosecha se realiza entre 12 y 18 pases al año, algunos con mayor carga de frutos maduros pero con concentración de estos frutos inferior al 50%. En

las áreas donde la cosecha es más concentrada, principalmente en la Sierra Nevada de Santa Marta, las elevadas pendientes, la fragilidad de los suelos y las altas densidades impiden el uso de tecnologías empleadas en otros países.

Las investigaciones en cosecha de café empezaron oficialmente en Cenicafe en el año de 1997 con la finalidad principal de reducir los costos de esta labor [1, 2, 3, 4]. Para tal fin, se propuso el plan general de investigación en cosecha de café que aparece en la Figura 1, el cual está dividido en cinco frentes de trabajo que aún se conservan. El primer frente de trabajo consiste en la determinación de las propiedades físicas y mecánicas más relevantes en cosecha de café de las estructuras que conforman el árbol de café, incluyendo los frutos. El segundo frente de trabajo se refiere al uso de metodologías, implementos o herramientas sencillas para hacer más eficiente la recolección de café. La cosecha semi-mecanizada está enmarcada en el uso de herramientas motorizadas y portátiles para hacer la labor de desprendimiento selectivo de frutos, mientras que la cosecha mecanizada se refiere al uso de máquinas de gran envergadura, autopropulsadas o con fuente remota de potencia, para el desprendimiento masivo de frutos. La cosecha robotizada, en cambio, se refiere al uso de tecnologías avanzadas de automatización para la cosecha selectiva de café.



Figura 1. Plan general de investigación en cosecha de café

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

En esta área se determinaron propiedades físicas o mecánicas de las diferentes estructuras del árbol de café, que se puedan tomar como base para el desarrollo exitoso de tecnologías que realicen más ágilmente el desprendimiento de los frutos maduros.

Se encontró que el esfuerzo que menor cantidad de energía necesita para desprender frutos de café es el de torsión, seguido del de flexión, y que a tensión se necesita un 30% más de fuerza para desprender frutos verdes que para maduros. También se corroboró la percepción de los cosecheros con relación a que se necesita más fuerza para desprender manualmente frutos en árboles de variedades resistentes a la roya del café que en los árboles susceptibles a la enfermedad [5, 6].

De los estudios se pudo concluir que es difícil utilizar cualquier grado de mecanización y que esta dificultad se debe principalmente a factores tales como una relación fuerza de desprendimiento sobre peso de los frutos muy alta, pedúnculo con muy buenas características estructurales, frutos muy apretados en los glomérulos, árboles con corteza muy débil, tronco de los árboles y sus ramas muy flexibles. Adicionalmente, la cosecha selectiva del café, como se requiere en Colombia, también está limitada por la desuniformidad de la maduración del café durante prácticamente todo el año.

Se encontró también que el promedio de la primera frecuencia natural de la estructura fruto-pedúnculo es más alto para los frutos verdes que para los maduros, pero las distribuciones normales de esta variable presentan un traslape que hacen difícil la selectividad por vibración [1, 2]. Se descubrió también que cuando se usa vibración los frutos se caen por fatiga.

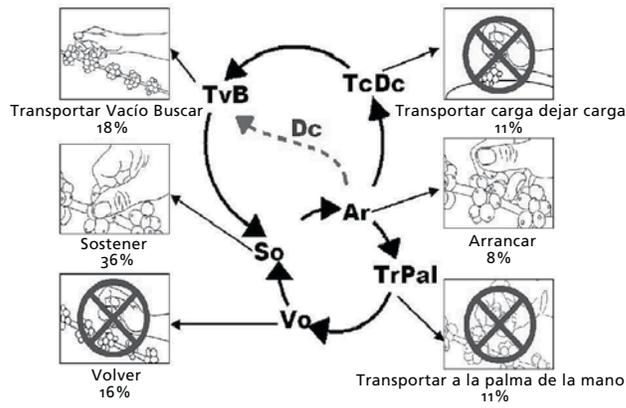
COSECHA MANUAL Y MANUAL ASISTIDA

El primer acercamiento de ingeniería para resolver el problema de cosecha de café consistió en un estudio de tiempos y movimientos de la labor, tal y como era hecha por los cosecheros [4, 7, 8]. De ese estudio se

concluyó que los macro-movimientos eran en su mayoría desordenados y que había muchos movimientos ociosos o susceptibles de ser simplificados. Como resultado de este estudio, se estableció el método mejorado de recolección que plantea un movimiento ordenado en las plantaciones y en los árboles, lo mismo que evitar movimientos ociosos y simplificar aquellos que se puedan (Figura 2a). Adicionalmente, se desarrolló una lengüeta plástica que sirve para aumentar el área de recepción de los frutos desprendidos en el coco. Con el uso del método mejorado y la lengüeta, se obtuvo un aumento en la capacidad de recolección de hasta un 36% por operario y una disminución de pérdidas de frutos al suelo [4].

Basados en el conocimiento generado en el estudio de tiempos y movimientos, llegaron desarrollos de implementos y herramientas manuales para el desprendimiento y la recepción más ágil de frutos. El primer desarrollo de este tipo se llamó Aroandes y consistía en un aro unido al antebrazo para la recepción de los frutos desprendidos, una manga para conducirlos y un morral en la espalda para almacenarlos temporalmente (Figura 2b) [9]. Cuando el peso empezaba a incomodar, el operario levantaba los brazos para que los frutos cayeran al morral. Con este sistema se buscaba que los recolectores realizaran solamente los movimientos estrictamente necesarios para la cosecha de café y se evitaran los movimientos ociosos. Con este sistema se logró aumentar la capacidad de recolección de los cosecheros hasta en un 40%, con la ventaja adicional de que se obtienen pérdidas al suelo menores de un fruto por árbol; las cuales, en el sistema tradicional, son en promedio 10 frutos por árbol.

Sin embargo, aún cumpliendo con las normas para diseño ergonómico de ingeniería, la mayoría de los cosecheros entrevistados mostraron rechazos hacia el dispositivo Aroandes, los cuales fueron superados en el sistema Canguaro [10]. Éste recogía la mayoría de las recomendaciones planteadas por los mismos usuarios, de las cuales la más relevante consistió en un recipiente flexible en la parte frontal de manera similar a como se ubica el coco para recolectar (Figura 2c).



(a) Método Mejorado de recolección de café



(b) Aroandes (2003)



(c) Canguaro (2007)



(d) Canguaro 2M (2010)

Figura 2. Evolución tecnológica de los dispositivos con aros y mangas

Con el Canguaro, se siguieron obteniendo pérdidas menores de un fruto por árbol.

La capacidad de recolección con el Canguaro aumentó en promedio solamente el 10%, no perceptible por los usuarios, atribuible al aro sostenido en el antebrazo de los operarios. Por tal razón, se procedió a utilizar dos mangas con el fin de inducir el uso de las dos manos por igual y aumentar de este modo la capacidad de recolección. Fue así como se llegó al sistema Canguaro-2M (Figura 2d) con el cual se han logrado mayores capacidades de recolección con las ventajas de disminución de pérdidas presentadas por sus antecesores.

En la búsqueda de maneras más eficientes para el desprendimiento de frutos de café se llegó a la herramienta Rasselca [11], la cual consiste en un tubo de PVC de 50 mm de diámetro cortado longitudinalmente, con bisagras en uno de sus lados y pasadores ajustables para los dedos con el fin de permitir la apertura y cierre rápidos de la misma. La herramienta tiene en uno de sus extremos dientes de nylon que se usan para desprender los frutos a medida que el operario la desplaza en la rama (Figura 3). La herramienta se usa con éxito en lugares donde la cosecha es concentrada y con cosecheros de baja capacidad pagados al día. En esas condiciones, se logró una disminución del 11% en el costo unitario de cosecha, expresado en \$/kg.

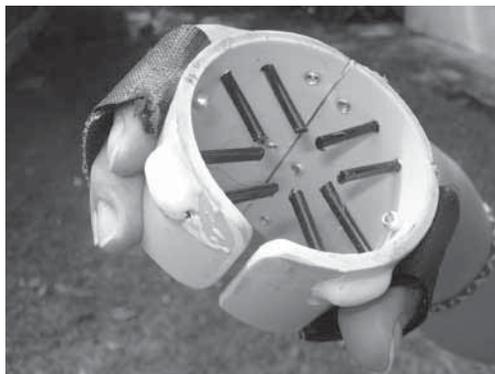


Figura 3. Dispositivo Raselca para asistir la cosecha manual de café

COSECHA SEMI-MECANIZADA

Las aproximaciones de ingeniería para realizar la cosecha de café con herramientas portátiles y motorizadas se dividen en dos: desarrollos propios y adaptación de tecnologías existentes. A su vez, la adaptación de tecnologías existentes se divide en tecnologías para cosecha de café y para otros productos.

En desarrollos propios, se destacan las máquinas motorizadas que empezaron en un inicio tomando como fuente de potencia pequeñas plantas eléctricas semiestacionarias; posteriormente, se usaron motores de combustión interna portátiles, se pasó a baterías y motores eléctricos de corriente directa (en un principio de alto costo y luego de menor precio) que al final hicieron viable económicamente esta tecnología [12, 13, 14]. El equipo eléctrico más avanzado de esta serie es el Alfa, el

cual consiste en un par de baterías recargables llevadas en un cinturón, las cuales son fuente de energía de un motor eléctrico de corriente directa de 15 W con un golpeador acoplado directamente a su eje (Figura 4). Con esta herramienta se han logrado aumentos en la capacidad de recolección de hasta un 100%, con la ayuda de mallas plásticas en el suelo para recibir los frutos desprendidos. La masa de café cosechada cumple con el requisito máximo de frutos verdes.

De las tecnologías para semi-mecanización de la cosecha de café y frutos similares se destacan las *derriçadoras* desarrolladas en Brasil y los vibradores portátiles desarrollados para la cosecha de olivas y otros productos similares en Europa.

Las *derriçadoras* son equipos mecánicos para aplicar vibro-impactos a las ramas y los frutos a través



Figura 4. Sistema portátil y motorizado Alfa para la cosecha semi-mecanizada de café



Figura 5. Vibrador portátil de tallos usado en la cosecha de café

de un par de juegos de dedos plásticos que oscilan desfasados 180°. Con el uso de *derriçadoras* para las condiciones colombianas no se lograron resultados satisfactorios. Solamente en casos donde la cosecha se presenta con alta carga y concentración de frutos maduros se logró un aumento de más del 100% en la capacidad por operario y una reducción importante del costo unitario de recolección (41%); sin embargo, la masa de café tenía un contenido de frutos verdes de más del 10% que hacen que esta herramienta no sea recomendable para las condiciones colombianas actuales [15].

Los vibradores portátiles de tallos (VPTs), en cambio, han mostrado mejores desempeños. Los VPTs son sistemas que se utilizan para aplicar vibración a los árboles a través de un punto de contacto en el tallo del árbol (Figura 5). Con ellos se han logrado aumentos de más de 300% en la capacidad de recolección por operario y reducciones de cerca del 10% en el costo unitario de recolección de café. Sin embargo, el café recolectado presenta un alto contenido de frutos verdes y se deja un alto número de frutos maduros dejados en los árboles, que hacen que esta tecnología no esté aún lista para ser entregada a los caficultores [16, 17, 18, 19]. En estos momentos se trabaja en la reducción del número de frutos maduros sin cosechar, en la reducción del contenido de frutos verdes en la masa cosechada y en el aumento del rendimiento a través de diferentes estrategias.

COSECHA MECANIZADA

Varias máquinas se han construido con el fin de tratar de afrontar el problema de los altos costos de cosecha a través de la mecanización. La primera máquina que fue construida con este propósito se llamó Covauto. Esta máquina fue diseñada con base en los desarrollos de máquinas del Brasil y con instrumentación avanzada para la toma de datos. La máquina presentó muchos inconvenientes como la combinación de alto peso y llantas de baja flotación que hacían que se atasara en el suelo húmedo, inclusive en terrenos planos o ligeramente inclinados. En las pocas pruebas que se

pudieron realizar se observó un contenido de frutos verdes muy lejano de la cosecha selectiva que se espera del café colombiano.

Otra aproximación que se hizo consistió en un vehículo con características especiales que se moviera en las plantaciones de café con fines de cosecha mecanizada, llamado Ergatis. El sistema mencionado fue diseñado con el fin de que la plantación se acomode a la máquina y no que la máquina se acomode a la diversidad de patrones que los campesinos usan para sembrar el café. El sistema consiste en dos máquinas interactuando, una moviéndose transversalmente en la parte alta de la plantación (haladora), de manera intermitente, y otra desplazándose hacia arriba y hacia abajo (cosechadora) por medio de un cable desde la



Figura 6. Cosechador mecánico de café Covauto

haladora, mientras cosecha los árboles en filas dispuestas paralelamente a la pendiente. La cosechadora tiene un pórtico que se mantiene aproximadamente vertical por medio de un sistema de control, con el fin de realizar la agitación paralelamente a los árboles de café y hacerla estable en terrenos de alta pendiente al mantener el centro de gravedad en un lugar siempre seguro. Las ruedas de la cosechadora son de alta flotabilidad, las cuales sumadas a un peso de 2.300 kg, hacen que la compactación del suelo sea menor a la causada por una persona. El hecho de ser halada por cable hace que no haya el desprendimiento de sue-

lo por el movimiento relativo causado por las ruedas con tracción (erosión).

Con base en las experiencias anteriores, se pasó a diseñar un sistema más liviano y maniobrable en las plantaciones de café en Colombia. El sistema recibe el nombre de Covautico y está hecho en una estructura de tubería con un peso total de 250 kg (Figura 6). Como sistema de agitación tiene unos cepillos similares a los usados en las máquinas usadas en el Brasil, con la diferencia que tiene menor número de dedos y que los dedos son de tubería PVC de 16 mm de diámetro nominal (menor inercia) con el fin de buscar selectividad a través de un tratamiento menos agresivo a los árboles. El sistema puede ser halado por un malacate (cable), por un tractor pequeño, por un motocultor o puede tener tracción animal (mular).

COSECHA ROBOTIZADA

Cualquier proyecto que se haga en cosecha robotizada de café es un trabajo a largo plazo por las dificultades mencionadas. No obstante, en la Disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé se han realizado trabajos que pueden ser de utilidad en el desarrollo de máquinas con alto grado de automatización. Los trabajos consistieron en la ubicación espacial de frutos maduros de café en las ramas, a nivel de laboratorio. En ellos se desarrollaron algoritmos de visión artificial, principalmente basados en segmentación, que ubicaban con exactitud aceptable las coordenadas de los centroides de los frutos maduros en el espacio.

TRANSPORTE DE LOS FRUTOS DE CAFÉ AL BENEFICIADERO

Una vez los operarios terminan la jornada de trabajo llevan los costales con los frutos recolectados hasta el beneficiadero. Algunas fincas tienen puntos de acopio cerca de las plantaciones y allí recogen en vehículos el café para transportarlo hasta el beneficiadero. Sin embargo, en la mayoría de las fincas colombianas el transporte del café lo deben realizar los mismos cosecheros al hombro.

Conscientes de que el transporte de café al hombro es una labor dura, especialmente en terreno empinado como el de las zonas cafeteras colombianas, en Cenicafé se generó la información necesaria para el diseño de sistemas de transporte por cable aéreo, lo mismo que un sistema de transporte que consiste de un vehículo halado por cable. El sistema de cable aéreo puede ser por gravedad, en caso de que el beneficiadero se encuentre en un lugar más bajo que los lotes, o motorizado, en el caso contrario. Para sistema de transporte por cable aéreo de gravedad se construyó un banco de pruebas donde se ensayaron las posibles pendientes y deflexiones del cable, para transportar bultos de café de 60 kg. En la investigación se determinó que pendientes entre 10 y 12,5%, con deflexiones del cable entre 4 y 5% no necesitan sistema de frenado cuando se usan poleas con bujes en lugar de rozamientos [20]. Este sistema se considera amigable con el ambiente porque impacta poco el paisaje y el suelo, evita la construcción de carreteras y no requiere energía eléctrica.

En cuanto al transportador por cable aéreo motorizado se determinaron las especificaciones que debe cumplir un sistema de éstos para mover una vagoneta con capacidad de 300 kg de café en cereza, a través



Figura 7. Sistema de malacate y vehículo Transcafé

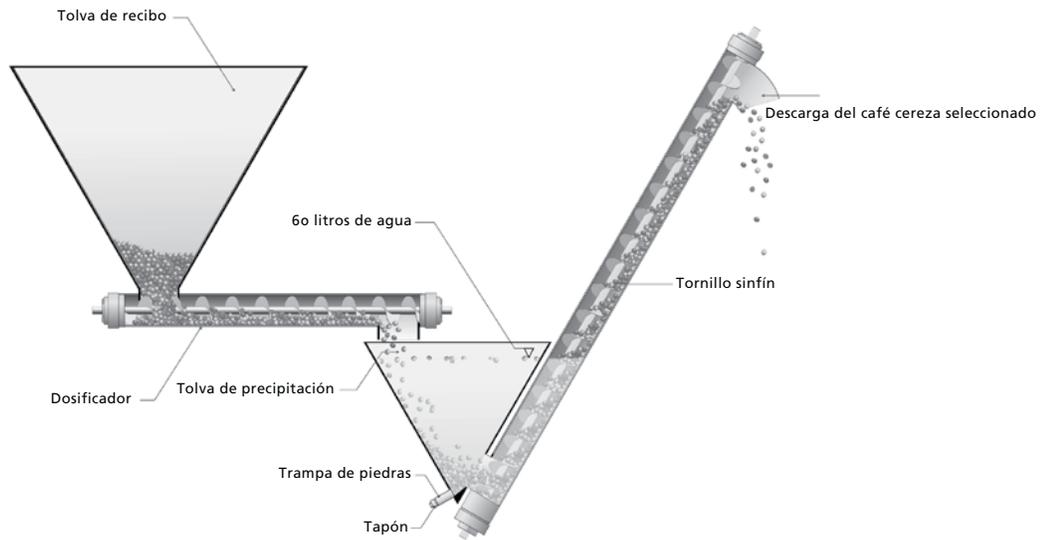


Figura 8. Separador hidráulico de tolva y tornillo sinfín
© FNC Cenicafé 2011. Dibujo Gonzalo Hoyos

de la construcción de un modelo. El sistema diseñado consiste en un cable de mayor diámetro (16 mm) que sirve de vía y un cable más delgado (6,35 mm) para halar la vagoneta. Se determinó que, con una pendiente de 40%, se requiere un motor de 4,9 kW para halar la vagoneta con su carga máxima. De la investigación se concluyó que los tramos con curvas son muy complicados y se deben evitar [24]. También se concluyó que aunque tiene las mismas ventajas paisajistas del sistema por gravedad, necesita una inversión inicial mucho más alta y requiere energía eléctrica.

También se desarrolló un sistema de malacate para halar un vehículo que podía transportar hasta 500 kg de café en cereza dentro de las plantaciones. El sistema, denominado Transcafé, fue probado con éxito en la estación Central Naranjal. Se hicieron evaluaciones del daño al suelo y se determinó que la compactación era aceptable y que el suelo se recuperaba de la deformación causada por el paso del vehículo cargado en menos de dos semanas. La Figura 7 muestra al sistema Transcafé.

BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ

El beneficio del café es el proceso mediante el cual se transforman los frutos en café pergamino seco, el cual es el estado en el que se comercializa el producto a nivel nacional. Para realizarlo se remueven todas las envolturas que cubren los granos como son la pulpa, o epicarpio, y el mucilago, o mesocarpio, y posteriormente se secan los granos desde una humedad de aproximadamente 53% base húmeda hasta un rango entre el 10 y 12%, lo cual permite su conservación en las condiciones naturales [20].

PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Con el ánimo de procesar la mejor materia prima posible se han hecho desarrollos de ingeniería que han tenido éxito. Uno de los que más se destaca es el Separador Hidráulico de Tolva y Tornillo Sinfín (SHTTS) y consiste en una tolva de precipitación y un transportador de tornillo sinfín inclinado y ubicado en la base para extraer del fondo de la tolva el material decantado. La tolva de precipitación se llena con agua limpia, la cual al ser alimentada con una masa heterogénea de frutos de café e impurezas, permite que los objetos menos densos floten, mientras que los

de mayor densidad se precipitan hasta el fondo de la tolva. Los frutos e impurezas que se identifican como de menor densidad son principalmente frutos secos, “vanos”, “brocados”, hojas y palos. Los objetos de mayor densidad más comunes, diferentes a los frutos, son las piedras y las puntillas, entre otros. Para evitar que los objetos duros y pesados sean transportados con los frutos densos, la alimentación del transportador de tornillo sinfín inclinado se realiza 5 cm arriba de la base de la tolva, formando así un apéndice o “trampa de piedras”, donde quedan atrapados estos objetos. Para que la tolva de precipitación y la “trampa de piedras” funcionen adecuadamente, los frutos de café deben alimentarse en forma dosificada sobre la cara posterior de la tolva. La Figura 8 muestra el corte de un SHTTS y la manera como funciona. El dispositivo hidromecánico tiene una eficacia de separación de material liviano de 98,8% y de materiales densos y duros de 98%, con un consumo específico de agua de solamente 0,025 L/kg de café pergamino seco [21].

Otro aporte significativo de la Disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé ha sido la máquina selectora de frutos de café por color, la cual es capaz de sepa-

rar frutos de café en cinco estados de maduración a través de un circuito electrónico que identifica y toma las decisiones a través de un algoritmo de calibración y clasificación que tiene grabado en la memoria [22]. La máquina tiene un sistema que prepara la materia prima y alimenta los frutos para que puedan ser analizados individualmente, y un sistema de eyección neumática que ubica los frutos de acuerdo a su maduración. La máquina fue desarrollada pensando en mejorar la consistencia del producto a través de una materia prima consistente. La máquina tiene también la potencialidad de ser usada para la preparación consistente de materias primas con diferentes contenidos de frutos en diferentes estados de maduración, lo cual permite la exploración de nuevas calidades que puedan tener alta valoración en el mercado de los cafés especiales. La máquina está en proceso de patente a través de las solicitudes 7-128251 y 7-128272. La Figura 9 muestra una fotografía de la máquina selectora de frutos de café por color.

DESPULPADO

En Cenicafé se desarrolló la norma NTC-2090, la cual sirve de guía para que los fabricantes de despul-

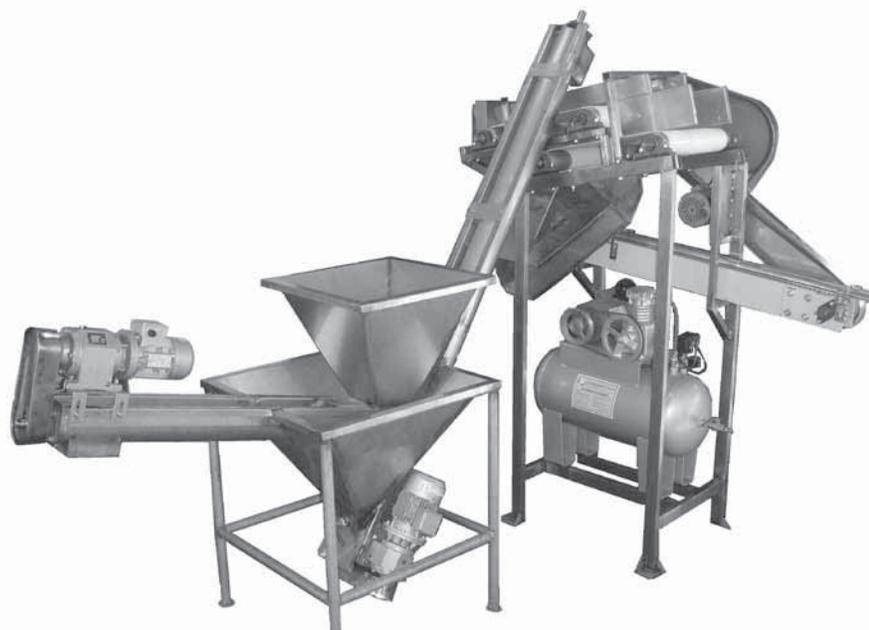


Figura 9. Máquina selectora de frutos de café por color



Figura 10. Máquina para despulpar café diseñada por Cenicafé y la empresa Ingsec Ltda.

padoras la sigan en sus procesos de manufactura y garanticen un producto con estándares mínimos de calidad a los caficultores [20].

Uno de los resultados más importantes relacionados con el beneficio de café consistió en demostrar que el agua no es necesaria para realizar el despulpado del café, ya que la humedad propia del fruto es suficiente para que las semillas sean separadas de la pulpa, con muy bajos esfuerzos. Se encontró que cuando no se usa agua en el despulpado se evita el 72% de la contaminación potencial de las aguas por beneficio húmedo de café. Éste es considerado el paso más importante hacia el desarrollo de la tecnología para el beneficio ecológico de café por vía húmeda.

Conjuntamente con una empresa colombiana, se diseñó y construyó una máquina para despulpar café con menor número de piezas que las existentes, mayor precisión en la fabricación de sus componentes, más fácil de calibrar, con tornillo sinfín para tener flujo de café en el rango deseado (Figura 10). El cilindro dentado y el pechero se fabricaron inicialmente utilizando plásticos de ingeniería con propiedades mecánicas adecuadas para el trabajo, pero debido a problemas presentados en fincas atribuidos al material, se optó por construirlos con aleación de aluminio al silicio,

obteniendo buenos resultados hasta la fecha. Por este desarrollo se obtuvo la patente de modelo de utilidad No. 00-63875.

REMOCIÓN DE MUCÍLAGO

La remoción de mucílago se realiza tradicionalmente por fermentación natural, para degradar el mucílago, y lavado vigoroso con diferentes implementos y agua limpia. Un aporte importante de la ingeniería consiste en la tecnología para lavado de café en el tanque tina con cuatro enjuagues. Con este desarrollo se pasó a un consumo específico de agua del 10% del consumo de agua tradicional [23].

Una forma diferente de remover el mucílago consiste en el uso de enzimas para hacer más rápida y controlada la degradación del mucílago, sin afectar la calidad física y organoléptica del producto. Se determinó que los costos del uso de la enzima son bajos, comparados con las ventajas de control de la calidad que trae consigo la aplicación de estos productos.

Otra manera de remover el mucílago consiste en utilizar medios mecánicos. En ese aspecto la ingeniería creó un desarrollo para remover mecánicamente el mucílago del café con un bajo requerimiento de energía y con un bajo consumo de agua. El sistema, denominado Deslim, consiste en un desmucilagador de flujo ascendente, el cual somete los granos de café a esfuerzos cortantes y a colisiones entre ellos y con las partes fijas y móviles del aparato, con el fin de remover más del 97% del mucílago del café en segundos. El café sale lavado por la parte superior y el mucílago sale por fuerza centrífuga a través de las perforaciones de la carcasa. Esta máquina tiene entradas de agua para diluir un poco el mucílago para que pueda ser expulsado [20, 24].

BENEFICIO ECOLÓGICO DEL CAFÉ POR VÍA HÚMEDA - BECOLSUB

La tecnología para el beneficio ecológico y manejo de los subproductos – Becolsub, es el aporte más importante de la ingeniería a la caficultura nacional. El sistema consiste en la integración del despulpado

sin agua, el desmucilaginado mecánico con muy poca agua en un equipo Deslim y el transporte de la mezcla de pulpa y mucílago en un tornillo sinfín, con el cual se disminuye el consumo específico de agua tradicional en más del 98% y, trabajando de acuerdo a las recomendaciones, se evita más del 90% de la contaminación potencial de las aguas [20]. El transporte de la pulpa y el mucílago concentrado con tornillo sinfín no puede ser cambiado por otro tipo de transportador, dado que dentro de él sucede una mezcla tal que más del 50% del mucílago se retiene en la pulpa, logrando así el control adicional al despulpado sin agua para llegar hasta más del 90% del control de la contaminación. En la Figura 11 se muestra un módulo Becolsub 300, que tiene una capacidad de 300 kg de café en cereza por hora. Para obtener un mejor desempeño y calidad del producto, se recomienda usar una clasificación por tamaño después de la despulpadora y antes del desmucilaginado para retirar frutos que no son despulpados y trozos de pulpa.

Uno de los aspectos que retrazó el lanzamiento de esta tecnología fue el desconocimiento del efecto sobre la calidad en taza de este proceso mecánico. Para tal fin, se realizaron pruebas de catación en paneles nacionales e internacionales a café procesado con desmucilaginado mecánico y con fermentación

natural, incluyendo almacenamiento. Los resultados permitieron concluir que la calidad del café desmucilaginado mecánicamente es al menos igual que la del café procesado con fermentación natural, inclusive hasta después de más de un año de almacenamiento.

16 años después de su lanzamiento, más del 80% de los potenciales usuarios en Colombia usan esta tecnología y se han exportado decenas de unidades a países en América, Asia y África, donde han obtenido las mismas ventajas ecológicas y de calidad observadas en nuestro país. Con el uso de esta tecnología, se ahorran más de 11 millones de metros cúbicos de agua al año y se evita que más de 130.000 metros cúbicos de mucílago vayan al los cuerpos de agua, lo cual sería equivalente a la contaminación diaria de una ciudad de 100.000 habitantes.

CLASIFICACIÓN DEL CAFÉ

El café lavado presenta granos de inferior calidad (vanos, brocados, entre otros) e impurezas (como pulpa) que deben ser retirados antes de iniciar el proceso de secado. Con este propósito, la disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé diseñó y evaluó hidrociclones para diferentes capacidades de procesamiento (Figura 12), de alta eficacia y bajo consumo específico de agua de 3,8 L.kg cps⁻¹, notoriamente inferior a los

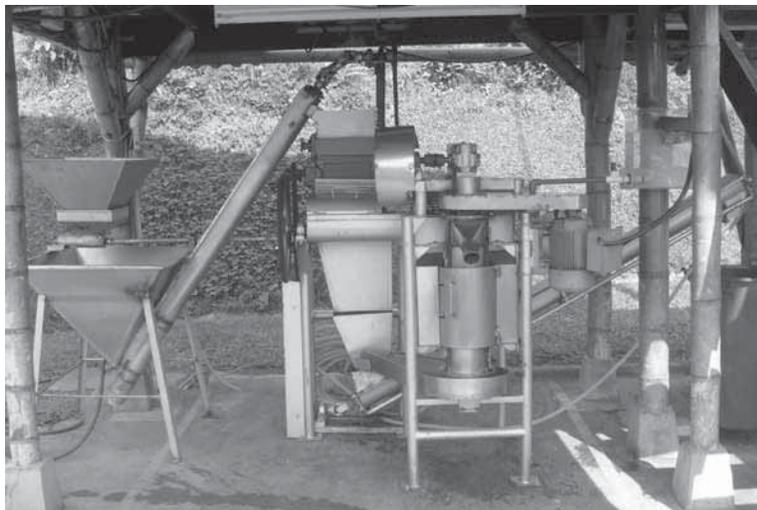


Figura 11. Módulo Becolsub con capacidad para 300 kg de café en cereza por hora



Figura 12. Hidrociclón diseñado en Cenicafé para la limpieza del café

observados en otros equipos utilizadas en las fincas colombianas, como el canal de correteo (mayor de 20 L.kg cps⁻¹) y el canal semi-sumergido (en promedio 6,4 L.kg cps⁻¹) [25].

SECADO

Al finalizar el proceso húmedo, los granos de café presentan contenido de humedad promedio del 53%, condición que los hace muy vulnerables al ataque de microorganismos que pueden causar daños en su calidad física, organoléptica y en la inocuidad. Por tanto, su humedad debe ser reducida hasta el rango establecido en Colombia para su comercialización: 10 – 12%.

Para secar el café en Colombia se utiliza el secado solar, especialmente en fincas pequeñas que en el país son más del 95%; en fincas de mayor producción en los días de menor flujo de cosecha y en combinación con secado mecánico (secado híbrido). La disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafe ha desarrollado tecnologías que permiten aprovechar eficientemente la energía solar y del aire para el secado del café, utilizando materiales disponibles en la mayoría de las regiones cafeteras, plástico empleado en invernaderos de fácil construcción, fácil uso y costo entre \$ 40.000/m² y \$ 60.000/m² [26]. Estas tecnologías (Figura 13) se utilizan exitosamente en la mayoría de los departamentos colombianos; se han construido decenas de miles de ellas, permitiendo al caficultor agregar valor a su producto, obtener café de buena calidad, sin contaminar el ambiente por emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de partículas.

Para medir la humedad del café en secado solar, la disciplina de Ingeniería Agrícola desarrolló un método de fácil uso denominado Gravimet (Figura 14), de bajo costo (menos de \$ 40.000) y exactitud adecuada, basado en la relación en peso del café en los estados de lavado y seco cuando está en el rango 10 – 12%. Antes de tener disponible esta tecnología, los caficultores presentaban dificultades para determinar el momento en el cual terminar el secado, trayendo consigo la presencia de granos con contenidos de humedad fuera del rango óptimo. Para la aplicación del método



(a)



(b)

Figura 13. Secadores solares con cubiertas plásticas (a) parabólico y (b) túnel

Gravimet, se utiliza una balanza digital de bajo costo (\$ 30.000) con rango 0 – 5kg y resolución de 1g y canastillas fabricadas en malla plástica. En la canastilla se coloca una muestra de café limpio de 200g, con granos sanos, lo que da una altura de 2 cm, la cual debe ser igual a la altura de capa en todo el secador. Cuando el peso de la muestra se reduce a 104 – 105g indica que el proceso de secado ha terminado. El método fue validado en fincas colombianas con excelentes resultados.

El secado mecánico del café se utiliza cuando las condiciones ambientales no son favorables para el secado solar y/o cuando el flujo de café diario es alto y el costo se incrementa por las áreas requeridas y la mano



Figura 14. Método para medir la humedad del café en secado solar (Gravimet)



Figura 15. Planta de beneficio de café con Secadores intermitente de flujos concurrentes

de obra empleada. La disciplina de Ingeniería Agrícola de Cenicafé desarrolló en la década del 70 un secador de dos cuartos, con túnel central y compuertas que permiten la inversión del flujo del aire en cada uno para mejorar la uniformidad de la humedad final del café. Está construido en mampostería y las dos capas se encuentran en secado (secado en paralelo). Posteriormente, al observar el poder secante que aún poseía el aire exhausto se modificó el silo secador Cenicafé para que se trabajara una capa en secado y otra en pre-secado (secado en serie). Este sistema ha sido muy utilizado en Colombia y ha servido de referencia para el desarrollo de nuevas tecnologías de mejor desempeño térmico a partir de la simulación matemática del proceso. Aparte de la optimización del trabajo con secadores de capa estática, el producto más importante del modelamiento y simulación matemática es el secador intermitente de flujos concurrentes de granos y aire de secado (Figura 15), con el cual se logra secar café en menos de 24 h, con eficiencia térmica de 3.500 kJ/kg de agua evaporada, notoriamente inferior a la observada en los secadores de capa estática (> 7.000 kJ/kg de agua evaporada), con mayor uniformidad de humedad [20].

Los modelos de simulación de secado desarrollados también han permitido optimizar la operación de los equipos existentes, para obtener café seco de mejor

calidad, con menores costos por disminución del consumo de combustible, energía eléctrica y mano de obra [27]. Adicionalmente, disminuir el impacto ambiental por menores emisiones de GEI y de partículas.

INGENIERÍA GENÉTICA Y CAFÉ¹

La ingeniería genética, entendida como la aplicación creativa de principios científicos para diseñar estructuras o procesos bioquímicos a partir la cadena de ADN, el material primario de almacenamiento de información de los seres vivos, con el fin de modificar el comportamiento de las células de manera predecible, ha sido utilizada en Cenicafé para entender y mejorar aspectos agronómicos del cultivo del café.

Trabajos iniciados en la década de los años 90 permitieron el aislamiento y caracterización de los promotores genéticos de la alfa-tubulina y la arabicina. Estas secuencias controlan la expresión de genes en las células del cafeto y pueden dirigirla a tejidos u órganos específicos en la planta. Construcciones genéticas que contienen estos promotores asociados a proteínas identificadas en otros organismos como quitinasas, inhibidores de proteinasas e inhibidores de alfa amilasas se están evaluando en estos momentos en plantas de café como alternativas en la búsqueda de fuentes de

1 Contribución del doctor Álvaro L. Gaitán-Bustamante, coordinador de la Disciplina de Fitopatología de Cenicafé.

resistencia a enfermedades y plagas tan graves para la caficultura como la Broca del Café y la Roya.

En el hongo *Beauveria bassiana*, que controla naturalmente a la broca del café, se han probado construcciones de ingeniería genética que le permiten resistir mejor la radiación ultravioleta a la que se expone luego de ser aplicado en el campo y aumentar su patogenicidad al insecto. En la broca del café, utilizando la información complementaria de las cadenas de ADN y aprovechando mecanismos presentes en los organismos, que silencian la expresión de los genes por medio de fragmentos cortos conocidos como RNA de interferencia, se diseñaron moléculas que al ser incorporadas en dietas artificiales inhiben la actividad de las enzimas que le permiten al insecto digerir los granos de café.

Con la capacidad de estudiar genomas completos de genotipos de café y de sus organismos asociados, tanto benéficos como patógenos, se abren aun mayores posibilidades para hacer uso de herramientas de ingeniería genética que permitan afrontar los desafíos de una producción sostenible en términos de los requisitos del mercado, el cambio climático y la conservación ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H.J. Ciro, C.E. Oliveros, F. Álvarez. “Estudio dinámico bajo oscilación forzada del sistema fruto-pedúnculo (S.F.P.) del café variedad Colombia”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. Vol. 51, No. 1, 1998, pp. 63-90.
- [2] H.J. Ciro, F. Álvarez, C.E. Oliveros. “Estudio experimental de la dinámica de las vibraciones longitudinales y transversales aplicadas a las ramas de café”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. Vol. 51, No. 2, 1998, pp. 245-275.
- [3] D. Londoño, C.E. Oliveros, M. Moreno. “Desarrollo de una herramienta manual para asistir la recolección de café en Colombia”. *Cenicafé*, Vol. 53, No. 2, 2002, pp. 93-105.
- [4] J.C. Vélez, E.C. Montoya, C.E. Oliveros. “Estudio de tiempos y movimientos para el mejoramiento de la cosecha manual de café. Chinchiná (Colombia)”. *Cenicafé*, Boletín Técnico No. 21. 1999. pp. 91.
- [5] E. Álvarez, F. Álvarez, C.E. Oliveros, E.C. Montoya. “Propiedades físico-mecánicas del fruto de café y del sistema fruto-pedúnculo del café variedad Colombia”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. Vol. 52, No. 2, 1999, pp. 701-732.
- [6] I.D. Aristizábal, C.E. Oliveros, F. Álvarez. “Physical and mechanical properties of the coffee tree related to harvest mechanization”. *Transactions of the ASAE*. Vol. 46, No. 2, 2003, pp. 197-204.
- [7] R. Martínez, E.C. Montoya, J.C. Vélez, C.E. Oliveros. “Estudio de tiempos y movimientos de la recolección manual del café en condiciones de alta pendiente”. *Cenicafé*, Vol. 56, No. 1, 2005, pp. 50-66.
- [8] J.C. Vélez, E.C. Montoya, C.E. Oliveros. “Human factors performance in coffee harvesting in Colombia”. *Ergonomics Australia*. Vol. 16, No. 2, June 2002, pp. 14-24.
- [9] H.A. López, C.A. Ramírez, C.E. Oliveros, J.R. Sanz. “Aroandes, una tecnología para la cosecha manual de café con alta calidad”. *Cenicafé*, Vol. 59, No. 4, 2008, pp. 283-294.
- [10] H.A. López, C.E. Oliveros, C.A. Ramírez, J.A. Álvarez, J.R. Sanz. “Manga para la recolección manual de café: Experiencia de investigación participativa”. *Avances Técnico Cenicafé*. No. 374, 2008, p. 8.
- [11] C.E. Oliveros, C.A. Ramírez, J.D. Buenaventura, J.R. Sanz. “Diseño y evaluación de una herramienta para agilizar la cosecha manual de café”. *Cenicafé*, Vol. 56, No. 1, 2005, pp.37-49.
- [12] H.A. López, C.E. Oliveros, C.A. Ramírez. “Disminución del costo unitario de la cosecha de café con el empleo de un método de recolección manual asistido”. *Cenicafé*, Vol. 57, No. 4, 2006, pp. 262-273.
- [13] C.E. Oliveros, C.A. Ramírez, R. Acosta. “Equipo portátil para asistir la cosecha manual de café”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. Vol. 58, No. 2, 2005, pp. 3003 – 3013.
- [14] C.A. Ramírez, C.E. Oliveros, J.R. Sanz, R. Acosta, J. D. Buenaventura. “Desgranador mecánico portátil para la cosecha del café – Descafé”. *Cenicafé*, Vol. 57, No. 2, 2006, pp. 122-131.

- [15] D. Díaz, C.A. Ramírez, C.E. Oliveros, E.L. Moreno. "Cosecha de café con el equipo STIHL SP-81 de actuadores oscilantes". *Cenicafé*, Vol. 60, No 1, 2009, pp. 41-57.
- [16] H. Araque, C.E. Oliveros, J.R. Sanz, C.A. Ramírez. "Desempeño de vibradores portátiles del tallo en la cosecha del café". *Cenicafé*, Vol. 56, No. 4, 2005, pp.339-347.
- [17] I.D. Aristizábal, C.E. Oliveros, F. Álvarez. "Mechanical harvesting of coffee applying circular and multidirectional vibrations". *Transactions of the ASAE*. Vol. 46, No. 2, 2003, pp. 205-209.
- [18] J.J. Granja, C.E. Oliveros. "Diseño, construcción y evaluación de un vibrador multidireccional de tallos para la cosecha mecánica de café en Colombia (2)". *Revista Scientia et Technica*. Vol. 21, Julio 2003, pp. 58-64.
- [19] C.E. Oliveros, R. Benítez, F. Álvarez, I.D. Aristizábal, C.A. Ramírez, J.R. Sanz. "Cosecha del café con vibradores portátiles del tallo". *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. Vol. 58, No. 1, 2005, pp. 2697 – 2708.
- [20] G. Roa, C.E. Oliveros, J. Álvarez, C.A. Ramírez, J.R. Sanz, J.R. Álvarez, M.T. Dávila, D. A. Zambrano, G.I. Puerta, N. Rodríguez. "Beneficio ecológico del café". *Cenicafé*, 1999, pp.300.
- [21] C.E. Oliveros, J.R. Sanz, E.C. Montoya. "Dispositivo hidráulico de bajo impacto ambiental para limpieza y clasificación del café en cereza". *Cenicafé*, Vol. 60, No. 3, 2009, pp. 229-238.
- [22] J. Sanz, P.J. Ramos, C.E. Oliveros. "Algorithm to identify maturation stages of coffee fruits". *LAENG Transactions on Electrical and Electronics Engineering Volume I*. San Francisco: IEEE Computer Society, 2008 (ISBN: 978-0-7695-3555-5).
- [23] D. Zambrano. "Lavado del café en los tanques de fermentación". *Cenicafé*. Vol. 45, No. 3, 1994, pp. 106-118.
- [24] C.A. Mejía, C.E. Oliveros, J.R. Sanz, E.L. Moreno, L.A. Rodríguez. "Evaluación del desempeño técnico y ambiental de un desmucilagador de café con rotor de varillas". *Cenicafé*. Vol. 58, No. 2, 2007, pp.122 - 133.
- [25] I. D. Aristizábal, C. A. Salazar, C.E. Oliveros. "Parámetros de diseño de un hidrociclón para clasificar café pergamino". *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. Vol. 51, No. 1, 1998, pp. 191-215.
- [26] C.E. Oliveros, C.A. Ramírez, J.R. Sanz, A.E. Peñuela. "Secador solar de túnel para café pergamino". *Avances Técnicos Cenicafé*. N° 353, 2006, p. 8.
- [27] A. Parra, G. Roa, C.E. Oliveros. "SECAFÉ Parte II: Recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 12, No. 4, 2008, pp. 428-434.