

Estructura y funcionamiento de la planta de café

Claudia Patricia Flórez Ramos; Lizardo Norbey Ibarra Ruales; Luis Fernando Gómez Gil; Claudia Yoana Carmona González; Ángela Castaño Marín; Aristóteles Ortiz

La fisiología vegetal permite tener un conocimiento integrado de los procesos morfológicos, fenológicos y químicos que ocurren en las plantas, de cómo éstos se relacionan entre sí y de la forma cómo son regulados por las condiciones ambientales.

En 1950, Cenicafé creó la Disciplina de Fisiología, dando inicio a una serie de investigaciones enfocadas a determinar los principales factores fisiológicos relacionados con la producción del café en Colombia. El entendimiento de los mecanismos relacionados con la productividad permitirá, en el marco de un trabajo multidisciplinario activo, obtener plantas más eficientes en el uso de recursos como agua y nutrientes, limitantes para alcanzar dicha productividad.

Es así como el reto de los estudios fisiológicos y eco-fisiológicos se centra en aspectos que contribuyan a que la caficultura Colombiana mantenga la competitividad, sostenibilidad, rentabilidad, calidad y valor agregado de sus productos, lo cual finalmente redundará en beneficio para el caficultor.

El presente capítulo recopila investigaciones relacionadas con los aspectos fisiológicos del cafeto, haciendo énfasis en la descripción de la planta y de algunos factores que influyen sobre el crecimiento, desarrollo y producción del café.



*“Antes de la iluminación,
cortar leña, llevar agua.
Después de la iluminación,
cortar leña, llevar agua”*
Proverbio Zen

En memoria del
Doctor Jaime Arcila Pulgarín
1948 - 2013

Cómo Citar:

Flórez, C. P., Ibarra Ruales, L. N., Gómez Gil, L. F., Carmona González, C. Y., Castaño Marín, Á., & Ortiz, A. (2013). Estructura y funcionamiento de la planta de café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 1, pp. 123–168). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook-0026_08

La semilla

En las plantas la semilla tiene como objetivo perpetuar la existencia de la especie, y en el caso particular del café, también es el órgano que se comercializa.

Características y función

La semilla es la **estructura reproductiva** de la mayoría de las plantas superiores terrestres y acuáticas. Se le considera el **órgano de reserva** que cuenta con los compuestos necesarios, para que a partir de ella comience el proceso de formación de una nueva planta (Crecimiento y diferenciación). Las semillas desempeñan una función fundamental en la **renovación, persistencia y dispersión** de las especies vegetales (Ascanio, 1994).

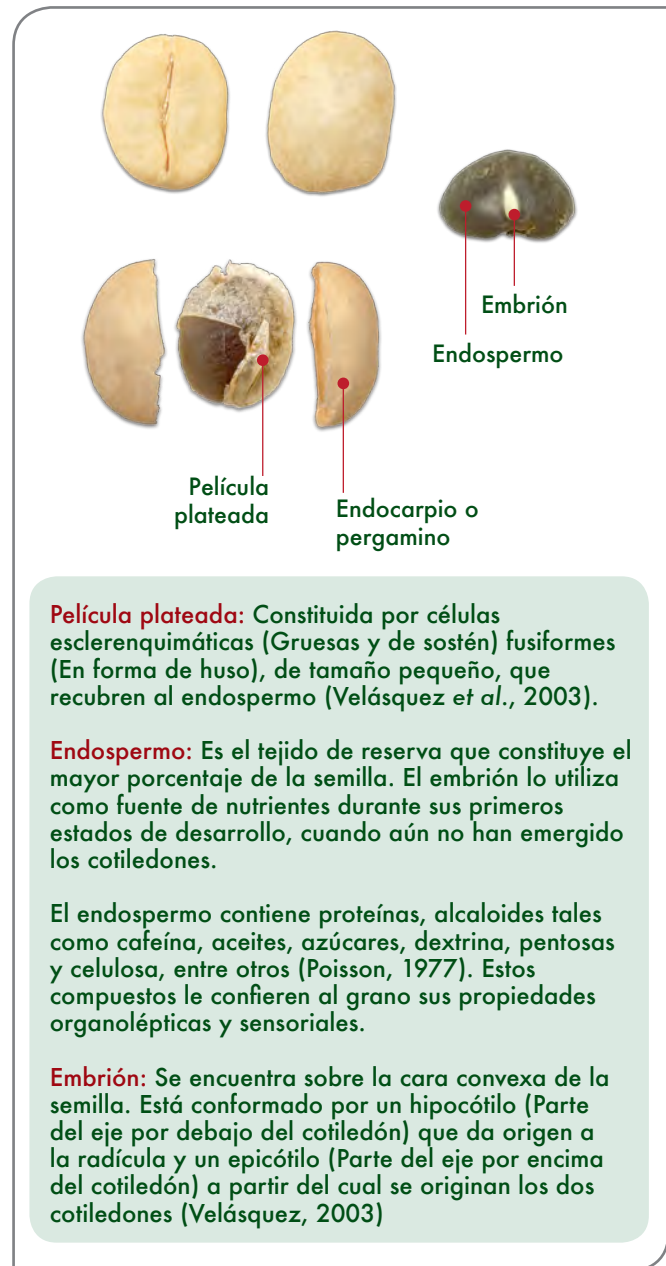
Al hablar de los mecanismos de reproducción del café, a través de los cuales la planta se multiplica sexualmente, por medio de **semilla**, o asexualmente utilizando estacas o esquejes, se observa que en la práctica dependen del tipo de polinización (Polinización cruzada o autopolinización) del material que se desee cultivar.

En Colombia, la totalidad de los cafés cultivados corresponden a la especie *C. arabica* L., caracterizada por presentar autofecundación en un 90% - 95% de los casos, lo cual permite obtener poblaciones homogéneas por reproducción sexual, siendo éste el sistema de multiplicación que más se utiliza (Nutman, 1993). Sin embargo, las demás especies de café, incluida la especie de *C. canephora* L., poseen un alto grado de polinización cruzada, razón por la cual se multiplican vegetativamente para mantener la uniformidad de sus poblaciones (Ascanio, 1994).

La formación de la **semilla** del café inicia desde el momento de la fecundación. Cuando esto sucede, se desencadenan una serie de cambios que conllevan a la formación de un fruto que normalmente contiene dos semillas (Arcila *et al.*, 1992). Un fruto, entre 200 y 220 días después de fecundación, contiene un par de semillas maduras fisiológicamente, lo cual implica que tienen la capacidad para formar una nueva planta (Franco y Alvarenga, 1981).

La semilla de café es una nuez, oblonga, plano convexa, de tamaño variable (10 - 18 mm de largo y 6,5 - 9,5 mm de ancho) (Arcila *et al.*, 2007).

En ella se pueden distinguir las siguientes partes:

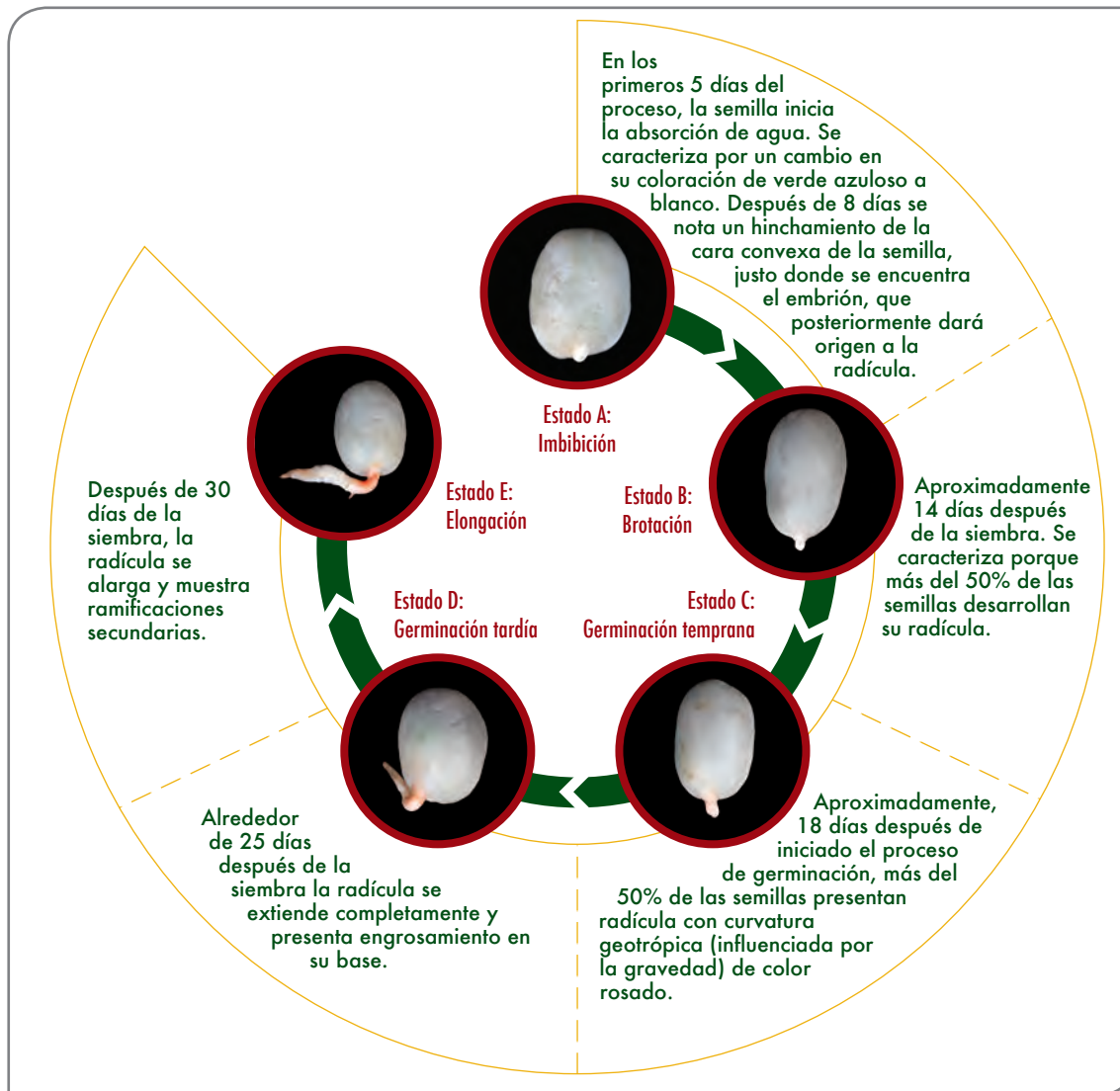


El proceso de germinación de la semilla

La germinación es el proceso por medio del cual el embrión contenido en la semilla recobra su actividad vital. Para dar inicio al proceso de germinación se requieren **condiciones adecuadas de humedad** que reactivan procesos fisiológicos al interior de la semilla. La absorción de agua depende de diferenciales de presión entre el sustrato y la semilla, lo cual genera un fuerte flujo desde afuera hacia adentro, ocasionando un aumento de volumen. Dicho proceso debe ir acompañado de **disponibilidad de oxígeno y temperatura adecuada**. Una vez la semilla está embebida incrementa la respiración,

la síntesis de enzimas y proteínas, dando inicio a la movilización de reservas hacia los tejidos que empiezan a multiplicarse y diferenciarse (Arcila et al., 2007).

En el proceso de germinación se pueden distinguir los siguientes estados:



Consideraciones prácticas

El desarrollo de la radícula durante el proceso de germinación es útil para determinar tempranamente la viabilidad y el vigor de las futuras plantas (Arcila et al., 2007). Los estados más confiables para evaluar germinación corresponden al D y E. En los demás sólo se puede apreciar el fenómeno de imbibición en la semilla, sin que esto garantice que la germinación se llevará a cabo correctamente (Arcila et al., 2007).

Plántulas en estado de chapola (60-70 días después de germinación) muestran diferencias dependientes del tamaño de la semilla de las cuales se originaron. Fisiológicamente una semilla de mayor tamaño desarrolla cotiledones más grandes, que son el primer tejido fotosintéticamente activo de la planta. Por lo tanto, las plántulas que provienen de semillas grandes presentan mayor desarrollo comparadas con aquellas provenientes de semillas pequeñas (Osorio y Castillo, 1969; Castillo, 1970; Arcila et al., 2007).

La semilla de café carece de latencia. Cuando se le retira el pergamino se puede reducir su tiempo de germinación hasta en 20 días (Valio, 1980). La ubicación del embrión facilita que sufra daños al momento del beneficio, cuando

dicho proceso se hace con maquinaria mal calibrada. Cuando éste sufre lesiones puede no germinar o producir el fenómeno de “raíz bifurcada” (Figura 1) (Velásquez et al., 2003).

Anormalidades generadas durante el proceso de formación de la semilla

El fruto normalmente contiene dos semillas, una por cada lóculo o cavidad. Ocasionalmente, se observan frutos de café con tres o más semillas a causa de la ocurrencia de ovarios triloculares o pluriloculares, con más de un óvulo por ovario y con más de una semilla por lóculo. Así mismo, pueden desarrollarse frutos con una sola semilla redondeada debido al aborto de uno de los óvulos. Producto de estas formaciones que se dan durante el proceso de fecundación, se presentan anomalías en bajas proporciones, las cuales tienden a incrementarse cuando se realizan cruces entre parentales con alta incompatibilidad genética (Cruces interespecíficos).

La forma de la **semilla del café** depende en gran medida de la ocupación de las cavidades internas en el ovario, ya que el endospermo se desarrolla una vez que los lóculos han adquirido su tamaño y forma definitiva (López, 1967).

Entre las anomalías de semillas de café se conocen:



Granos caracol. Si un óvulo no se desarrolla, el otro de los que conforman el grano, al crecer, rompe el tabique y ocupa toda la cavidad ovárica, tomando forma ovoide.



Granos triángulo. Granos que se forman en ovarios con tres o más cavidades; se debe a una aberración genética que puede transmitirse hereditariamente.



Granos monstruos. Se presentan cuando se desarrolla más de un óvulo en cada cavidad del ovario, lo que origina igual número de endospermos; éstos llenan la cavidad que ocupan dando origen a este tipo de granos (Garzón et al., 1990).



Figura 1.

Raíz bifurcada.

Consideraciones prácticas

La semilla es el insumo fundamental en el sistema de producción de café, de su buena calidad depende el éxito del cultivo. En la actualidad, los cafeteros cuentan con materiales adaptados a las condiciones de la caficultura colombiana, dentro de los que se destacan la Variedad Castillo® y sus componentes Regionales y la variedad Tabi. La Federación Nacional de Cafeteros entrega a los caficultores semilla con porcentaje de germinación superior al 90%.

La raíz: Soporte y crecimiento de la planta



La raíz es el principal órgano de asimilación de la planta. La función de la raíz está asociada con el **anclaje al suelo, la absorción de agua y sustancias minerales y la síntesis de algunos reguladores de crecimiento**, además de otros compuestos orgánicos.

El sistema radical en las plantas inicia a partir de la semilla, exactamente en el hipocótilo que está ubicado en la base del embrión. Una vez inicia el proceso de germinación, lo primero que se desarrolla es la **radícula**, que da origen a la **raíz principal**, y de ésta se desprende todo el sistema de raíces, que en su conjunto se conoce como **raíz pivotante**.

Partes de una raíz

En la raíz de una planta bien desarrollada se puede distinguir la región de conducción, la región de maduración, la región de elongación, la región meristemática y la cofia (Arcila et al., 2007) (Figura 2).

Región de conducción. Zona por donde pasan hacia el tallo, el agua y las sustancias minerales absorbidas a través de los pelos absorbentes.

Región de maduración. Se caracteriza por tener la mayor cantidad de raíces absorbentes. Las raíces laterales poseen una estructura similar a la raíz principal (Ravent y Evert, 1999).

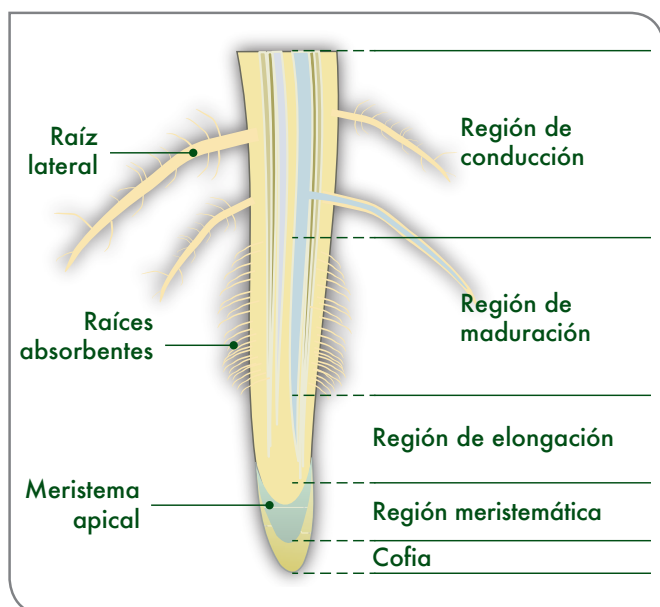


Figura 2.

Partes que conforman la raíz.

Región de elongación celular o crecimiento. Responsable del crecimiento longitudinal de la raíz. Se encuentra ubicada por encima de la región meristemática.

Región meristemática (Punto de crecimiento). Está formada por células meristemáticas caracterizadas por presentar crecimiento activo. A partir de este tejido se forma el protodermo y el procambium, que son precursores de tejidos como la epidermis y algunos tan importantes como los haces vasculares, por donde circula el agua junto con los nutrientes que absorbe la planta desde la solución del suelo.

La cofia. Es la estructura que protege el extremo distal de la raíz de posibles daños que puede sufrir en su recorrido por el suelo. En el proceso de crecimiento las células más externas de la cofia se desprenden paulatinamente para formar una capa mucilaginoso (Raven et al., 1999). La cofia es responsable de la respuesta en crecimiento, orientado por la gravedad o gravitropismo (How et al., 2004)

Sistema radical de una planta de café y condiciones que favorecen su desarrollo

Las plantas jóvenes de café desarrollan un sistema con la presencia de una **raíz principal** muy ramificada, que predomina sobre las **raíces secundarias**. En plantas adultas se describe como una **raíz pivotante central** aquella que puede alcanzar entre 50 y 60 cm de profundidad. De ésta se desprenden dos tipos de raíces, unas **axiales o profundas** que sirven para dar anclaje a la planta, y otras que crecen lateralmente, de las cuales se desprenden **raicillas** por donde se captan los nutrimentos desde la solución del suelo. Aproximadamente, el 80% de estas raicillas se confinan en los primeros 30 cm de profundidad (Nutman, 1993; Arcila et al., 2007) (Figura 3).

Las curvas de crecimiento de la planta de café muestran un comportamiento donde se mantienen las relaciones de proporción entre la parte aérea y radical. Dicha relación al inicio de las fases de crecimiento es mayor para la raíz, tendiendo a invertirse a medida que avanza el desarrollo de la planta, ya que se aumenta la parte aérea con relación a la raíz (Arcila, 1992) (Figura 4).

Cuando las condiciones del suelo no permiten un buen desarrollo, la planta manifiesta una serie de síntomas que generalmente están asociados con problemas nutricionales como amarillamiento, achaparramiento, crecimiento limitado de la parte aérea, presencia de enfermedades como mancha de hierro, defoliación (Paloteo) y, en casos extremos, la muerte de la planta (Suárez, 1977; Arcila, 1992; Arcila et al., 2007).

Consideraciones prácticas

Una planta normal debe poseer un buen sistema de raíces. Para lograrlo es importante contar con un sustrato adecuado y buena disponibilidad de nutrientes.

Las condiciones que limitan el desarrollo de las raíces se presentan desde la **etapa de germinador** por problemas en el beneficio de la semilla, exceso de humedad en el sustrato, siembras inadecuadas, uso indiscriminado de agroquímicos, tamaño de bolsas, poda excesiva o doblamiento de raíces al momento de la siembra. **En el**

campo, puede estar limitado por condiciones propias del suelo como textura y estructura, alta pedregosidad, mal drenaje, poca retención de agua y horizontes subsuperficiales cementados, que limitan su desarrollo (Arcila, 1977; Arcila et al., 2007).

La baja disponibilidad de nutrientes también restringe el crecimiento normal de la raíz, ya que la planta no cuenta con los nutrimentos necesarios para producir los fotoasimilados que normalmente se deben translocar y contribuir a la formación del sistema radical (Arcila, et al., 1992). Los valores de pH ácidos en el suelo asociados con excesos de aluminio ocasionan taponamiento de los haces vasculares, que pueden generar dificultades para la movilización del agua y los nutrientes. Otro factor limitante de origen biótico, lo constituyen las plagas como la palomilla (*Dismicoccus* spp.) y algunas especies de hormigas, así como enfermedades generalmente de tipo

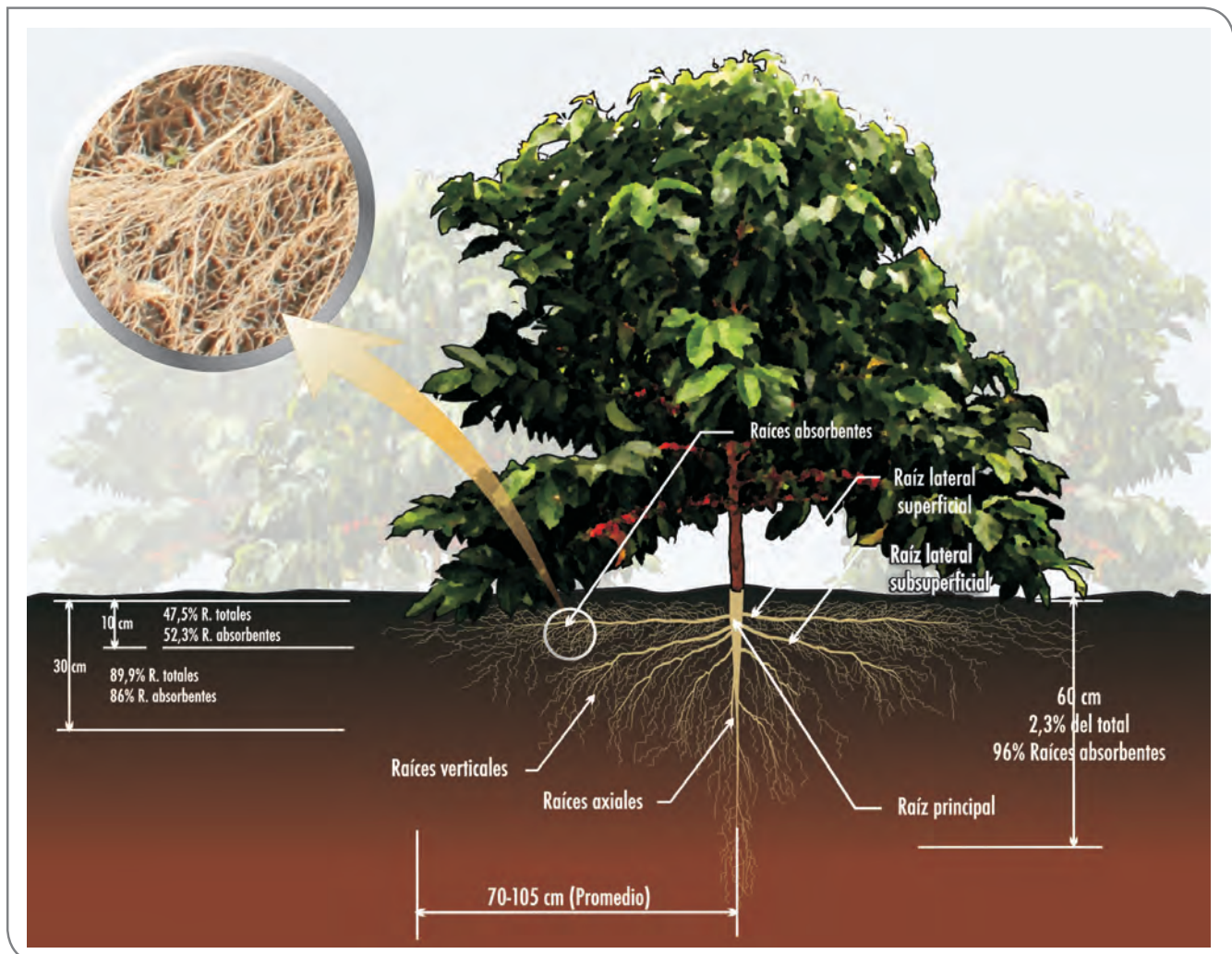


Figura 3.

Sistema radical de una planta de café (Adaptado de Suárez de Castro, 1953).



Figura 4.

Desarrollo de plantas en estado de almácigo.

fungoso como la llaga macana (*Ceratosystis fimbriata*), la llaga negra (*Rosellinia bunodes*) y la llaga estrellada (*Rosellinia pepo*) (Arcila, 1992).

El sistema radical y su influencia en el potencial productivo de la planta

Un buen sistema radical es la base para que la planta desarrolle su potencial productivo.

Al evaluar cuatro líneas componentes de la Variedad Castillo®, seleccionadas por ser contrastantes en términos de producción, se observó que consistentemente las líneas de mayor producción poseen raíces de mayor longitud, volumen y materia seca (López, 2012) (Figura 5).

Consideraciones prácticas

- El tipo de suelo (*Características físicas*), estado nutricional y disponibilidad de agua en el suelo, son algunos de los factores clave para el desarrollo y mantenimiento de las raíces del cafeto, ya que influyen directamente sobre la producción.
- La raíz permite la incorporación del agua y los nutrientes necesarios para completar el desarrollo vegetativo y reproductivo de la planta.
- El desarrollo radical de una planta es proporcional al volumen de suelo que ésta logra explorar, por ende, plantas con excelente sistema radical tienen mayor oportunidad de tomar nutrientes del suelo, comparadas con plantas que poseen sistema de raíces deficientes.

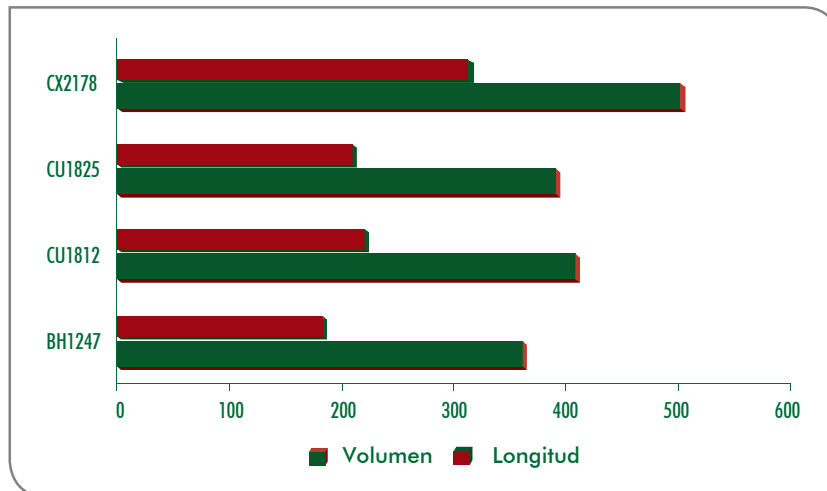


Figura 5.

Longitud total de las raíces (m) y volumen de raíz (cm³), en componentes de la Variedad Castillo® El Rosario (Adaptado de López, 2012).

El tallo, las ramas y las hojas. Arquitectura de la planta de café

La arquitectura de la planta hace referencia a la configuración espacial o disposición de todas las estructuras que conforman el café, en este caso **el tallo, las ramas y las hojas**. La arquitectura del café influye en su capacidad para la absorción y transformación de la energía proveniente del sol en biomasa (Raíces, tallo, hojas, flores y frutos).

El crecimiento del café ocurre a través del año y es regulado por factores ambientales.

Para comprender lo anterior, es necesario conocer la morfología (Forma de diversos órganos vegetales) del tallo, las ramas y la hoja.

Morfología del tallo

El árbol de café está compuesto generalmente de un solo tallo o eje central, nudos y entrenudos.

En los primeros 3 a 4 nudos de una planta joven sólo brotan hojas, de ahí en adelante, ésta comienza a emitir ramas laterales originadas a partir de yemas que se forman en las axilas superiores de las hojas. En cada axila se forman dos o más yemas. La yema inferior da origen a nuevos brotes ortotrópicos y usualmente no se desarrolla a menos que se pade el tallo principal (Arcila *et al.*, 2001) (Figura 6).



La muerte de la **yema apical** ocasionada por microorganismos patógenos o deficiencias nutricionales, entre otros factores, desencadena la activación de las **yemas inferiores**, las cuales formarán nuevos brotes que pasan a sustituirla. Los nuevos brotes crecen primero en sentido horizontal, luego se doblan y crecen verticalmente, formando una rama ortotrópica, que a su vez forma hojas y ramas laterales. Las ramas laterales no se emiten hasta que el tallo principal o sustituto, esté lo suficientemente desarrollado. En la parte inferior



Figura 6.

Crecimiento inicial de una planta de café. En el quinto nudo se observa la aparición de la primera rama lateral.

del tallo, donde las hojas se han caído por efecto de senescencia, se encuentran yemas que sólo se activan al ser interrumpido el crecimiento meristemático apical, debido a podas o doblamiento, lo cual origina la formación de chupones que llegan a sustituir el tallo principal (Wintgens *et al.*, 2009).

En cada nudo formado en el tallo se desarrollan dos axilas foliares opuestas y en cada una de las axilas se originan de cuatro a cinco yemas seriadas, las cuales se denominan laterales o axilares. La primera da origen a los brotes que crecen horizontalmente (Ramas primarias), y se forma un sólo par por nudo. La siguiente yema de la serie, origina brotes verticales o chupones, mientras que las otras yemas permanecen latentes y eventualmente pueden formar flores/frutos caulinares, es decir, que se desarrollan sobre el tallo (Arcila *et al.*, 2007).

Morfología de las ramas

Las **ramas laterales primarias** se originan de yemas en las axilas de las hojas del tallo principal. Estas ramas se alargan continuamente y se producen a medida que el eje central madura. El crecimiento de éstas y la emisión de nuevas **ramas laterales** en forma opuesta y decusada, originan una planta de forma cónica. Las ramas primarias plagiotrópicas, dan origen a otras ramas que se conocen como **secundarias y terciarias**, las que normalmente producen yemas vegetativas y eventualmente a partir de estas yemas se forman flores y frutos (Arcila *et al.*, 2007) (Figura 7).

En cada nudo se originan de ocho a diez yemas de edad desuniforme, de cada yema se forman entre cuatro y seis flores, y a este conjunto se le denomina inflorescencia o glomérulo. Las yemas que no alcanzan a diferenciarse en flores, forman ramas secundarias o terciarias cuando se dan condiciones poco favorables para la floración. La formación de estas ramas ocurre principalmente en plantas mayores de 15 meses (Arcila *et al.*, 2007).



Yemas de la rama: Laterales y apicales

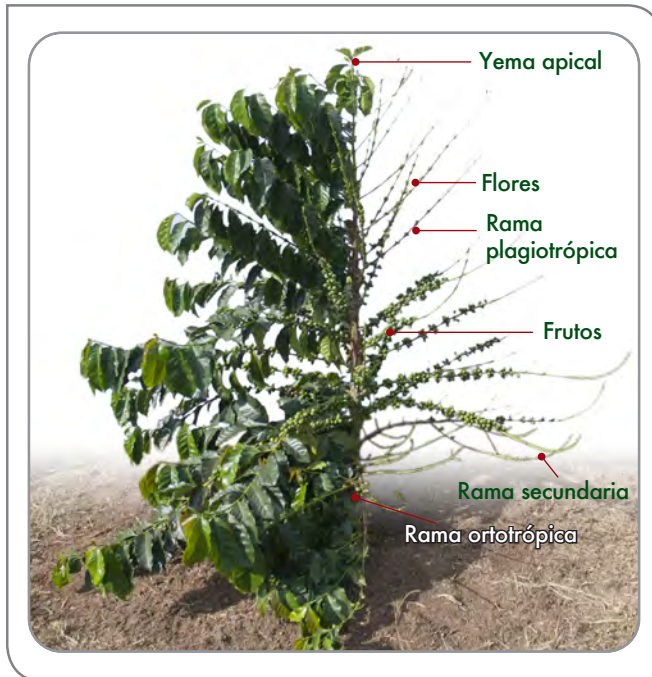


Formación de ramas secundarias

Morfología de las hojas del cafeto

Las hojas son las estructuras más importantes de las plantas, ya que a través de ellas ocurren procesos vitales para su crecimiento y sostenimiento como son **la fotosíntesis, la respiración y la transpiración**. Un desarrollo vigoroso y sano de las hojas se traduce en un buen funcionamiento de la planta.

Reconocida la importancia que tiene la hoja para la planta, en primer lugar es necesario identificar cómo

**Figura 7.**

Arquitectura de una planta de café Variedad Castillo® con sus respectivas yemas, brotes, ramas (Primarias y secundarias), flores y frutos.

**Figura 8.**

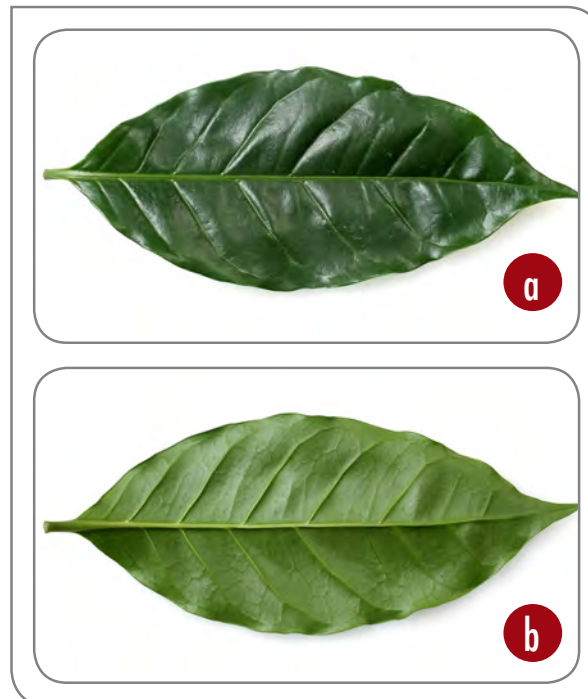
Hojas jóvenes de *C. arabica* L. Variedad Castillo®.

es su estructura para comprender cómo se logra su desarrollo y la constitución del área foliar indicada.

Estructura foliar

El término estructura foliar hace referencia a la conformación y la disposición de los diferentes órganos que conforman las hojas del café, y la ubicación de éstas en la planta. Al conocer la estructura foliar del café es posible definir prácticas del cultivo como la densidad de siembra, y a futuro tomar esta característica para la selección de materiales promisorios para las condiciones ambientales de Colombia.

Características generales de las hojas. En *C. arabica* las hojas son opuestas, elípticas, de color bronce o verde claro cuando son jóvenes (Figura 8) y se tornan verde oscuro a medida que se desarrollan. El color de las hojas en los primeros estados de desarrollo es una característica que permite diferenciar entre variedades de café. Así mismo, las hojas son glabras (Sin pelos) y cubiertas por una capa cerosa en la haz (Figura 9ab). El sistema de nervaduras es reticulado, con una nervadura central y de 9 a 12 nervaduras secundarias en ambos lados, recurvadas y sobresalientes en el envés. Los bordes son enteros y levemente ondulados.

**Figura 9.**

Hoja madura de *C. arabica* L. Variedad Castillo®. **a.** Haz; **b.** Envés.

Inicio del desarrollo de la hoja en el cafeto.

El desarrollo foliar en el cafeto inicia con una serie de divisiones en una de las tres capas celulares más externas, cerca de la yema apical, la cual se transforma en una protuberancia lateral o primordio foliar, que luego por divisiones continuas y crecimiento de sus células, se convertirá en una hoja (Figura 10) (Arcila et al., 2007).

El peciolo. Es el órgano que da soporte a la lámina foliar y que la une con el tallo. Su función aparte de sostenimiento está asociada con la conducción de agua, sales minerales y foto-asimilados desde el tallo hacia la hoja y desde ésta hacia los órganos vertedero. El peciolo

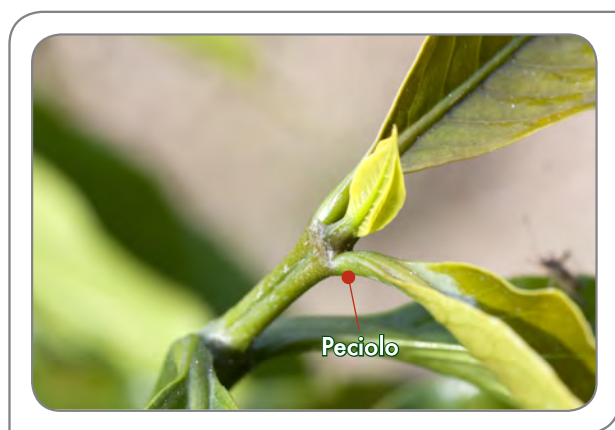


Figura 10.

Formación de la hoja del cafeto.

se une a la rama formando la axila foliar, en la cual se puede apreciar la formación de una inserción en forma de escudo. Por el extremo opuesto se encuentran unas asas que representan los vestigios de los primeros estados de expansión de la lámina foliar. Internamente contiene haces vasculares de xilema asociados a la epidermis superior, y del floema asociados a la epidermis inferior. Adicionalmente, en el tejido parenquimatoso se encuentran haces de menor tamaño que se hacen más pequeños a medida que se aproximan hacia la periferia de la hoja (Federacafé, 2008).

Estructura de la lámina foliar. En un corte transversal de la hoja de café, se puede observar la epidermis superior, inferior y el tejido del mesófilo (Figura 11).

- En *C. arabica* tanto la epidermis superior como la inferior son uniseriadas, con presencia de cutícula. El tejido del mesófilo consta de los parénquimas de empalizada y esponjoso.
- El parénquima de empalizada está constituido por una sola capa de células elongadas y perpendiculares a la superficie de la hoja, con abundancia de **cloroplastos**. Su diámetro varía de acuerdo con la especie (7 - 8 micrómetros), siendo este tejido más compacto que el esponjoso, ocupando cerca del 50% del espesor de la hoja.
- El parénquima esponjoso lo conforman varias células esféricas, de estructura menos compacta, con espacios intercelulares (Estructura lagunosa) menores que las del parénquima de empalizada y



Figura 11.

Corte transversal de una hoja de café. 20X

con **cloroplastos numerosos** y prominentes, que se encuentran rodeando las células de la corona del haz vascular.

- Los haces vasculares se encuentran debajo de las células del parénquima de empalizada y están rodeados por siete u ocho células en forma de corona, de mayor tamaño que las del parénquima esponjoso circundante, dando la apariencia de una corona denominada “cubierta de los haces vasculares”. Los cloroplastos en las células de la corona del haz vascular son similares en tamaño y posición a los del mesófilo (Vélez *et al.*, 1999).

Otra estructura muy importante de la hoja son los estomas o poros, que se encuentran en la lámina foliar, a través de los cuales se produce el intercambio gaseoso y la refrigeración de la hoja.

Las hojas del café son hipoestomáticas (Solo posee estomas en el envés), y su distribución es relativa, ya que depende de factores genéticos, condiciones ambientales y del estado de desarrollo de la hoja (Figura 12). Estas estructuras tienen la capacidad de abrirse y cerrarse rápidamente, por lo que la transpiración está bien regulada y, por lo tanto, la resistencia a la sequía es alta en esta especie (Wintgenset *al.*, 2009).

Cuando la transpiración es demasiado intensa, la planta se marchita (Las células pierden su turgencia o máximo tamaño por el contenido de agua existente en ellas) y su metabolismo general se hace más lento. La marchitez

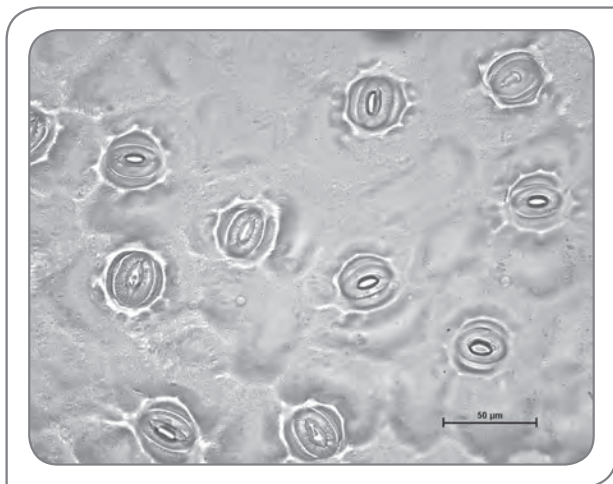


Figura 12.

Estomas en hojas de *C. arabica* L. Variedad Castillo®.

demasiado avanzada es irreversible, de tal forma que representa un peligro potencial para la planta. Se estima que la Variedad Castillo® posee en sus hojas un promedio de 160 estomas/mm² (Castaño, 2013)¹.

Crecimiento de la hoja y área foliar

Formación y crecimiento de la hoja. La formación de hojas nuevas en el árbol de café se da durante todo el año pero existen épocas en las cuales este proceso se incrementa como consecuencia de un mayor brillo solar y una mejor disponibilidad de agua en el suelo. En la zona central cafetera, en un año neutro, la mayor formación de nuevas hojas se da en tres períodos: Entre febrero-abril, julio-agosto y noviembre-diciembre, siendo tradicionalmente más marcado en el primer período (Valencia, 1999).

Existe una tendencia a reducir la tasa de aparición de nuevas hojas en las ramas primarias con el transcurso del tiempo. Sin embargo, esto se compensa con la aparición de ramas secundarias, las cuales también presentan formación de hojas (Valencia, 1998).

En el café, la formación de hojas, y por lo tanto el área foliar, son características que varían dependiendo de la especie, edad del cultivo, distancia de siembra, estado fitosanitario y condiciones ambientales. Es así como:

- En café variedad Caturra el primer par de hojas verdaderas aparece 75 días después de la germinación y su máximo desarrollo se alcanza después de 20 a 25 días. En las ramas primarias de árboles adultos, aproximadamente cada 15 a 20 días aparece un nuevo par de hojas (Valencia, 1983). Las hojas del café tardan entre 40 - 60 días en alcanzar su máxima longitud (25-30 cm²) (Valencia, 1983; Arcila, 1985). El número de hojas en una planta difiere según las condiciones de luminosidad y altitud (Tabla 1) (Valencia, 1998).
- En árboles de variedad Caturra, de 4 años, se registró un número de hojas promedio de 3.920, 6.400 y 7.600 para densidades de siembra de 10.000, 5.000 y 2.500 plantas/ha, respectivamente. En variedad Colombia, en árboles de esta misma edad, se encontraron valores máximos de número de hojas de 4.365, 11.623 y 12.521 para las mismas densidades. Así mismo, se encontró una tendencia a disminuir el tamaño promedio de las hojas con la edad. El desarrollo foliar de las variedades Caturra y Colombia muestra que entre más amplias sean las distancias de siembra, el área foliar por planta es mayor, al alcanzar valores cercanos a 20 m², a una densidad de 2.500 plantas/ha, y contrastar con

¹ CASTAÑO, A. 2013. Comunicación Personal. Fisiología Vegetal – Cenicafé.

Altitud(m)	Altura (cm)		Peso seco(kg)		Número de hojas	
	Sol	Sombra	Sol	Sombra	Sol	Sombra
1.050	22	32	3,9	5,7	18	23
1.250	24	27	4,6	4,5	23	21
1.550	17	22	3,3	4,1	18	20
1.850	15	16	2,5	2,5	17	16
2.050	9	9	1	1,2	14	14

Tabla 1.

Altura, peso seco y número de hojas por planta de café var. Caturra en estado de almácigo, a diferentes altitudes (Adaptado de Valencia, 1998).

valores de 10 m² a densidades de 10.000 plantas/ha, en árboles de 4 años (Valencia, 1973; Arcila y Chávez, 1995) (Figura 13).

- En árboles de la Variedad Castillo®, sembrados a una densidad de 10.000 plantas/ha, se registró un número de hojas promedio de 495, 727 y 1.504, en edades de 14, 17 y 25 meses, respectivamente. En estos mismos árboles, el área foliar estuvo entre 1,4 y 3,5 m², evidenciándose una rápida tendencia a incrementar este valor con la edad del cultivo (Figura 14) (Flórez, 2013)².
- El valor promedio de área foliar en árboles de 20 meses de edad, a una densidad de 5.000 plantas/ha, en variedad Caturra, en líneas F4 de variedad Colombia y en líneas componentes de la Variedad Castillo® es de 2,30 m², 2,50 m² y 2,73 m², respectivamente.

Para lograrlo, es necesario que el área foliar se distribuya uniformemente en el dosel de la planta y de esta forma asegurar una adecuada cobertura del suelo (Figura 15).

- La relación entre el área foliar que conforma el dosel de la planta (Tomada sobre una sola cara de cada hojas) y su proyección en el terreno (Área de suelo) se denomina índice de área foliar (IAF), cuyo valor es adimensional (Gardner *et al.*, 1985). Debido a que la radiación solar cubriría toda la superficie del suelo en ausencia de plantas, se puede concluir que el IAF es un indicador de la cantidad de área foliar disponible por unidad de radiación solar.
- Las variedades Caturra y Colombia presentan valores máximos de IAF de 8 y 7, respectivamente. Para la variedad Caturra, con un IAF de 8 se obtienen las máximas producciones; este valor se alcanza a los 3 años, con una densidad de 10.000 plantas/ha, y a los 4 años, con 5.000 plantas/ha (Valencia, 1973). En árboles de 3,5 años de variedad Colombia, se encontraron IAF máximos de 6,1 a una densidad de siembra de 12.500 plantas/ha (Castillo, 1995).

Índice de área foliar. Para que un cultivo use eficientemente la radiación solar, gran parte de ésta debe ser absorbida por los tejidos fotosintéticamente activos.

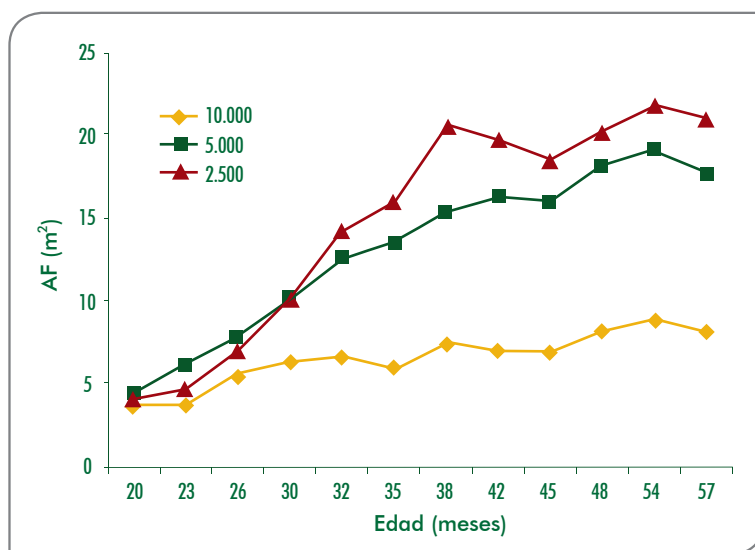


Figura 13.

Área foliar de árboles de variedad Colombia, en diferentes densidades de siembra y en distintas edades (Tomado de Arcila y Chávez, 1985).

² FLÓREZ, C. 2011. Proyecto "Determinación de la variabilidad genética de la floración". Cenicafé

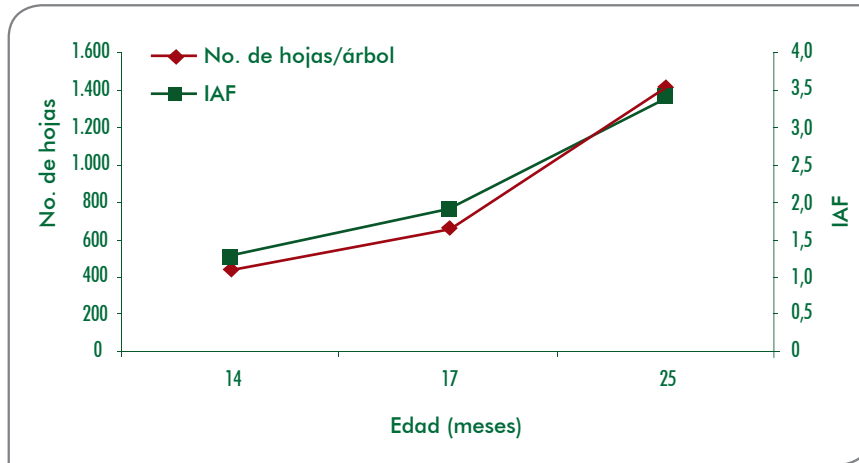


Figura 14.

Área foliar y número de hojas por árbol en variedad Castillo® en diferentes edades.³

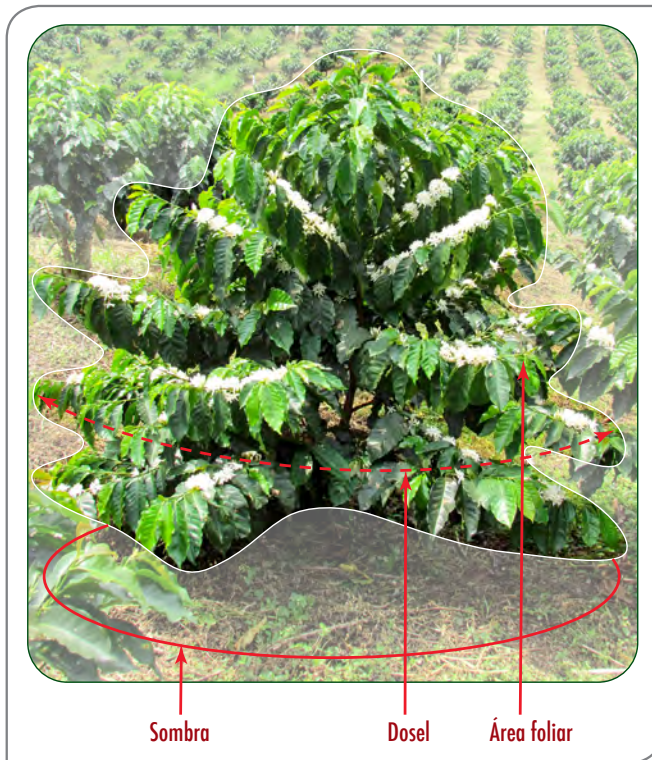


Figura 15

Índice de área foliar - IAF: Relación entre área foliar (Dosel) y área del suelo (Sombra)

- En plantaciones establecidas con la Variedad Castillo® en edades de 14 a 25 meses, con una densidad de 10.000 plantas/ha, el IAF promedio fue de 2,37 (Flórez, 2013)³.

- El IAF en promedio para árboles de 20 meses de edad y sembrados a una densidad de 5.000 plantas/ha de la variedad Caturra, de cuatro líneas F4 de variedad Colombia y de cuatro líneas componentes de la variedad Castillo® fue de 1,14, 1,25 y 1,60 respectivamente (Figura 16) (Flórez, 2011).

Consideraciones prácticas

Los cultivos más eficientes tienden a invertir la mayor parte de su crecimiento vegetativo en expandir su área foliar, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de la radiación solar (Watson, 1947; Valencia, 1973).

Prácticas agronómicas como la fertilización, densidad de siembra óptima (Dependiendo de la variedad) y un adecuado arreglo espacial, son importantes para incrementar la interceptación de luz y maximizar la cobertura del suelo por el dosel.

Duración y caída de hojas. La duración de las hojas es afectada por factores como déficits hídricos severos, altas temperaturas y deficiencias nutricionales, los cuales reducen la cantidad de carbohidratos en la planta, siendo esto mucho más notorio durante la maduración del fruto (Arcila, 1985).

³FLÓREZ, C. 2013. Informe Proyecto "Caracterización de la aplicación combinada de reguladores fisiológicos y nutrientes foliares sobre la producción de *C. arabica* variedad Castillo® General. Cenicafé.

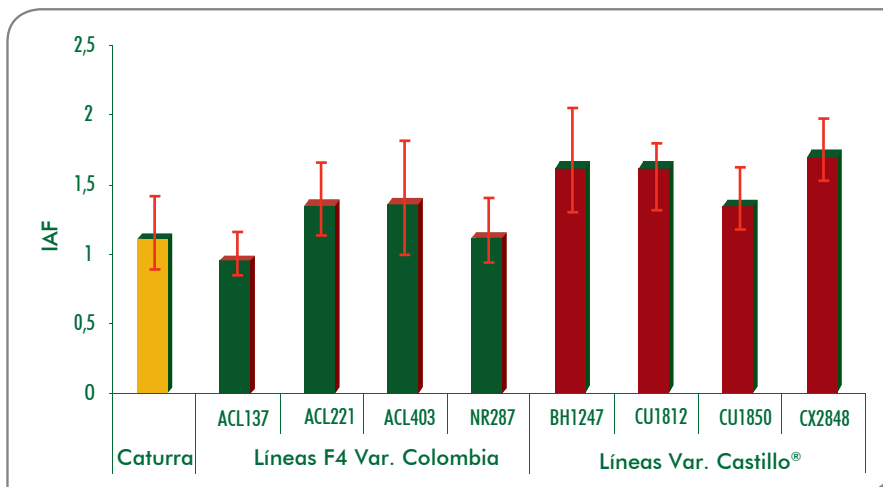


Figura 16.

Índice de área foliar promedio en tres variedades de café: Caturra, Colombia y Castillo, en plantas de 20 meses de edad (Flórez, 2011).

En la zona cafetera las hojas duran en promedio de 10 a 15 meses en cafetales bajo sombra y de 9 a 14 meses en cafetales a plena exposición solar (Arcila y Valencia, 1976). El valor pico de caída natural de las hojas se da entre octubre y diciembre, lo cual coincide con la época de la cosecha principal (Arcila, 1985).

Relación entre el desarrollo foliar y la capacidad de asimilación de carbono.

A medida que las hojas envejecen, su capacidad de intercambio gaseoso se reduce, disminuyendo de esta manera su tasa fotosintética.

Las hojas que presentan mayores tasas fotosintéticas son las del tercero y cuarto nudo a partir del ápice de la rama, esta información es de gran importancia a la hora de realizar estudios relacionados con capacidad de intercambio gaseoso.

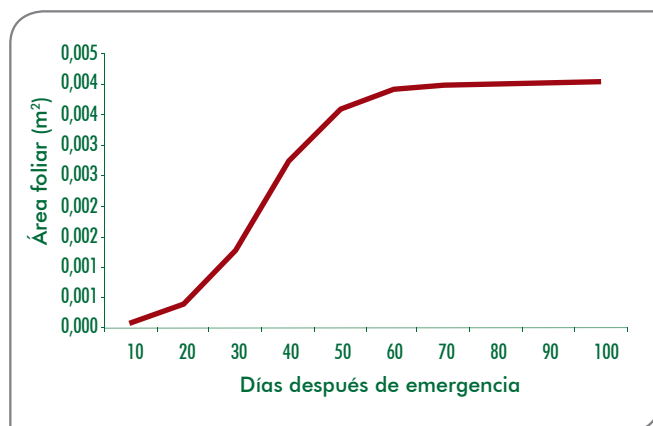


Figura 17.

Ganancia en área foliar en relación con la edad de la hoja en *C. arabica* (López, 2004).

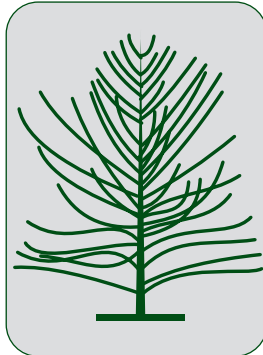
Para *C. arabica* var. Caturra, la edad en el cual la hoja llega a su máxima capacidad de asimilación de carbono es aproximadamente a los 60 días después de emergencia, luego de este tiempo declina su eficiencia en capturar carbono (Figura 17) (López, 2004).

Arquitectura del dosel

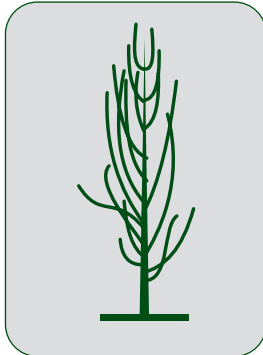
De acuerdo con la inclinación de las hojas existen cuatro clases de distribución del dosel de las plantas.

- **Planófila**, cuando la mayor proporción de los ángulos foliares se encuentra entre 0° y 30°.
- **Plagiófila**, cuando la mayor proporción de los ángulos foliares se encuentra entre 45- 60°.
- **Erectófila**, cuando la mayor proporción de los ángulos foliares está entre 60° - 90°.
- **Extremófila**, cuando se presenta un doble pico de ángulos de inclinación foliar con máximos en 0° y 90° (Wit, 1965).

Las plantas con ramificación plagiotrópica (Planófila), son más productivas que las de tipo ortotrópica (Erectófila) (Salazar, 1988). Sin embargo, la distribución angular puede cambiar cuando las plantas alcanzan su mayor actividad productiva. El peso de la cosecha y la mayor edad de los cafetos conducen a que las ramas se agobien y, en consecuencia, se presenten dos tipos de distribución en la misma planta: La original, inmodificada en la parte superior, y la modificada predominantemente plagiotrópica en los estratos inferiores, lo que puede facilitar la penetración de la luz al interior del dosel. Así mismo, prácticas de manejo como las podas, también modifican la arquitectura de la planta (Figura 18) (Arcila et al., 1990).



Planófila



Erectófila

Arquitectura de la planta tipo planófila variedad Caturra y tipo erectófila variedad Erecta.

C. arabica presenta dos tipos de arquitectura con relación a la disposición de las ramas: Erectófila y planófila.

Planófila con ramificaciones predominantes plagiotrópicas, como ocurre en la variedad Caturra, en la cual las ramas se insertan en un ángulo aproximado de 80° - 90° con relación al tallo (Mejía, 2006).

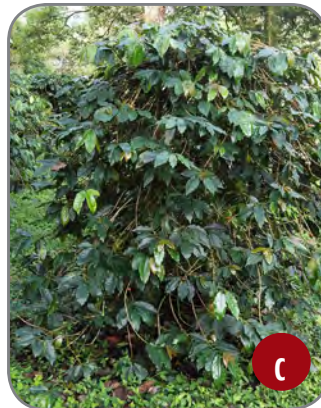
Erectófila con ramificaciones predominantemente ortotrópica, como se presenta por ejemplo en la variedad Erecta, donde las ramas se insertan en un ángulo de 30 - 40° con las hojas casi horizontales.



a



b



c

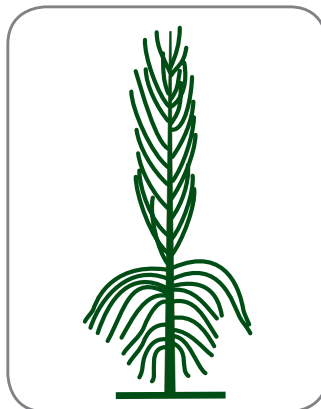
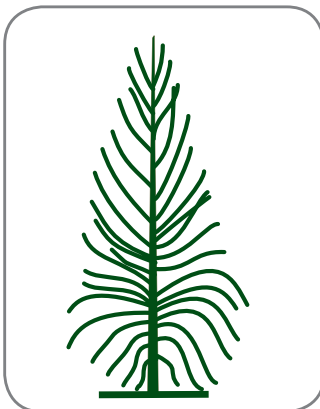


Figura 18.

Modificaciones de la arquitectura del café. **a y b.** Modificaciones relacionadas con la edad; **c.** Modificación por poda de la yema apical del tallo ortotrópico.

Los hábitos de crecimiento y producción del cafeto en Colombia, así como su arquitectura hacen que la planta presente una conformación especial que afecta su comportamiento. Es así como se determinaron “regiones fisiológicas” en la planta, en las cuales se establecen las zonas de crecimiento vegetativo activo, zonas de crecimiento reproductivo (flores y frutos) y zonas de senescencia (Figura 19) (Arcila, 1990).

El ángulo de inserción de la rama afecta la arquitectura de la planta y la distribución de la luz dentro del árbol.

Los valores medios para la variedad Castillo®, con una edad de 3 a 4 años varían entre 24 - 29°. En plantas de mayor edad se observa un mayor ángulo de inserción en las partes terminales de las ramas productivas. El ángulo de inserción de la hoja también afecta la arquitectura de la planta y la interceptación de la luz (Alvarado y Ochoa, 2006).

El dosel y la radiación solar. La eficiencia fisiológica primaria de una planta está relacionada con la interceptación de la luz, absorción de la energía incidente y su conversión en biomasa (Raíces, tallo, hojas, flores

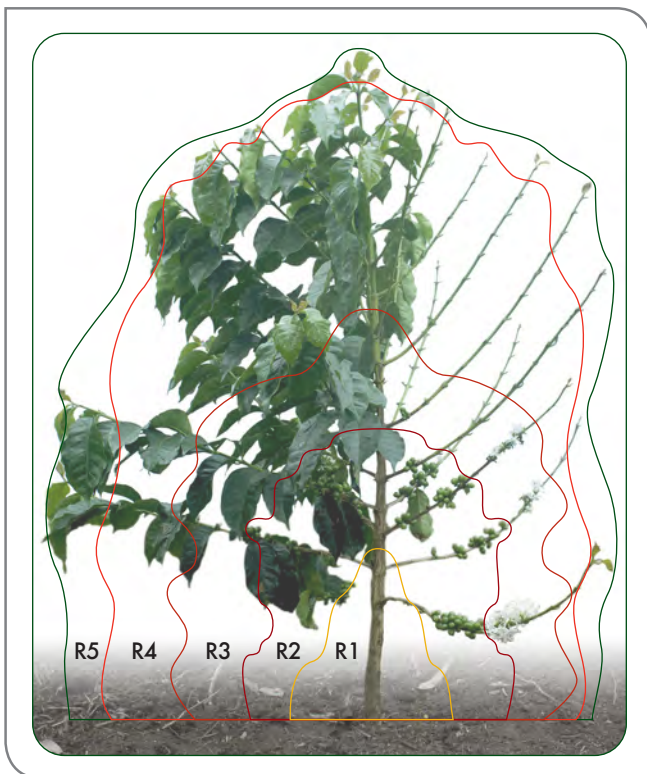


Figura 19.

Regiones fisiológicas de una planta de café en etapa productiva (3 años). R1: Senescencia. R2: Crecimiento activo de frutos. R3: Desarrollo floral. R4: Crecimiento activo de hojas. R5: Región meristemática.

y frutos), lo cual está relacionado directamente con la estructura, el ángulo de inserción de ramas y hojas, la forma y el tamaño de la hoja, el índice de área foliar (IAF) y la actividad fotosintética por unidad de área foliar, entre otros factores (Castillo et al., 1997). Dentro de las características del dosel, **la orientación del follaje guarda una relación estrecha con la interceptación de la luz** en los distintos estratos del árbol, asociada a su arquitectura, y por ende, ejerce una marcada influencia sobre la tasa fotosintética del cultivo (Cabezas et al., 2005). En árboles en producción de *C. arabica* variedad Colombia, sembrados a una densidad de 5.000 plantas/ha, el mayor porcentaje de las hojas en los cuatro estratos del árbol (Superior, medio superior, medio inferior e inferior) está en el rango de inserción entre 0-30°, lo cual es típico de plantas con distribución foliar planófila (Castillo et al., 1996).

Consideraciones prácticas

El diámetro de la copa del árbol depende de la longitud de las ramas y del ángulo de inserción de las mismas. Éstas son características determinantes para la correcta selección de la distancia de siembra del cultivo. De igual manera, existe una relación directa entre la altura y el diámetro del árbol, debido a que la selección de plantas con mayor altura, favorece el incremento de la longitud de las ramas y el número de nudos productivos por rama (Alvarado y Ochoa, 2006).

Variabilidad en la arquitectura del café

De acuerdo con la morfología de las ramas y hojas, la variedad Castillo® se divide en cuatro plantas tipo (Alvarado et al., 2002):

Tipo A. Ramas que confieren una apariencia cónica, con presencia de ramificación secundaria. Hojas similares al tipo Caturra, en cuanto a su forma y tamaño, aunque su posición en las ramas puede ser pendiente. Poseen vigor vegetativo y una altura similar a la de la variedad Caturra, aunque a veces puede ser menor que ésta.

Tipo B. Árboles con ramas más largas que en el tipo A, abiertos, con copa plana o ligeramente redondeada,

debido a la longitud de las ramas. Sus hojas son de mayor tamaño, comparadas con las de la variedad Caturra, con inserción normal o pendiente. La altura de las plantas puede ser mayor a la de la variedad Caturra.

Tipo C. Corresponde al fenotipo observado en la variedad Caturra.

Tipo D. Son árboles abiertos por la mayor longitud de sus ramas, con ramificación secundaria escasa o normal. Hojas con bordes ondulados, nervaduras acentuadas y de forma redondeada, dispuestas la mayoría de las veces en forma vertical.

Consideraciones prácticas

La Variedad Castillo® presenta plantas con diferentes tipos de arquitectura. Este hecho no constituye una limitación en la capacidad productiva de la planta, ni está relacionado con enfermedades o disturbios fisiológicos. Esta diversidad está relacionada con la capacidad de captación y distribución de la luz.

La floración del café: Comienzo de la etapa reproductiva de la planta

La floración del café es un indicador de la producción y de la distribución de la cosecha a lo largo del año en la geografía cafetera. El desarrollo floral está determinado

por las condiciones medioambientales propias de cada región. Particularmente, en el café este proceso es complejo y se inicia de 4 a 5 meses antes de la apertura de la flor o antesis (Camayo y Arcila, 1996; Camayo et al., 2003).

El desarrollo de las inflorescencias

Las flores del café se forman predominantemente a partir de yemas seriadas, ubicadas en las axilas foliares, que se encuentran en los nudos de las ramas plagiotrópicas y con menor frecuencia en los nudos de los brotes ortotrópicas (Camayo y Arcila, 1996) (Figura 20a-b). Cada nudo presenta dos axilas foliares opuestas, y en cada axila se forman de tres a cuatro yemas. Cada yema posee un tallo corto denominado pedúnculo, el cual presenta varios nudos en los que se insertan dos hojas diminutas y opuestas, denominadas brácteas, en cuyas axilas se producen alrededor de cuatro botones florales (Figura 20c). Este conjunto constituye la inflorescencia, denominada también glomérulo (Figura 20c) (Arcila, 2004). Esto significa, que cada nudo tiene el potencial para producir entre 24 y 32 flores, sin que esto sea una regla absoluta.

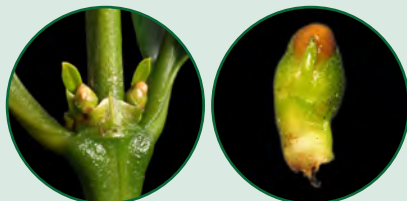
En términos generales, la región cafetera Colombiana, se caracteriza por que en cada rama y en cada nudo, se presentan diferentes estados de desarrollo de las yemas axilares y de los botones florales a través del tiempo (Camayo y Arcila, 2003). Los botones florales de la yema más cercana a la rama son los primeros en alcanzar su madurez.

El desarrollo de los botones florales del café está regulado por una compleja interacción entre factores ambientales (Externos) y genéticos (Internos), que permiten su diferenciación, basados en características morfológicas, en seis etapas del desarrollo floral en el café, así:



Diferenciación (BBCH-51)⁴. Durante esta etapa ocurre una activa división celular que trae como resultado la formación de una serie de yemas, que de diferenciarse en estructuras reproductivas darán origen a las inflorescencias. En esta etapa, el nudo está rodeado por estípulas de color verde claro. Esta etapa puede durar aproximadamente entre 30 y 35 días (Camayo y Arcila, 2003; Arcila, 2004).

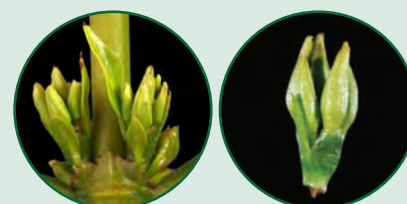
⁴ BBCH: Escala extendida para la descripción de los estados de crecimiento del café (Arcila et al., 2001).



Iniciación de la inflorescencia (BBCH-53). Los botones florales de color verde, presentan un tamaño promedio de 2 mm, y se encuentran recubiertos por una capa delgada de mucilago de color ámbar, cuya función parece estar ligada a conservar la humedad del botón durante este estado (Drinnan, 1992; Camayo y Arcila, 2003; Arcila, 2004).



Desarrollo de los botones florales (BBCH-57). Se observan botones florales de color verde, con un tamaño promedio de 2,6 mm, completamente adheridos entre sí, aun sin abrir, que sobresalen por debajo de las estípulas, emergiendo de la inflorescencia. Esta etapa tiene una duración de 45 días aproximadamente (Arcila *et al.*, 2001; Camayo y Arcila, 2003; Arcila, 2004).



Latencia (BBCH-58). Botones florales verdes e individuales, con un tamaño aproximado de 4-6 mm, que cesan su crecimiento y entran a una fase de reposo inducido por la exposición continuada de la yema a estrés hídrico. Los botones en este estado se denominan "cominos" (Arcila *et al.*, 2001; Camayo y Arcila, 2003).



Preantesis (BBCH-59). Botones florales definidos, blancos, con pétalos cerrados. En este estado, son flores completamente desarrolladas y próximas a abrir. Las lluvias repentinas, la reducción súbita de la temperatura y las variaciones en el contenido de hormonas a nivel del nudo, estimulan el crecimiento del botón floral latente, que aumenta su longitud entre tres y cuatro veces. En este estado los botones florales son conocidos como "velones" (Arcila *et al.*, 2001; Camayo y Arcila, 2003; Arcila, 2004).



Antesis o apertura floral (BBCH60-69). Botones florales completamente abiertos, de aproximadamente 20 mm de longitud, que dejan al descubierto pétalos, estambres y pistilo (Arcila *et al.*, 2001; Arcila, 2004). Son flores maduras y funcionales (Adaptado de Wormer y Gituanja, 1970; Arcila *et al.*, 2001; Camayo y Arcila, 2003).

La flor del café

La flor de café está compuesta por una corola con cinco lóbulos, un cáliz, cinco estambres y el pistilo (Ovario, estilo y estigma). El ovario está en la base de la corola (Ífero) y contiene dos óvulos, que una vez fertilizados, normalmente van a producir dos semillas de café (Figura 21). La flor se une a la inflorescencia mediante el pedicelo. Los estambres se insertan entre los lóbulos a través de filamentos cortos. Cada estambre posee una antera que contiene cuatro sacos polínicos (Arcila, 2004).

Las flores abren temprano en la mañana y permanecen abiertas entre 2 y 3 días aproximadamente. Una vez fertilizadas, las anteras se tornan de color café. Después de 2 días la corola blanca y todas las demás partes de la flor caen, dejando el ovario al descubierto, dando inicio a la formación del fruto. Esta etapa es conocida como "pétalos caídos" (Figura 22). Si la fertilización falla, los estigmas y la corola permanecen adheridos al ovario.

La conformación y peso del polen de café hace que sea fácilmente diseminado por el viento (Polinización



Figura 20.

Ubicación de las inflorescencias del café. **a.** Nudos con botones florales en ramas plagiotrópicas; **b.** Nudo floral en brote ortotrópico: flores caulinares; **c.** Partes que componen una inflorescencia (Y: yema; Br: bráctea; Bf: botón floral; Gl: glomérulo o inflorescencia).

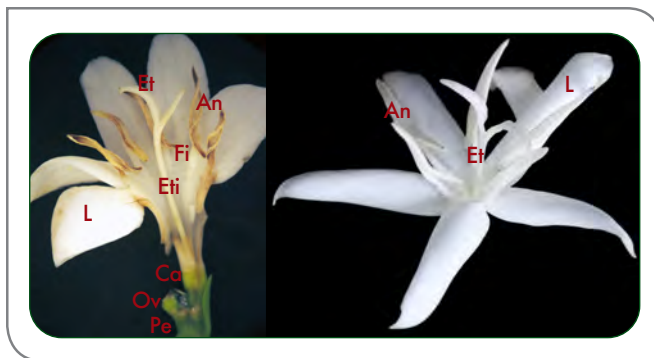


Figura 21.

Morfología de la flor del café. Pistilo (Ov: ovario, Eti: estilo y Et: estigma); Ca: cáliz; Estambre (An: antera y Fi: filamento); Pe: pedicelo; L: Lóbulo.



Figura 22.

Primeros signos de fertilización efectiva, etapa conocida como pétalos caídos. Inicio de la formación del fruto (Fr).

anemófila). El aroma dulce de las flores del café atrae una gran variedad de insectos, principalmente abejas, las cuales contribuyen al proceso de polinización (Wintgens, 2004). Se reconoce que en *C. arabica* entre el 90%-95% de la polinización es llevada a cabo con polen procedente del mismo árbol (Autopolinización). De manera contraria, *C. canephora* debe ser polinizada por

polen proveniente de otro árbol (Polinización cruzada). Pese al alto grado de autopolinización de *C. arabica*, se sugiere que un incremento en el número de visitas de insectos polinizadores, favorece el cuajamiento, relación del número de flores abiertas versus número de frutos formados, y por ende, su productividad (Free, 1993; Klein *et al.*, 2003; Vergara y Badano, 2009; Jaramillo, 2012).

Crecimiento reproductivo: Días a floración

Se considera como días a floración, el tiempo transcurrido entre la siembra y el momento en que el 50% de las plantas florecen. Este tiempo es altamente dependiente de la fecha de siembra, así como de la oferta ambiental donde se desarrolla el cultivo (Arcila *et al.*, 2007).

Todo cultivo requiere una cantidad constante de calor o energía para su crecimiento y desarrollo. Una de las maneras para medir esta energía es indirectamente mediante la suma de temperaturas dentro del rango de tolerancia del cultivo, que para el caso del café está entre 10 y 32 °C, con una temperatura óptima de 21 °C. A esta suma se le denomina unidades térmicas (Jaramillo y Guzmán, 1984).

Al analizar diferentes localidades de la geografía cafetera colombiana, se determinó que existe variación en términos de días a floración. Es así como en algunas regiones este proceso tarda 8 meses, mientras que en otras puede requerir hasta 14 meses (Figura 23) (Jaramillo, 2005; Jaramillo *et al.*, 2011).

En gran medida, esta variación puede explicarse en términos de requerimientos energéticos del cultivo. El café requiere 3.250 unidades térmicas entre la siembra de la planta en el campo, hasta su primera floración. Lo que significa que en localidades donde la temperatura promedio sea más baja, requerirán más días para acumular la energía necesaria para alcanzar el proceso de floración (Jaramillo y Guzmán, 1984).

Al relacionar distribución de la floración con diferentes altitudes, 1.100, 1.400 y 1.900 m, se encontró que a

Consideraciones prácticas

Las tasas de crecimiento del cultivo no sólo están asociadas a la temperatura, sino también al brillo solar y a los balances hídricos.

1.100 m, con una temperatura promedio de 23 °C y más horas de brillo solar, la floración y por lo tanto la cosecha, ocurrieron más temprano, comparado con cultivos desarrollados a 1.900 m y 17 °C, cuyas floraciones fueron más tardías y dispersas (Vélez *et al.*, 2000).

Factores que determinan el proceso de floración en el café

La floración del café está gobernada por una serie de factores genéticos y ambientales, que actuando de manera sinérgica desencadenan este proceso.

Factores ambientales

En el café, la floración está determinada por la sumatoria de diferentes variables ambientales. Dependiendo de la ubicación geográfica del cultivo factores tales como fotoperíodo, disponibilidad hídrica, cambios en la temperatura y radiación pueden actuar como variables dominantes en cada una de las etapas del desarrollo floral (Figura 24).

- **Brillo solar.** Existe correlación entre el brillo solar y el número de botones florales en café (Castillo y López, 1966; Jaramillo y Valencia, 1980). Lo cual indica que días con bajo brillo solar, no favorecen la formación

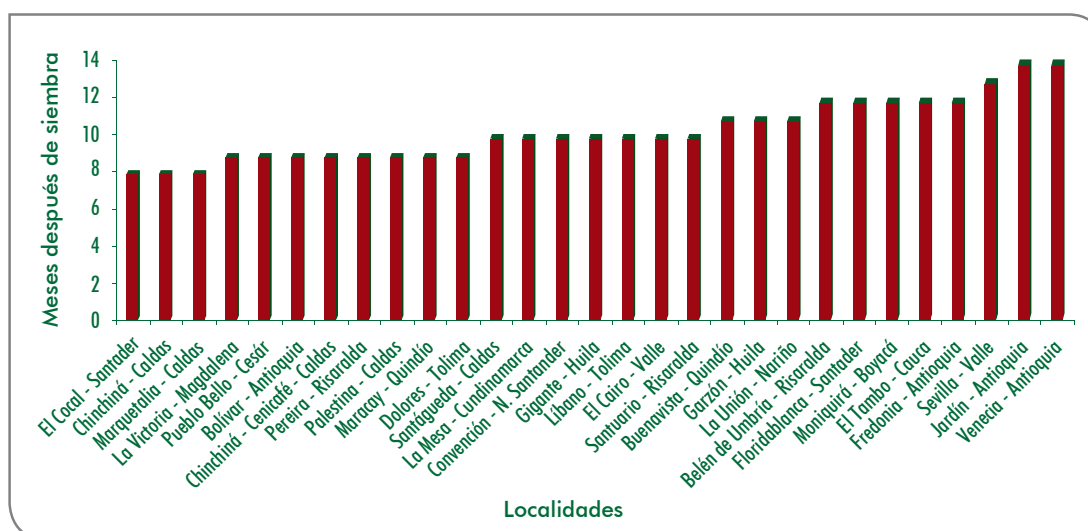


Figura 23.

Período de siembra a floración en diferentes municipios cafeteros de la geografía Colombiana.

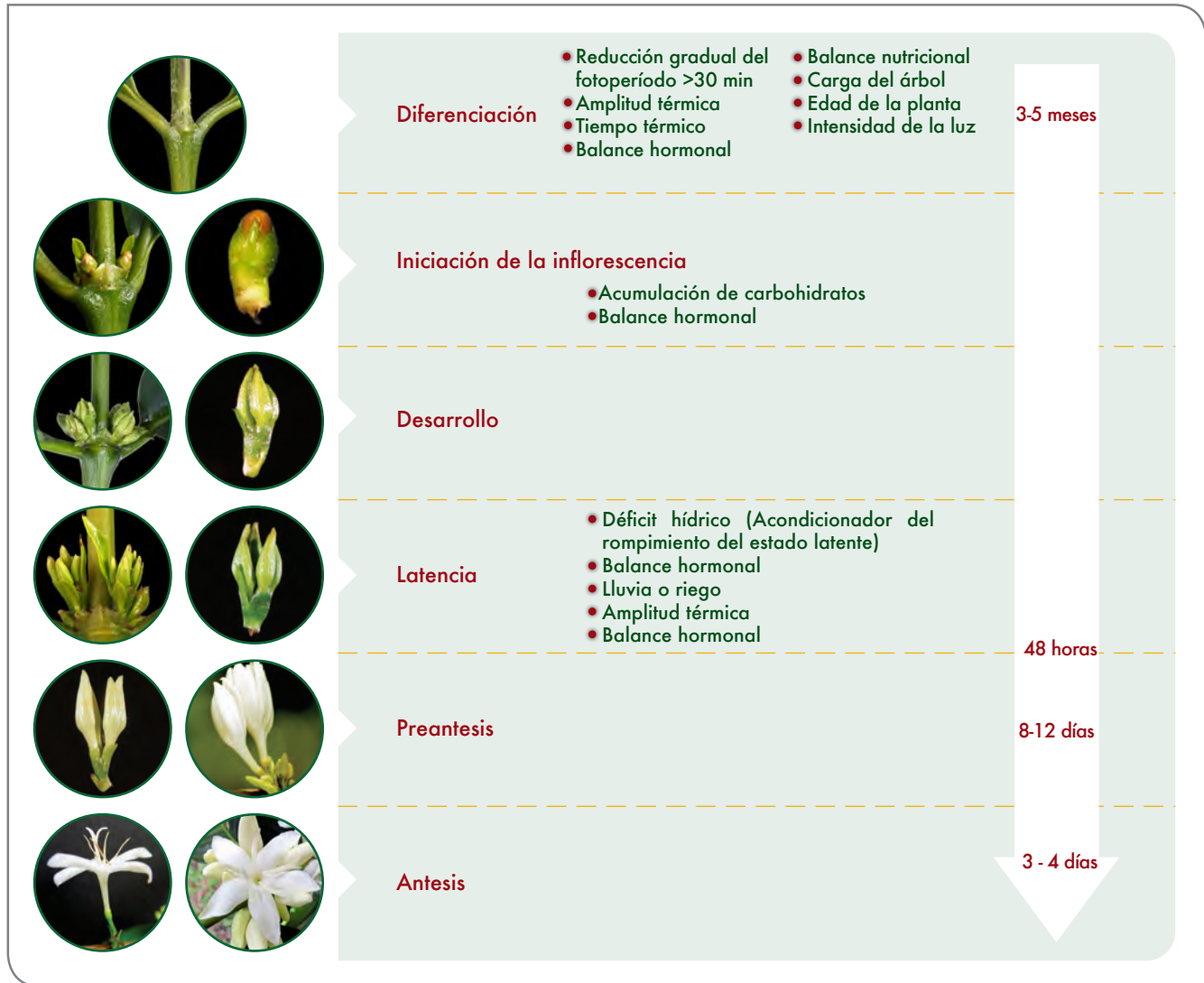


Figura 24.

Factores exógenos (Ambientales) y endógenos (De la planta) asociados a las diferentes etapas del desarrollo floral del café (Adaptado de Wormer y Guituanja, 1970; Camayo y Arcila, 1996).

de botones florales. Se estima que se requieren alrededor de 1.750 h.año⁻¹, para estimular una floración adecuada (Ramírez *et al.*, 2010). Este valor es concordante con las 1.700 h.año⁻¹ establecidas como valor a partir del cual el potencial productivo del café es considerado alto (ver capítulo de Factores climáticos que influyen en la producción del café).

- **Fotoperíodo.** Hace referencia a la duración del día, la cual depende de la época del año y de la latitud. En zonas cercanas al Ecuador (0° latitud Norte o Sur) la duración del día es igual a la de la noche. En la medida en que se aleja del Ecuador hacia el norte o hacia el sur, la longitud del día es mayor que la de la noche, en algunas épocas del año (Al inicio de la primavera hasta el inicio del otoño), y viceversa en

otras (Desde el inicio del otoño hasta el inicio de la primavera).

Se considera que el café es una planta de día corto (Franco, 1941; Piringer y Borthwick, 1955; Cannel, 1972). Lo cual significa que florece cuando la duración de la noche es superior a la del día. La zona cafetera colombiana se encuentra ubicada en la región ecuatorial (1 a 11° latitud Norte, entre los departamentos de Nariño y La Guajira). En regiones ubicadas por encima de 4,5° LN, entre el solsticio de verano y el solsticio de invierno, se observan cambios graduales en la duración del día, superiores a 30 min, lo cual favorece la floración del café (Figura 25).

- **Temperatura.** El tiempo térmico (TT), hace referencia a la cantidad constante de calor que requiere un

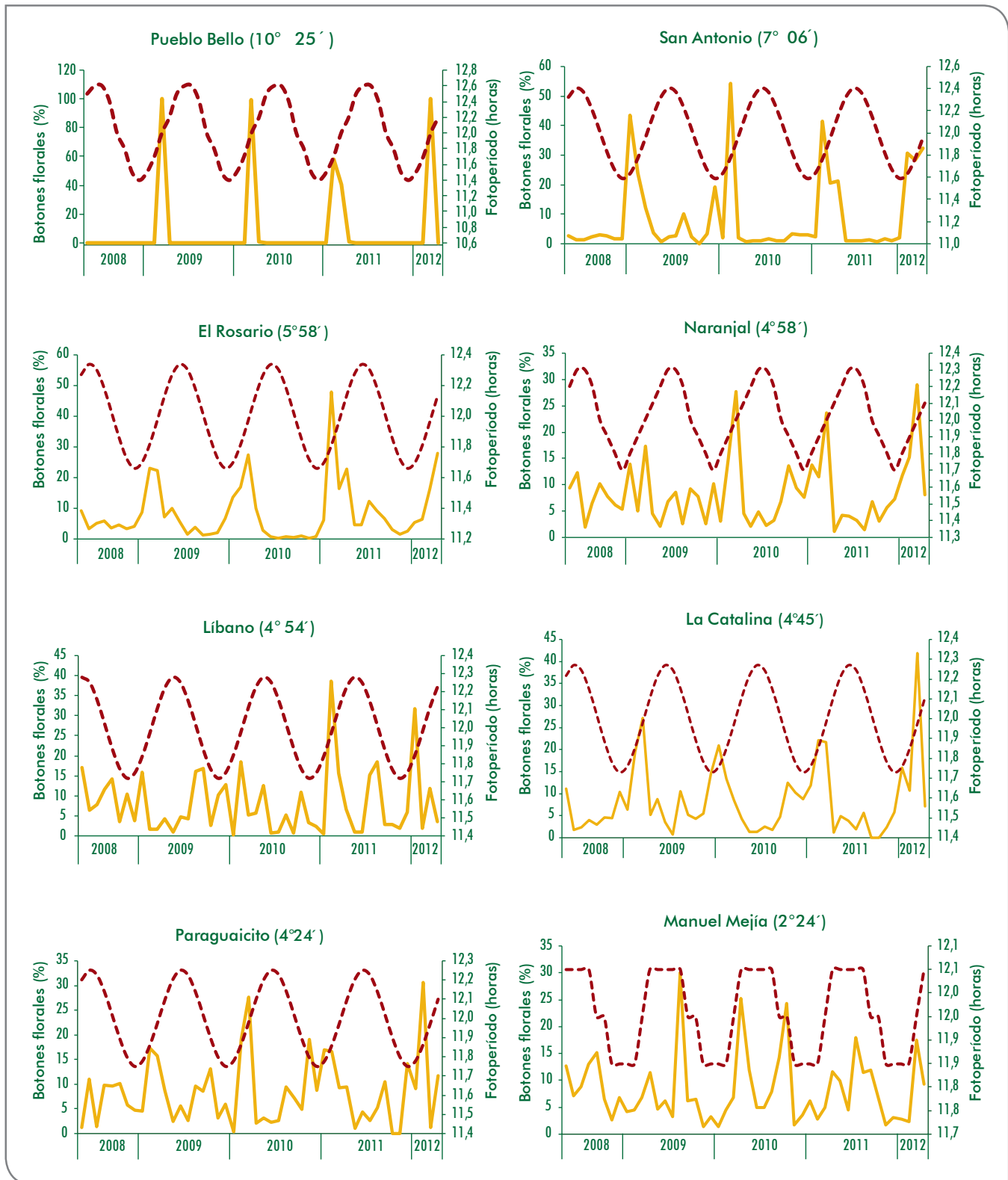


Figura 25.

Relación entre el porcentaje de floración y el fotoperíodo en función de la latitud. Línea amarilla: botones florales en estado de preantesis (BCCH-59); Línea roja punteada: fotoperíodo (Peña et al., 2011).

organismo para su crecimiento y desarrollo. La diferencia entre la temperatura máxima y mínima del día se denomina amplitud térmica (AT).

Debido a su ubicación, en la región cafetera colombiana la temperatura del aire es muy constante bajo la misma altitud. Sin embargo, en la zona andina colombiana la AT puede alcanzar 20°C, caracterizándose por disminuir cuando se asciende en altura, e incrementar en los meses secos del año con respecto a los meses húmedos (Jaramillo, 2005; Ramírez *et al.*, 2010).

El óptimo de temperatura media del aire para *C. arabica* se encuentra entre 18-22°C, y para *C. canephora* entre 22-26°C. Cuando las temperaturas son superiores a 23°C y ocurre un período seco en la época de floración, se produce aborto floral y formación de flores “estrella”. Temperaturas inferiores a 18°C promueven el crecimiento vegetativo y reducen la tasa de diferenciación floral (Jaramillo, 2005).

La temperatura, representada por la acumulación térmica o tiempo térmico y por la amplitud térmica, explica en cierta medida la floración del café. Para una floración adecuada se requieren al menos 1.100°C de temperatura y menos de 50 días con amplitud térmica inferior a 10°C por trimestre (Ramírez *et al.*, 2011). La temperatura no es limitante para la floración en localidades donde la temperatura media del aire es superior a 20°C.

- **Disponibilidad hídrica.** En la región cafetera de Colombia, los ciclos de crecimiento, floración y cosecha están sincronizados con la disponibilidad de agua en el suelo. Ésta se puede determinar mediante un sistema de contabilidad de entradas y salidas de agua, denominado **balance hídrico**. En el café, las floraciones anteceden o coinciden con la iniciación de los períodos de máximo crecimiento (Arcila, 1990). Aunque, las deficiencias hídricas favorecen la floración, pueden limitar el crecimiento vegetativo y el desarrollo normal del fruto (Arcila y Jaramillo, 2003).

Una vez los botones florales alcanzan el estado de “comino” (BBCH58), entran en un período de reposo que puede durar varias semanas. Para que este período finalice y ocurra la antesis, además de la madurez adecuada de los botones latentes, se requiere de un estrés proporcionado por períodos secos de mediana a larga duración (> 10 días), interrumpidos por una lluvia o un cambio brusco en la temperatura (Arcila y Jaramillo, 2003). Períodos secos más pronunciados tienden a concentrar floraciones.

De manera contraria, el **exceso hídrico** se relaciona negativamente con la floración del café (Ramírez *et al.*, 2011).

Factores internos

El segundo grupo de influencia sobre el desarrollo reproductivo en café está asociado a factores internos de

la planta, tales como su **carga, nivel de carbohidratos y nutrición**, entre otros. Estos factores actúan de manera sinérgica con los factores ambientales.

- **Carga del árbol.** La presencia de frutos en diferentes estados retrasa, pero no elimina, la iniciación y diferenciación floral (Wormer y Gituanja, 1970). En Colombia, como en otros países cafeteros, se observa cómo el pico de floración es precedido de una cosecha importante.

Al evaluar la dinámica del desarrollo de los botones florales del café, bajo las condiciones de Chinchiná (Caldas), se observó que en árboles en su primer ciclo productivo (Primera floración) hay una mayor tendencia a que las yemas produzcan estructuras reproductivas (Camayo y Arcila, 1996). Sugiriendo también, que es probable que el crecimiento de algunas yemas florales jóvenes se vea afectado por la transformación en frutos de las yemas más avanzadas, lo que implicaría una disminución en la actividad meristemática apical de la rama y, por consiguiente, la iniciación de producción de brotes vegetativos en vez de reproductivos (Camayo y Arcila, 1996).

Cuando un árbol sustenta una alta carga de café, sólo una pequeña proporción de los recursos de la planta estarán disponibles para soportar el nuevo crecimiento vegetativo, el cual será el sustento de la próxima floración y, por ende, de la próxima cosecha, fenómeno conocido como **bienalidad** (Wrigley, 1988; Orozco, 1995). En resumen, **la carga del árbol tiene un efecto indirecto sobre el nivel de floración, al influir sobre el tiempo y la cantidad de crecimiento vegetativo.**

- **Nivel de carbohidratos.** El nivel de carbohidratos en el árbol del café juega un rol importante en la iniciación y diferenciación floral. Se determinó que existe una estrecha correlación entre el nivel de almidón en las ramas y el porcentaje de nudos con botones florales (Barros *et al.*, 1978). El cambio en el nivel de carbohidratos en la planta está asociado con el crecimiento del árbol bajo diferentes niveles de exposición solar.

En estudios previos, se relacionó el nivel de sombrero con la formación de hojas y glomérulos en plantas de café variedad Borbón, de 18 meses, y se observó que a menor exposición a la luz solar, hay menor cantidad de hojas y menor producción de inflorescencias por nudo. Se determinó entonces, la influencia que ejerce la intensidad de la luz y la cantidad de follaje formado sobre el número de glomérulos (Castillo y López, 1966).

- **Estado nutricional del árbol y floración.** Poca información se conoce acerca de efecto que la nutrición del árbol tiene sobre la floración del café. Existen reportes contradictorios acerca de si un alto contenido de nitrógeno en las hojas tiene o no influencia sobre el número de botones florales (Snoeck, 1981).

Anormalidades en el desarrollo floral del cafeto

El desarrollo normal de la flor del cafeto puede ser alterado por factores ambientales, nutricionales o patológicos, dando como resultado diferentes tipos de anomalías (Arcila, 2004).



Flores atrofiadas. Presentan un retardo del crecimiento de la corola con respecto a las otras estructuras internas de la flor, las cuales quedan expuestas total o parcialmente. Los pétalos son más pequeños de lo normal, de color verde claro o blanco, presentado una apertura floral entre parcial y total (Arcila, 2004).



Flores estrella. Caso extremo de atrofia floral, en el que todas las partes de la flor son diminutas, de color verde claro, dando la apariencia de una estrella (Arcila, 2004). Esta anomalía se presenta en todos los genotipos, pero de manera diferencial; ocurriendo con mayor frecuencia en ciertos materiales como Mundo Novo y Catuai (Moreno y Castillo, 1996). En variedades comerciales como Típica, Borbón, Caturra y Colombia su incidencia no alcanza el 1%, por lo cual no representa importancia económica (Moreno *et al.*, 1999). La presencia de esta anomalía es el resultado de condiciones ambientales desfavorables durante etapas tempranas del desarrollo floral. La ausencia de períodos secos definidos y temperaturas por encima de 28 °C favorecen el fenómeno de la flor estrella en cafeto (Arcila, 2004).



Secamiento de flores. Esta anomalía se presenta en todas las floraciones, en yemas de 4 mm de longitud aproximadamente, denominadas "cominos". Consiste en el secamiento parcial o total de los pétalos y estambres. Puede presentarse en una sola yema o en todo el glomérulo. Al involucrar la pérdida total de la flor, su importancia económica podría ser alta. Este disturbio es favorecido por el exceso de sombra, alta humedad y alta temperatura. Bajo estas condiciones se favorece el incremento hasta niveles patogénicos de poblaciones del hongo *Colletotrichum*, habitante natural de las ramas (Arcila, 2004).



Golpe de sol o escaldado. Anormalidad favorecida por condiciones de alto brillo solar durante ciertas horas del día, lo cual ocasiona quemazones incipientes en las flores. Lesiones que son aprovechadas por *Colletotrichum*, dañando en ocasiones la totalidad del botón floral (Arcila, 2004).



Retrogresión. Algunas yemas que no se alcanzan a diferenciar en flores, forman exceso de ramas secundarias o terciarias. Esta anomalía se presenta cuando hay condiciones ambientales desfavorables para la inducción floral, tales como exceso de humedad y alta temperatura. Así mismo, se presenta cuando hay condiciones nutricionales inadecuadas como la deficiencia de cinc (Arcila, 2004).

Pérdida de la capacidad de florecer (Aneuploidía o café macho). Problema de fertilidad, en el cual una planta presenta escasa o nula formación de flores o alta formación de flores rudimentarias. Es ocasionado por un defecto en el número básico de cromosomas. Este defecto puede ser reconocido a nivel de almácigo, donde las plantas tienen hojas exageradamente alargadas. Como medida preventiva, se recomienda eliminar este tipo de materiales (Arcila, 2004).

Petalodia. Es una alteración en el desarrollo de los estambres de la flor, los cuales se transforman en estructuras parecidas a los pétalos. En estas flores se observa un número de pétalos superior a cinco y no hay estambres. Es de muy baja ocurrencia, por lo que su importancia económica es baja (Arcila, 2004).

Abscisión floral (Caída de flores). Fenómeno poco estudiado. La caída de la flor se debe a la separación de la corola del ovario o a la separación del glomérulo de la axila foliar, sin haber ocurrido la fecundación (Arcila, 2004).

Deficiencia floral. Trastorno en el cual los nudos habilitados para florecer presentan bajo número de flores. Se asocia con factores tales como exceso de sombra, alta producción en el ciclo inmediatamente anterior, secamiento de las yemas, abortos florales y plantaciones con cafetales muy jóvenes o muy viejos (Arcila, 2004).

Floración continúa. Anormalidad que se caracteriza porque las plantas florecen continuamente durante el año. Se asocia a condiciones climáticas que favorecen la inducción floral continua. Aunque es una condición aparentemente favorable para la planta, puesto que regula la formación de frutos, también puede ser desfavorable puesto que se presenta una predisposición a la pérdida de flores y se incrementa el número de recolecciones por año. Una cosecha concentrada tiende a romper el equilibrio de la planta, lo que conduce a problemas como "paloteo" (Arcila, 2004).

Consideraciones prácticas

Cafetales establecidos en regiones adecuadas, renovados y sin exceso de sombra, garantizan floraciones apropiadas.

agroecológicas, que influyen en la distribución de las floraciones y de la cosecha de café para cada región. El conocer esta distribución es importante, en la medida en que se convierte en una herramienta para la toma de decisiones relacionadas con programación de labores administrativas, prevención de problemas fitosanitarios, por ejemplo, como indicador del ataque de la broca, cálculo de la capacidad y dimensión de la infraestructura requerida para el beneficio, entre otros (Arcila et al., 1993; Alvarado y Moreno, 1999; Rendón et al., 2008).

Patrones de floración en Colombia

En Colombia, la zona cafetera se ubica entre 1 y 11° de latitud Norte, por lo que existen diferencias en el comportamiento de las variables del clima y condiciones

Con base en el cálculo de balances hídricos, que permiten determinar en qué época se presentan períodos secos marcados -fundamentales para la apertura floral del café-, se establecieron cinco patrones de floración para Colombia (Tabla 2) (Arcila et al., 1993). Dicha información, en conjunto, con el hecho de conocer la época de mayor

susceptibilidad del fruto al ataque de la broca del café, permitió establecer cronogramas de manejo para el control de este insecto plaga (Arcila et al., 1993).

A partir de 2008, Cenicafé implementó el registro sistemático de las floraciones en ocho Estaciones Experimentales, representativas de la geografía cafetera Colombiana (Rendón et al., 2008; Ramírez et al., 2011).

Los registros de floración en las Estaciones Experimentales, se realizan semanalmente en plantaciones de café Variedad Castillo®, que se encuentran en plena producción (3-4 años). En éstas se

contabiliza el número de botones florales en estado de preantesis, de seis ramas del segundo tercio del árbol. Los árboles se seleccionan siguiendo un recorrido de muestreo pre-establecido, se registran dos períodos de floración, comprendidos entre mayo – octubre, que van a dar origen a la cosecha del primer semestre del año; y entre septiembre y abril, los cuales representan la cosecha del segundo semestre (Rendón et al., 2008)⁵.

Producto de esta investigación se generaron los registros y patrones de distribución de la floración y la cosecha de café para Colombia, desde 2008 hasta la fecha (Figuras 26 y 27).

Patrón de floración	Departamento	Período principal de floración	Porcentaje de cosecha aproximado	Inicio período crítico del ataque de broca
I	Nariño, Cauca, Huila, sur del Tolima, centro y sur del Valle del Cauca (1-4° LN)	Septiembre-Octubre	90-95%	Enero
II	Norte del Valle del Cauca, Quindío, Tolima, centro y sur de Cundinamarca (4-5° LN)	Febrero-Marzo	40-60%	Junio
		Agosto-Septiembre	40-60%	Diciembre
III	Risaralda, Caldas, Antioquia, norte de Cundinamarca, Boyacá, Santander y Norte de Santander (5-8° LN)	Febrero-Marzo	75%	Junio
		Agosto-Septiembre	25%	Diciembre
IV	Cesar, Magdalena y La Guajira (>9° LN)	Marzo-Abril	90-95%	Julio
V	Plantaciones a >1.700 m de altitud	Constante	-	-

Tabla 2.

Distribución de la floración versus períodos críticos para el ataque de la broca en la región cafetera colombiana.

Consideraciones prácticas

La floración es un proceso complejo que depende de la interacción entre factores genéticos y ambientales, los cuales pueden clasificarse como: (i) Factores estimulantes y (ii) Factores acumuladores. Cambios en cualquiera de estos factores repercuten de manera directa en la distribución y magnitud de la floración.

El rompimiento de la etapa de receso o latencia de los botones florales de café está determinado por un período seco de duración moderada, interrumpido por lluvias y cambios bruscos en la temperatura a través del día (AT). De la magnitud del déficit hídrico depende la concentración o dispersión de la floración.

⁵ Rendón et al., 2008. Disciplina de Fitotecnia, Cenicafé. Proyecto FIT1530: "Monitoreo de la floración del café en diferentes localidades de la zona cafetera de Colombia.

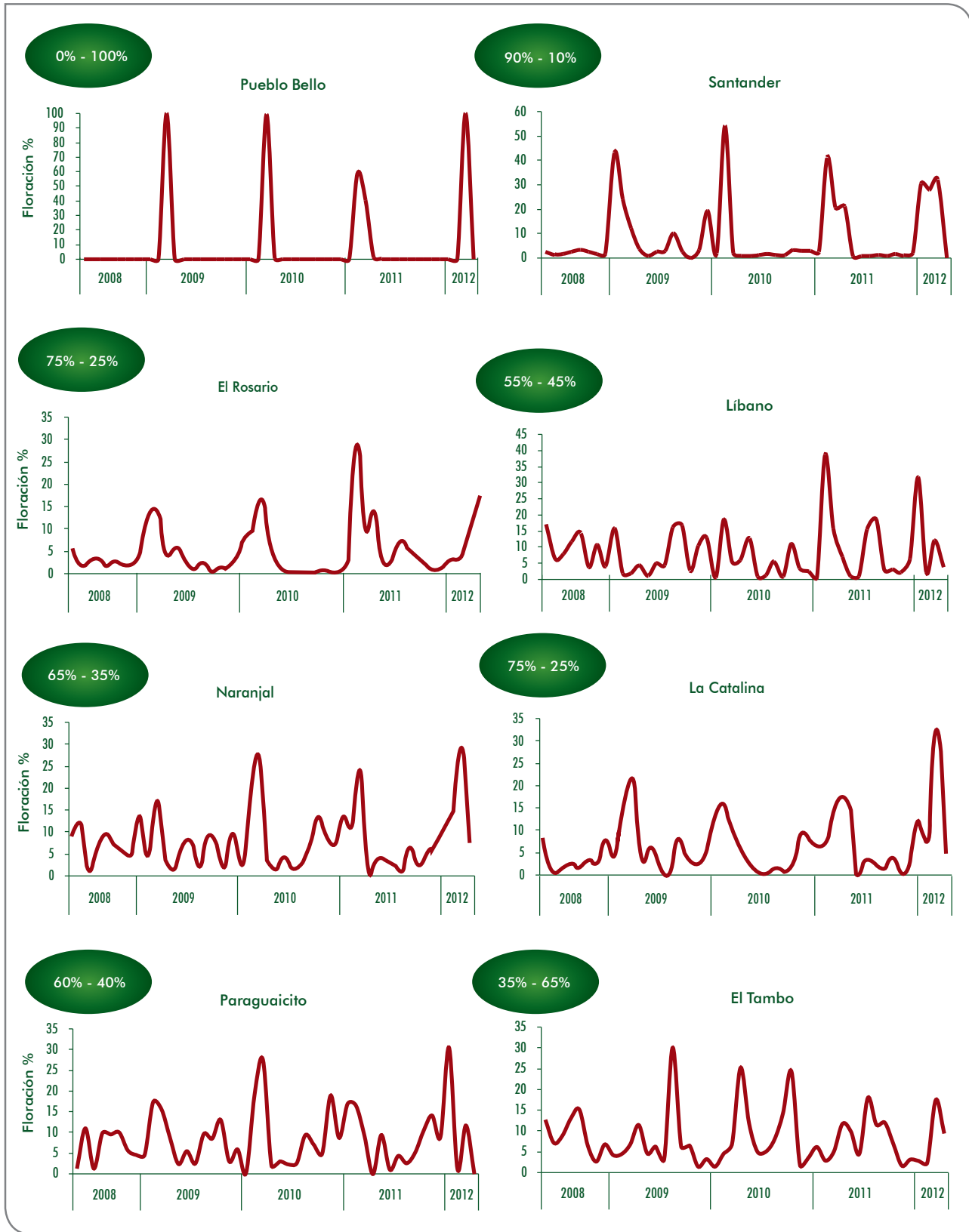


Figura 26.

Distribución de la floración por semestre (Mayo-septiembre / octubre-abril) en ocho Estaciones Experimentales de Cenicafé, distribuidas a lo largo de la Zona Cafetera Colombiana, desde 10°25' Latitud Norte (Pueblo Bello - Cesar) hasta los 2°24' Latitud Norte (El Tambo-Cauca). Los círculos denotan el porcentaje de floración correspondiente a cada semestre.

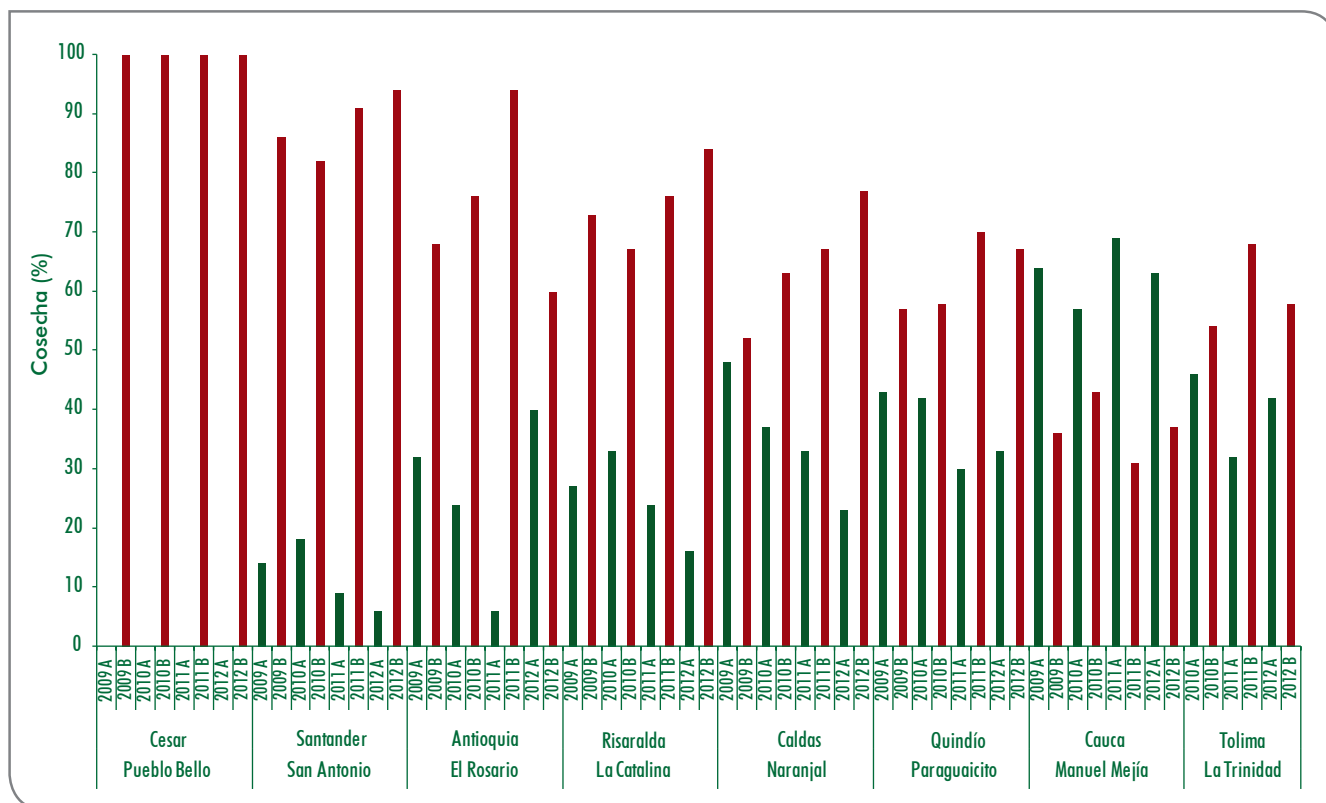


Figura 27.

Distribución porcentual de la cosecha por semestre (mayo-septiembre / octubre-abril) en ocho Estaciones Experimentales de Cenicafé, ubicadas en la Zona Cafetera Colombiana, desde los 10° 25' L Norte (Pueblo Bello - Cesar) hasta los 2° 24' L Norte (El Tambo-Cauca).

El fruto

La importancia biológica del fruto radica en que éste contiene las semillas que permiten la perpetuación de la especie.

El fruto es una drupa globular u ovoide de peciolo corto. Tiene una longitud y un diámetro de 10 a 15 mm y de 11,5 a 14,5 mm, respectivamente, y se le denomina cereza.

Etapas de desarrollo del fruto

En el desarrollo del fruto del cafeto se pueden distinguir cinco etapas (Arcila y Jaramillo, 2003) (Figura 28):

Primera etapa: Comienza una vez el óvulo es fertilizado. El crecimiento del ovario es muy lento, es una etapa donde hay muy poco crecimiento en tamaño y peso

del fruto. Tiene una duración de 7 semanas (0 - 49 Días Después de Floración - DDF).

Segunda etapa: En esta etapa el fruto crece rápidamente en peso y volumen, con altos requerimientos de agua. De presentarse oferta hídrica limitada hay secamiento, caída y presencia de granos negros. También es denominada como la etapa de formación del grano lechoso. Presenta una duración de 10 semanas (50 - 119 DDF).

Tercera etapa: El crecimiento del fruto es casi imperceptible. Esta etapa se caracteriza porque el fruto presenta una alta demanda de nutrientes, se endurece la almendra y si falta agua, el fruto no termina de formarse bien y se produce el grano conocido como averanado. Tiene una duración de 9 semanas (120 - 182 DDF).

Cuarta etapa: El endospermo llena el grano entero y es la época de maduración o cambio de color del fruto. Esta etapa tiene una duración de 6 semanas (183 - 224 DDF).

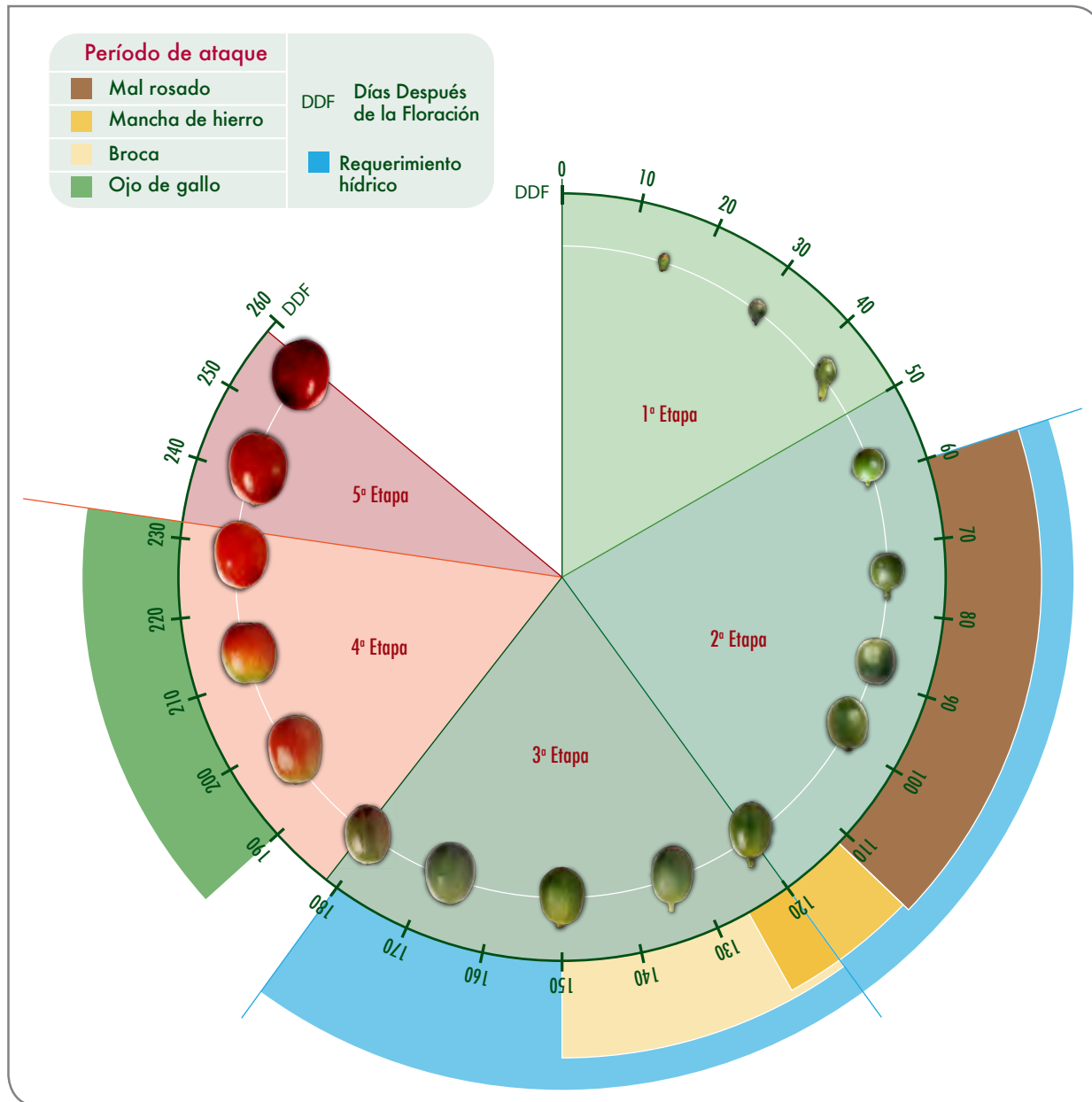


Figura 28.

Etapas de desarrollo del fruto de café y épocas de mayor susceptibilidad del fruto a diferentes factores bióticos y abióticos.

Quinta etapa: Posterior al momento ideal de recolección, el fruto se sobremadura tornándose de un color violeta oscuro y finalmente se seca. En esta etapa generalmente el fruto pierde peso (> 225 DDF).

(180 días) y en Venecia-Antioquia la mayor duración (330 días) (Arcila *et al.*, 2007; Jaramillo *et al.*, 2011) (Figura 29).

Desde el momento de la floración hasta la maduración, el desarrollo del fruto tarda entre 180 a 330 días en promedio, dependiendo de la variedad y de la oferta ambiental donde se encuentre el cultivo. Es así como en El Cocal-Santander, se presenta el período más corto

Estructura del fruto

El fruto tiene un **pedicelo** (Estructura que une el fruto con el tallo) que estructuralmente tiene la misma conformación del tallo. La parte del fruto del café



Figura 29.

Números de días entre la floración y la maduración del fruto de café, en diferentes zonas cafeteras de Colombia (Arcila y Jaramillo 2003).

conocida como **pulpa**, está formada por el **pericarpio**, el cual a su vez está conformado por el **exocarpio** o **epidermis** y el **mesocarpio** (Figura 30).

A medida que el fruto alcanza su madurez, el **pericarpio** sufre una serie de transformaciones químicas (Aumento del contenido de agua, azúcares y taninos) y estructurales (Alteraciones en la forma, tamaño, engrosamiento y lignificación de las paredes celulares). Con el aumento

de la lignificación de las paredes celulares ocurre una reducción gradual en el contenido de agua y azúcares (Federacafé, 2008). El **exocarpio** es una estructura con estomas, formado de una sola capa discontinua de células deformes, de paredes gruesas y cutinizadas.

En el **mesocarpio** las capas más externas están formadas por células grandes, poligonales y de paredes lignificadas y gruesas, con vestigios de protoplastos en su interior. Entre las células del mesocarpio aparecen haces vasculares constituidos por fibras y traqueidas de paredes gruesas (Salazar *et al.*, 1994).

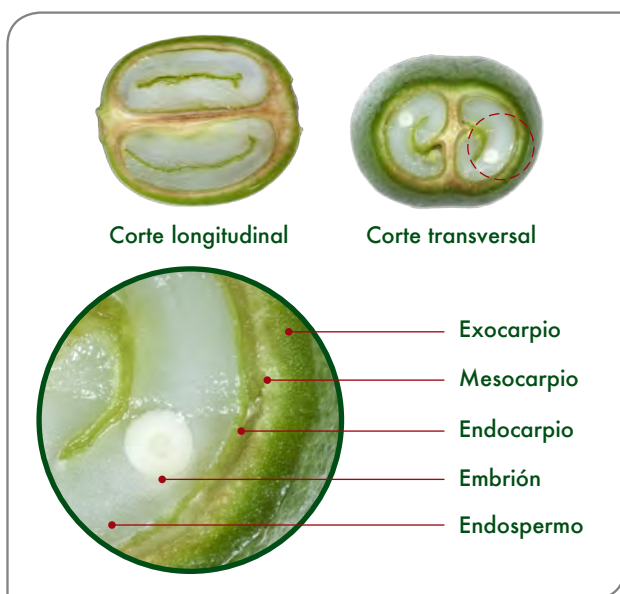


Figura 30.

Estructura del fruto del café.

En el fruto bien desarrollado, el **endocarpio** formará finalmente el **pergamino de la semilla**, el cual es blanco y de 0,1 mm de espesor, flexible y resistente (León y Fournier, 1962). El pergamino está formado por fibras de paredes gruesas, de lumen muy reducido, fusiformes, unidas compactamente entre sí, lo cual le confiere al endocarpio una gran resistencia (Federacafé, 2008).

El fruto es verde en sus primeras etapas de desarrollo, fundamentalmente por el contenido de clorofilas totales (Hasta 0,7 mg clorofila por gramo de peso fresco de pericarpio). La clorofila y los estomas del pericarpio hacen que el fruto sea fotosintéticamente funcional, así, el 30% de la materia seca de la semilla proviene de la actividad fotosintética del fruto (Cannell, 1971). En la variedad Caturra, el 33% de los asimilados almacenados en el grano provienen de la actividad fotosintética realizada en el pericarpio. A medida que el fruto alcanza su madurez, el contenido de clorofila total disminuye gradualmente hasta desaparecer en frutos de 30 semanas después de la floración (Ocampo 2003; Ocampo *et al.*, 2010). De manera contraria, el contenido de antocianinas, particularmente cianidina (Responsable del color rojo

del fruto) aumenta significativamente durante la cuarta etapa del desarrollo ($0,047 \text{ mg.g}^{-1}$ de peso fresco de pericarpio) (Salazar, 1993).

Composición química del fruto

Los azúcares sintetizados, tanto los enviados desde las hojas hacia los frutos, como los fabricados por la fotosíntesis del fruto, son fundamentales para su crecimiento y desarrollo. Al analizar la dinámica de los azúcares metabolizados en frutos entre 8 y 24 semanas después de la floración, se observa que la glucosa está presente en mayor medida durante el desarrollo del fruto, seguido por fructosa y sacarosa (Ortiz, 2003; Gómez, 2012) (Figura 31).

El fruto también presenta compuestos lipídicos tipo hidrocarburos y ácidos grasos libres, identificándose

en mayor cantidad los ácidos grasos libres, tipo ácido palmítico, oleico, linoleico y esteárico. Estos ácidos aportan energía al organismo y son imprescindibles para otras funciones como la absorción de vitaminas liposolubles, la síntesis de hormonas, pared celular y lipoproteínas de órganos internos. El comportamiento de los ácidos grasos totales (Sumatoria de los ácidos palmítico, oleico, linoleico y esteárico) está directamente relacionado con el desarrollo del fruto (Figura 32). La tasa de acumulación de ácidos grasos totales en frutos a partir de 196 DDF es menor, debido a que éste es maduro fisiológicamente y sus reservas son mínimas (Ortiz, 2003).

El pericarpio está compuesto en un 45% de ácidos grasos insaturados y un 55% de ácidos grasos saturados, siendo el compuesto α -Linoléico el más abundante y diferenciador entre la semilla y fruto completo (Ortiz, 2003).

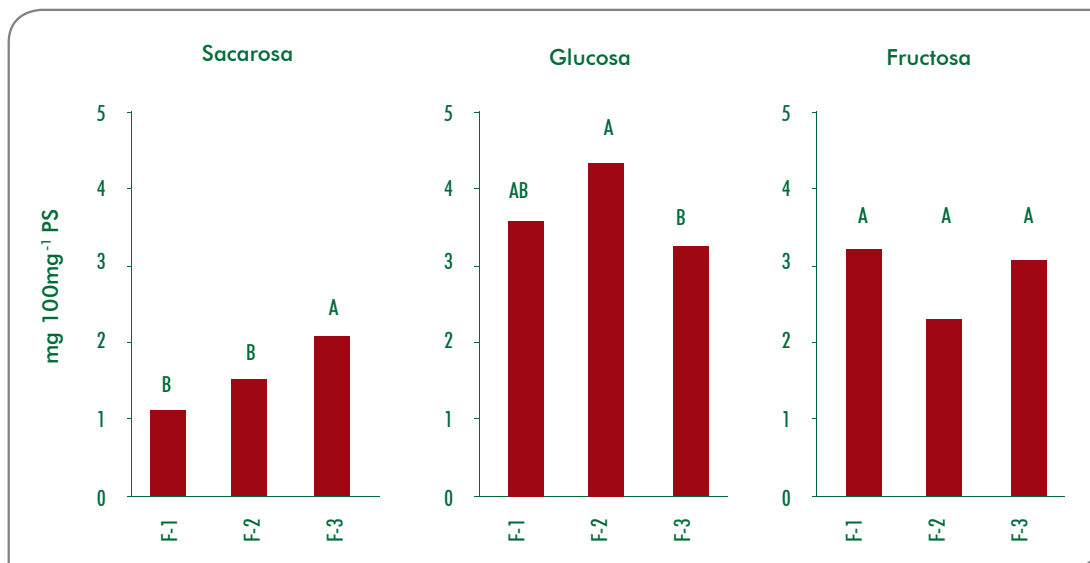


Figura 31.

Comportamiento de los azúcares en el desarrollo del fruto de café (Gómez, 2012).

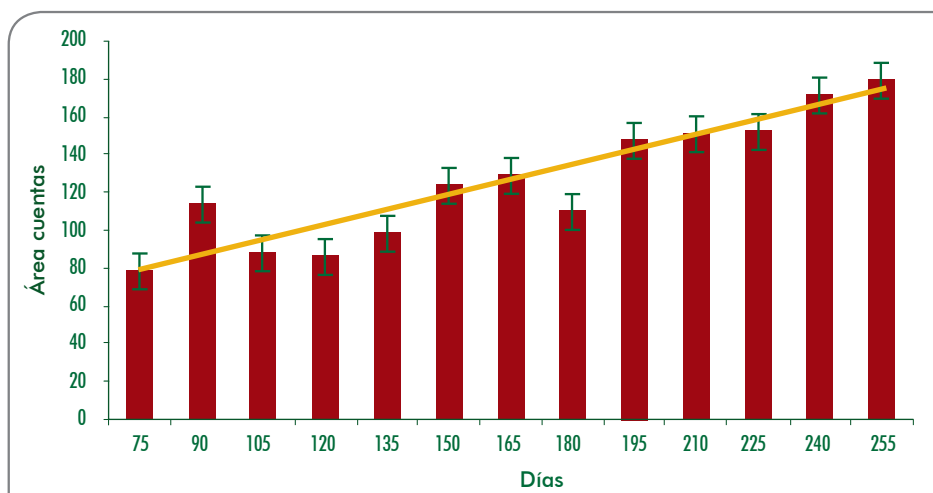


Figura 32.

Comportamiento de los ácidos grasos totales en el desarrollo del fruto de café (Ortiz, 2003).

La acidez titulable es menor en el estado verde (26 semanas después de la floración) que en los estados maduros (31 semanas después de la floración), siendo en este último cuatro veces mayor. Los sólidos solubles totales expresados como grados Brix se incrementan con el grado de madurez del fruto (Marín et al., 2003).

Los compuestos volátiles del fruto de café en diferentes estados fisiológicos de madurez están controlados por altos niveles de alcoholes, principalmente etanol (Ortiz et al., 2004). Exceptuando los alcoholes, los volátiles que están presentes en mayor proporción en el café cereza maduro (31 semanas después de la floración) son las cetonas, seguidos por los aldehídos, ésteres y furanos (Figura 33) (Ortiz et al., 2004).

Es importante conocer los compuestos volátiles del fruto de café en la medida en que éstos sirven como atrayentes de insectos plaga como la broca del cafeto, y para su utilización en mezcla como trampas para el control de este insecto.

Los aldehídos y cetonas son grupos de compuestos que se expresan más en estados avanzados de madurez del fruto, relacionados con el aroma y la calidad del café.

Factores que afectan el crecimiento del fruto

Existen numerosos factores bióticos y abióticos que influyen en el desarrollo normal del fruto, ocasionando diversos niveles de pérdida en la producción esperada del cultivo.

Entre los **factores bióticos** se destacan:

Broca del fruto del café: *Hypothenemus hampei*.

Los frutos empiezan a ser susceptibles al ataque entre las 17 y 21 semanas después de la floración (120 - 150 DDF) (Salazar et al., 1993; Ruiz, 1996).

Mancha de hierro. Los frutos son más susceptibles entre las semanas 16 y 18 después de la floración (112 - 126 DDF) (Leguizamón, 1997).

Mal rosado. Los frutos en las primeras etapas de formación (60 - 112 DDF) son los más susceptibles a la enfermedad (Galvis, 2002).

Enfermedad de las cerezas del café (CBD). Esta enfermedad es ocasionada por *Colletotrichum kahawae*, hongo que ocasiona graves daños en frutos de diferentes estados de desarrollo. En Colombia no hay presencia de esta enfermedad. Sin embargo, *Colletotrichum* spp, habitante natural de ramas, hojas y frutos de café, bajo condiciones ambientales favorables, tales como alta humedad y temperatura puede convertirse en patogénico y afectar los frutos –entre otros órganos del cafeto- (Gil, 2001).

Ojo de Gallo o gotera. Afecta a los frutos verdes (190 DDF), pintones (207 DDF) y maduros (232 DDF) (Rivillas y Castro, 2011).

Entre los **factores abióticos** se destaca el requerimiento hídrico del fruto, donde el índice de humedad del suelo (IHS) juega un papel primordial y su efecto varía de acuerdo con la etapa del desarrollo en que se encuentra.

- En la primera etapa se caracteriza por no influir la presencia o ausencia de lluvia, sin embargo, una deficiencia hídrica severa en esta etapa causa un

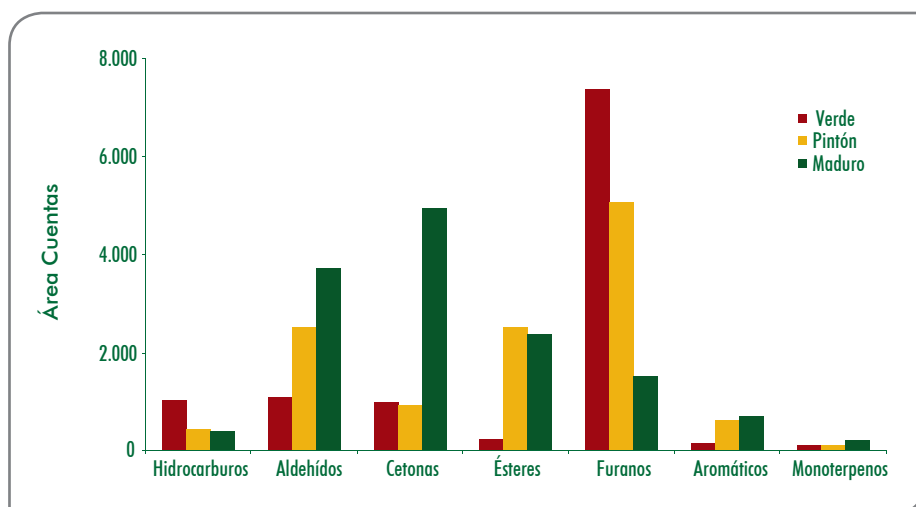


Figura 33.

Comportamiento de hidrocarburos, aldehídos, cetonas, ésteres, furanos, aromáticos y monoterpenos en tres estados de maduración.

secamiento de frutos tiernos (Figura 34d) (Valencia y Arcila, 1975; Arcila y Jaramillo, 2003).

- En la segunda y tercera etapas de desarrollo, una deficiencia hídrica, baja humedad relativa y grandes oscilaciones de temperatura, producen un desequilibrio bioquímico en la formación de carbohidratos en la planta, ocasionando los llamados granos negros (Valencia, 1972). Así mismo, puede tener diferentes efectos como son grano vacío (Flotantes), grano parcialmente formado (Figura 34b) y grano pequeño.
- En la cuarta etapa, la deficiencia hídrica no presenta efectos severos, ya que el fruto se encuentra completamente desarrollado. Sólo en casos extremos la maduración se retarda y ocurre el secamiento de la pulpa. En esta etapa se da la transformación de almidones en azúcares (Sacarosa, glucosa y fructosa) y cambio de color del fruto (Suárez, 1975; Arcila y Jaramillo, 2003).

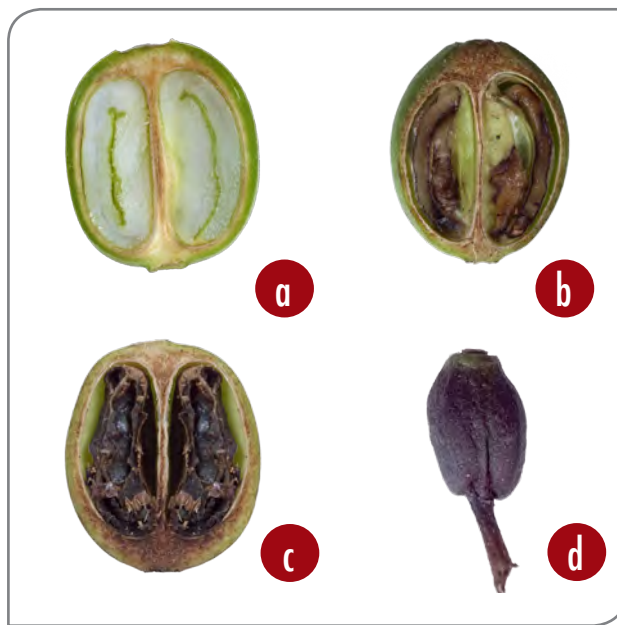


Figura 34.

Daños ocasionados al fruto por deficiencia hídrica:
a. Fruto normal; **b.** Fruto con llenado parcial; **c.** Grano negro;
d. Secamiento de frutos tiernos (Arcila y Jaramillo, 2003).

Consideraciones prácticas

Deficiencias hídricas entre las semanas 7 y 14 después de la floración impactarán el tamaño del fruto. Si el déficit hídrico ocurre entre las semanas 15 y 25 se producen granos vanos o defectuosos por insuficiente llenado de la almendra. Los excesos hídricos no tienen efecto particular sobre el crecimiento y desarrollo del fruto.

Si se recolectan frutos en diferentes estados de madurez se deteriora la calidad del café. La mejor calidad en taza se alcanza al recolectar los frutos maduros (217 DDF).

Pilares del metabolismo vegetal. Intercambio gaseoso: Fotosíntesis- respiración

La relación que mide la eficiencia del sistema a través del peso de los frutos producidos por la planta y el peso total de la misma, se conoce como Índice de Cosecha (IC). Éste se encuentra directamente relacionado con la productividad del cultivo, y se inicia en los procesos

de intercambio de gases (fotosíntesis, respiración, transpiración). Por ello, además de entender a profundidad estos procesos, es necesario comprender cómo se distribuyen los asimilados entre los órganos fuente (productor de fotoasimilados, como las hojas) y vertedero (consumidor de los fotoasimilados, como flores, frutos y raíces, entre otros).

Conceptos

- El proceso a través del cual a partir de CO_2 se fabrican azúcares y carbohidratos para el crecimiento y desarrollo de las plantas es la **“fotosíntesis”**. En la **“respiración”** se utiliza parte de los carbohidratos formados en el proceso fotosintético como sustrato para formar moléculas más simples. Tales procesos son el pilar fundamental del metabolismo vegetal (Azcon-Bieto y Talon, 1993).
- En la fotosíntesis las plantas utilizan la energía del sol, el agua y el CO_2 para liberar oxígeno al ambiente, y construir azúcares y otros compuestos carbonados que hacen parte del metabolismo. Este proceso responde en un 95% por la producción de biomasa que se distribuye en órganos de captación y transformación de energía (Hojas), soporte (Tallos, ramas y raíces) y en los órganos de interés económico (Frutos) (DaMatta y Rodríguez, 2005).

Fotosíntesis en hojas individuales y plantas completas de café

La **fotosíntesis** así como otros procesos relacionados con el intercambio gaseoso entre la planta y el ambiente (CO_2 , oxígeno y vapor de agua), son determinantes en la producción y productividad del cultivo del café.

Para entender cómo los procesos de **fotosíntesis**, **transpiración** y el **uso del agua**, son afectados por las variables climáticas, se realizaron estudios con las hojas individuales y con la fronda total de plantas de las variedades Caturra y Colombia. Las hojas que se encuentran más expuestas a la luz directa del sol, en días de alta radiación, no sólo disminuyen la fotosíntesis al medio día, sino que pueden llegar a respirar, mientras que las hojas del interior de la fronda continúan su proceso fotosintético adecuadamente (Figura 35) (López et al., 1999; Gómez et al., 2005). Por lo anterior, el balance del intercambio gaseoso de todo el follaje bajo elevadas condiciones de radiación solar, como sería el caso de cultivos a plena exposición es positivo, lo cual permite la acumulación de carbono en los tejidos, y el crecimiento y desarrollo de las plantas (Gómez, 2000).

Experimentos tanto para hojas individuales como para la planta completa, permitieron establecer que la radiación fotosintéticamente activa y la temperatura óptimas para el proceso fotosintético en las hojas de café son 300-600 $\mu\text{moles}_{\text{(fotones)}} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (al sol y a la sombra, respectivamente) y 25-27 °C (López et al., 1999; Gómez et al., 2005).

El sistema de medición de intercambio gaseoso diseñado por Cenicafé (Figura 36) permitió obtener información inicial que apuntó a calcular el balance de carbono para plantas completas de café (Gómez, 2000; Gómez y Riaño, 2001), lo que se tradujo en los primeros datos de captura de CO_2 por el cultivo del café en Colombia, a través del sistema **CREFT**® (Crecimiento y captura de CO_2 en especies forestales tropicales) (Riaño et al., 2005).

Agua y fotosíntesis en el cafeto. El agua participa en todos los procesos del metabolismo vegetal, desde el suministro de electrones para la conversión de la energía luminosa en energía química, con liberación de oxígeno (fotosíntesis), hasta complicadas reacciones de regulación genética en la célula, lo que la hace igual de determinante en otros procesos como respiración, transpiración, absorción y transporte de nutrientes, y distribución de asimilados, entre otros.

Consideraciones prácticas

La fotosíntesis de una hoja es un buen indicador de la fotosíntesis de la planta completa de café, cuando se utilizan modelos matemáticos para escalar de la hoja a la planta entera (Gómez, 2000).

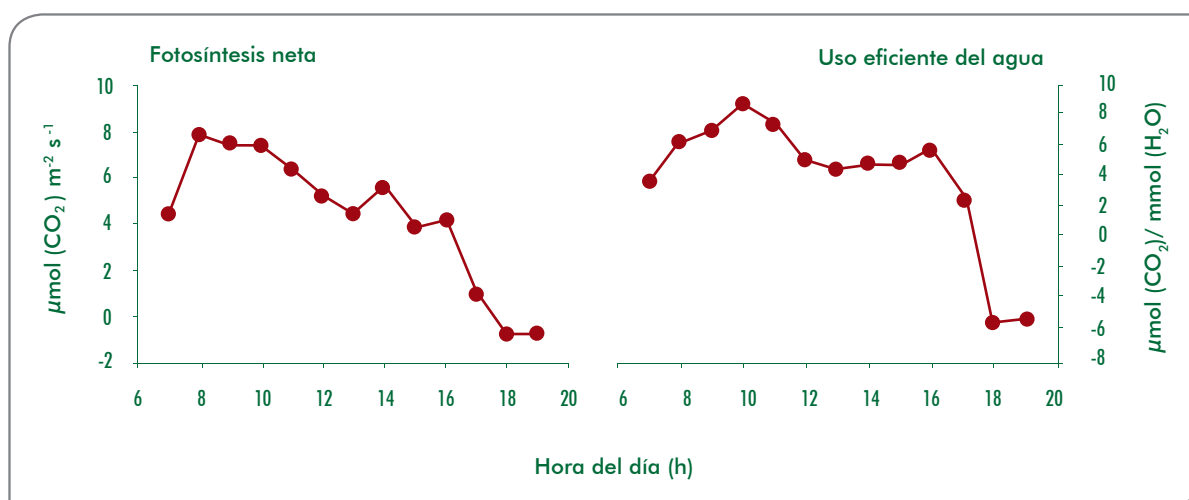


Figura 35.

Curvas diarias de fotosíntesis neta y uso eficiente del agua en hojas individuales de variedad Colombia en el campo (López et al., 1999).



Figura 36.

Sistema para la medición de intercambio gaseoso diseñado por Cenicafé (Gómez y Riaño, 2001).

La respuesta fotosintética de plantas de café difiere dependiendo del nivel de humedad en el suelo. En estudios realizados en Chinchiná (Caldas), se determinó que la planta alcanza su máxima capacidad fotosintética en suelos al 32% de humedad volumétrica, mientras que a valores superiores o inferiores, la asimilación de CO₂ fue menor. Particularmente, para valores superiores al 45% o inferiores al 15% de humedad en el suelo, la planta interrumpe su proceso fotosintético, deteniendo su crecimiento y desarrollo (Figura 37). El punto de marchitez permanente o punto en el que la planta no se recupera por falta de agua y muere, está por debajo del 10% de humedad. En términos generales, se observó que la planta de café responde mejor a condiciones de déficit que a exceso de agua en el suelo (Cano, 2000; Gómez, 2000).

Igualmente, se observó que días secos, con baja humedad ambiental (± 40 -50%), acompañados de baja humedad en el suelo, afectan el potencial hídrico de la hoja y, por ende, el flujo de CO₂ y vapor de agua, entre ésta y el ambiente, lo que tiene incidencia en el crecimiento y acumulación de biomasa en la planta de café (Cano, 2000).

La cantidad de agua presente en el suelo entre capacidad de campo y saturación, que es donde los espacios porosos carecen de aire, afecta el movimiento del agua en la planta ante la ausencia de oxígeno, influyendo negativamente en el metabolismo bioquímico, siendo una de las razones por las cuales temporadas con precipitaciones superiores a las normales (Fenómeno de La Niña) afectan el cultivo (Cano, 2000).

Efecto de la altitud en el intercambio gaseoso. La zona cafetera colombiana está distribuida altitudinalmente entre los 1.000 y 2.000 m, con el mayor porcentaje de área sembrada (89%) por debajo de 1.800 m (SIC@, 2012)⁶.

Al evaluar el comportamiento del intercambio gaseoso de la hoja del café variedad Colombia, en tres altitudes: 1.100, 1.400 y 1.900 m, se observó que la oferta de radiación fotosintéticamente activa, la temperatura del aire y el déficit de presión de vapor favorecen una mayor fotosíntesis neta a 1.900 m.s.n.m ($5 \mu\text{mol}_{(\text{CO}_2)} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), comparada con la registrada a 1.400 y 1.100 ($4,5 \mu\text{mol}_{(\text{CO}_2)} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y $4,1 \mu\text{mol}_{(\text{CO}_2)} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ respectivamente) (López, 2004). Así, en días con radiación y temperaturas moderadas y déficit de presión de vapor bajo, las tasas de fotosíntesis son mayores.

Consideraciones prácticas

Si bien, se obtienen mejores tasas de asimilación a 1.900 m.s.n.m., se registran mayores producciones e índice de cosecha a menores altitudes (1.400 y 1.100 m), lo que significa que el mayor ingreso de CO₂ a la planta no garantiza una mayor producción o productividad, por lo que es necesario profundizar en el estudio de su distribución o relación fuente-vertedero.

Efecto del intercambio gaseoso en hojas y plantas bajo sombra. En Colombia, el café se cultiva tanto a plena exposición solar como bajo diferentes tipos y cantidades de cobertura arbórea, dependiendo de la zona. Es así como de las 920.000 hectáreas en café, cerca del 50% se cultiva bajo algún tipo de sombrío.

La fronda de los árboles afecta negativamente la cantidad y calidad de luz disponible para el cultivo (Farfán, 2007), incidiendo directamente en las tasas de fotosíntesis, respiración y transpiración, lo que influye en la cantidad, pero no en la calidad del café producido.

En hojas individuales jóvenes y maduras de café variedad Colombia, se encontró que niveles de sombrío hasta del 25% no afectan el comportamiento fotosintético.

⁶ Federación Nacional de Cafeteros. 2011. Sistema de Información Cafetera - FNC, SIC@.

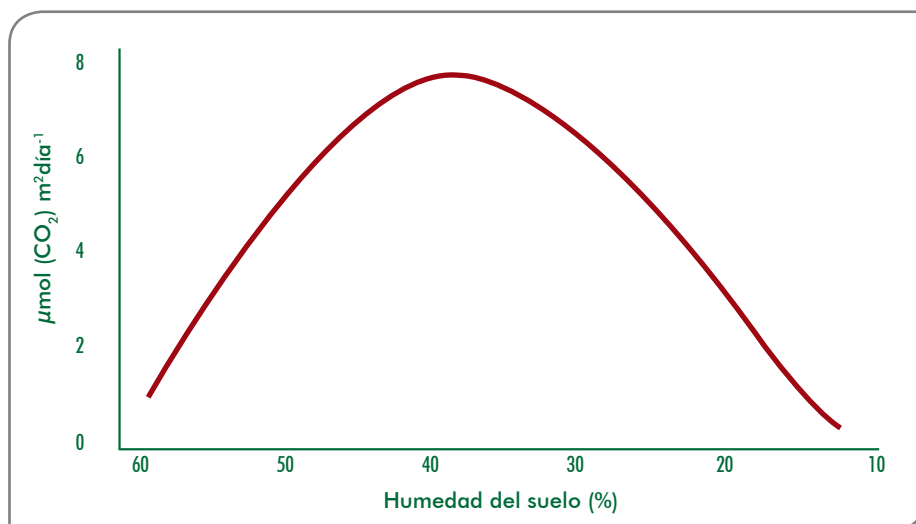


Figura 37.

Efecto de la humedad del suelo sobre la fotosíntesis en hojas individuales de plantas de variedad Colombia, de 11 meses de edad (Cano, 2000; Gómez, 2000).

Al incrementar el sombrío hasta niveles superiores al 30%, la fotosíntesis disminuyó, llegando con el 70% de sombrío a valores de fotosíntesis equivalentes al 60% de los obtenidos en cafetales a libre exposición (Tabla 3) (Cadavid et al., 1998).

En plantas completas de variedad Caturra de 12 meses de edad, se midió el intercambio gaseoso encontrando que hasta el 58% de sombrío la fotosíntesis fue similar a libre exposición solar, siendo éste el punto a partir del cual la fotosíntesis empieza a caer. Sobresalió el hecho que con niveles de sombrío del 58% la asimilación de CO₂ tuviera valores altos. Bajo esos niveles las condiciones de microclima en el interior del dosel pudieron favorecer el ingreso de CO₂ al aparato bioquímico y fotosintético, pues el café es originario de condiciones de semi-sombra, y el mutuo sombrío del follaje, así como el generado artificialmente, lo favorecieron (Gómez, 2005).

Las plantas a plena exposición solar mostraron mayor número de nudos, entrenudos más cortos y hojas más pequeñas que aquellas a la sombra. Una mayor temperatura incide en los procesos bioquímicos de la planta, y por lo tanto en la tasa de crecimiento y desarrollo. Bajo sombrío, la planta busca mayor captación

de luz, invirtiendo más energía en ese proceso, lo que se reflejó en entrenudos más largos y mayor lámina foliar, generando así un desbalance en la relación fuente-vertedero (Cadavid et al., 1998).

Efecto de la roya del café en el proceso de fotosíntesis.

La roya del café (*Hemileia vastatrix*) es un parásito obligado, es decir, que para sobrevivir debe permanecer en tejidos vivos, interfiriendo en los procesos relacionados con el flujo del carbono y, en consecuencia, afectando la producción. Las hojas, órganos donde se realiza el proceso fotosintético, son también los sitios de ataque del microorganismo y a través de los estomas, donde se intercambia CO₂ y H₂O con el ambiente, las estructuras del hongo penetran hasta llegar a las células y producir la infección (Arango, 2000).

La fotosíntesis es afectada negativamente en hojas y plantas completas de variedad Caturra infectadas por roya. Dichos efectos son mayores durante la penetración y esporulación del hongo y son directamente proporcionales a la magnitud del área foliar enferma. Esto significa que a mayor área atacada por el hongo, mayor daño al aparato fotosintético de la planta (Arango, 2000).

Sombrío (%)	RFA [$\mu\text{mol}_{(\text{fotones})} \text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$]	Fotosíntesis mol(CO ₂)m ⁻² día ⁻¹	Reducción fotosintética (%)
0	8.551	35,8	0
25	6.413	30,7	14,2
48	4.446	21,9	38,9
69	2.651	21,7	39,4

Tabla 3.

Radiación fotosintéticamente activa (RFA), fotosíntesis diaria y porcentaje de reducción fotosintética, en respuesta a diferentes niveles de sombrío (Cadavid et al., 1998).

Si la severidad del ataque del hongo es superior al 25%, las tasas fotosintética y respiratoria son afectadas drásticamente, generando un desbalance en la distribución de asimilados y en la acumulación de biomasa, y además, el contenido de clorofila (Molécula encargada de dar inicio al proceso fotosintético) en los tejidos enfermos, se reduce notablemente (Arango, 2000).

Consideraciones prácticas

La productividad de la planta de café bajo sombra depende tanto de la actividad fotosintética como de la capacidad de interceptación de la luz, ligada a cambios en la arquitectura del dosel, así como en el nivel de sombrero (Cadavid et al., 1998). Sin embargo, aún quedan muchos interrogantes por resolver sobre el sombrero y la respuesta fisiológica de las plantas de café.

Al progresar la enfermedad, la actividad de las enzimas Rubisco, PEP-C y Sacarosa Sintetasa y compuestos como el fósforo inorgánico, claves en el proceso fotosintético, disminuyen. Así mismo, la planta gasta energía en la reconstrucción de las membranas y paredes celulares afectadas, a través de la síntesis elevada y anormal de fosfolípidos (Arango, 2000).

Fotosíntesis en frutos

En diferentes especies vegetales se determinó que hasta un 30% del crecimiento y acumulación de materia seca en los frutos, depende del proceso fotosintético de los mismos (Berishvili y Berishvili, 1996; Sweetman et al., 2009). Durante la mayor parte del desarrollo del fruto de café se observan los organelos necesarios para realizar el proceso fotosintético (Estomas, cloroplastos y clorofilas, principalmente) (Mosquera et al., 1997), así como las enzimas fundamentales para el proceso fotosintético como son la Rubisco y la PEP-C, cuya presencia simultánea ha sido reportada en diferentes especies (Sweetman et al., 2009). La Rubisco es característica de especies C_3 y la PEP-C de especies C_4 , siendo la última más eficiente fotosintéticamente.

Al evaluar diversos materiales de la Colección Colombiana de Café (CCC) se observó que la actividad fotosintética de los frutos fue mayor en los primeros estados de

desarrollo, y disminuyó paulatinamente a la medida que éstos se acercaron a la maduración (26- 28 semanas después de antesis). Es en este momento cuando las concentraciones de clorofila, proteína y actividad de Rubisco disminuyen (López et al., 2000) y hay síntesis de antocianinas y carotenoides, propios de la madurez (Ocampo, 2003; Ocampo et al., 2010). Además, los frutos jóvenes, entre 10-16 semanas después de antesis, presentaron altas tasas respiratorias (López et al., 2000).

Se determinó que mientras en los frutos la actividad de PEP-C fue ligeramente superior que la de Rubisco, en las hojas el comportamiento fue opuesto (López et al., 2000).

Al hacer evaluaciones utilizando cámaras de intercambio gaseoso (Ocampo et al., 2010), se encontró que aproximadamente el 33% de los fotoasimilados almacenados provienen de la fotosíntesis realizada por los tejidos del pericarpio del fruto (Ocampo, 2003; Ocampo et al., 2010).

Factores propios del proceso fotosintético que afectan la productividad del café: Fotorrespiración

En los vegetales existen factores propios del proceso evolutivo en los que aún no se han dilucidado completamente sus mecanismos fisiológicos y bioquímicos, pero donde hay avances al entender cómo afectan la productividad. Paralelo a la fotosíntesis, ocurren dos procesos adicionales: **Respiración y fotorrespiración**.

La respiración es fundamental, libera parte de la energía almacenada en los carbohidratos producidos durante la fotosíntesis, para regular los procesos de mantenimiento y crecimiento del vegetal. Por su parte, **la fotorrespiración** es considerada un proceso que compite con la fijación de CO_2 , ya que opera durante el día y es poco conveniente para la planta, por limitar en un 50% la fotosíntesis, liberando parte del CO_2 al ambiente y disminuyendo la acumulación de materia seca, con consecuencias directas sobre la productividad. Este proceso es afectado principalmente por la temperatura, es decir, a mayor temperatura mayor pérdida de CO_2 por fotorrespiración (Peterhansel y Maurino, 2011).

Al evaluar las variedades Colombia, Caturra e Híbrido de Timor, bajo diferentes temperaturas de 15, 25 y 35 °C, se encontró que mientras la fotorrespiración fue superior en plantas establecidas a 35 °C, los valores más altos de fotosíntesis se encontraron a los 25 °C (Mosquera, 1995).

Consideraciones prácticas

Frente a la variabilidad y el cambio climático los resultados experimentales permiten sugerir que bajo temperaturas elevadas, uno de los procesos que afectan el crecimiento y la producción es la fotorespiración. Por lo tanto, la identificación de materiales dentro de la Colección Colombiana de Café de Cenicafé, que posean menores tasas fotorespiratorias podrían ayudar a minimizar el efecto sobre la acumulación de biomasa y distribución de asimilados.

Fotosíntesis e incremento de CO₂ en el ambiente

El CO₂ atmosférico es la principal fuente de carbono para la producción vegetal, ya que a partir de él las plantas fabrican los carbohidratos necesarios para su crecimiento, mediante el proceso de fotosíntesis. Al mismo tiempo, el CO₂ junto con otros gases de efecto invernadero, como el metano y el óxido nitroso, son los responsables del calentamiento global (Kimball et al., 1993; Drake y González, 1997).

Se ha demostrado que la mayor presencia de este gas en la atmósfera [390 ppm de CO₂ en la actualidad] (Poorter et al., 2012) afecta el proceso de intercambio gaseoso en plantas con metabolismo C₃, fundamentalmente por la disminución de la fotorespiración, lo que favorece la acumulación de biomasa en los diferentes tejidos. Mayores concentraciones de CO₂ ocasionan aumentos hasta del 20% en la producción de materia seca y el rendimiento de las cosechas en cultivos de plantas con este tipo de metabolismo (Drake y González, 1997; Kimball et al., 1993).

Al someter plantas de *C. arabica* variedad Caturra, de 6 meses, a diferentes concentraciones de CO₂, bajo ambientes confinados, se encontraron diferencias a favor de las plantas sometidas a atmósferas enriquecidas con CO₂ (775 ppm), con respecto a las plantas control (375 ppm). Al analizar el comportamiento de la enzima Rubisco, se observó una mayor actividad carboxilasa, trayendo como consecuencia una menor actividad del proceso fotorespiratorio. En términos de crecimiento, durante las primeras etapas se observó un efecto positivo en las plantas sometidas a la mayor concentración de CO₂, sin

embargo, dicho efecto se diluyó y finalmente las plantas no mostraron diferencias con respecto al control. Esto significa que el efecto positivo inicial no favorece a largo plazo la acumulación de biomasa, proceso denominado “aclimatación” (Ramírez et al., 2005).

Fotosíntesis y relación fuente-vertedero

Por su condición autótrofa, en la cual las plantas fabrican su propio alimento en las hojas, los metabolitos producidos en exceso son exportados a los órganos restantes, que actúan como vertederos o sitios de acumulación. Una exportación rápida y eficaz permite mantener una elevada tasa de fotosíntesis en las hojas, la cual se determina fundamentalmente por la fuerza del vertedero (Herold, 1980; Wardlaw, 1980; Gifford y Evans, 1981; Guardiola y García, 1990).

En especies perennes, como el cafeto, los frutos son los principales órganos vertederos de carbohidratos y compiten con los puntos de crecimiento y la acumulación de reservas en la raíz, tallos y hojas (Figura 38). Esto se confirma con la eliminación de estructuras reproductivas que provoca un aumento del desarrollo vegetativo de la planta y una reducción de la tasa fotosintética (Herold, 1980; Wardlaw, 1980; Gifford y Evans, 1981; Guardiola y García, 1990).

Metabolismo fotosintético y eficiencia en el uso del carbono en Variedad Castillo®. En hojas y plantas de *C. arabica* Variedad Castillo® El Rosario, en diferentes estados de desarrollo, se determinó que las hojas de mayor edad (Nudos 5-6), que presentan bajas tasas fotosintéticas, requieren fotoasimilados provenientes de hojas de menor desarrollo (Nudo 3). Así mismo, las hojas más jóvenes de la rama (Nudos 1-2), requieren para su mantenimiento y desarrollo CO₂ proveniente no sólo del proceso fotosintético, sino también de hojas de mayor desarrollo (Nudo 3) (Gómez, 2012). Las hojas jóvenes son, por lo tanto, altamente dependientes de los carbohidratos exportados desde otras hojas, e incluso desde ramas adyacentes (Figura 38).

La temperatura juega un papel crucial en el metabolismo vegetal. Valores inferiores o superiores al óptimo traen como consecuencia la pérdida de potencial productivo. En estudios realizados en cafetos de la Variedad Castillo El Rosario®, en diferentes temperaturas (15, 25 y 35 °C) se observó que con valores medios de temperatura (25 °C) la planta realiza una fotosíntesis neta positiva (fotosíntesis menos respiración). Sin embargo, altas temperaturas (35 °C) generan altas exigencias energéticas en el cafeto, por lo que se ocasionan altas tasas respiratorias y muy bajas fotosintéticas, que inciden en el movimiento de los carbohidratos entre órganos. Así mismo, a los 15 °C se obtuvo una fotosíntesis neta negativa, aunque los valores

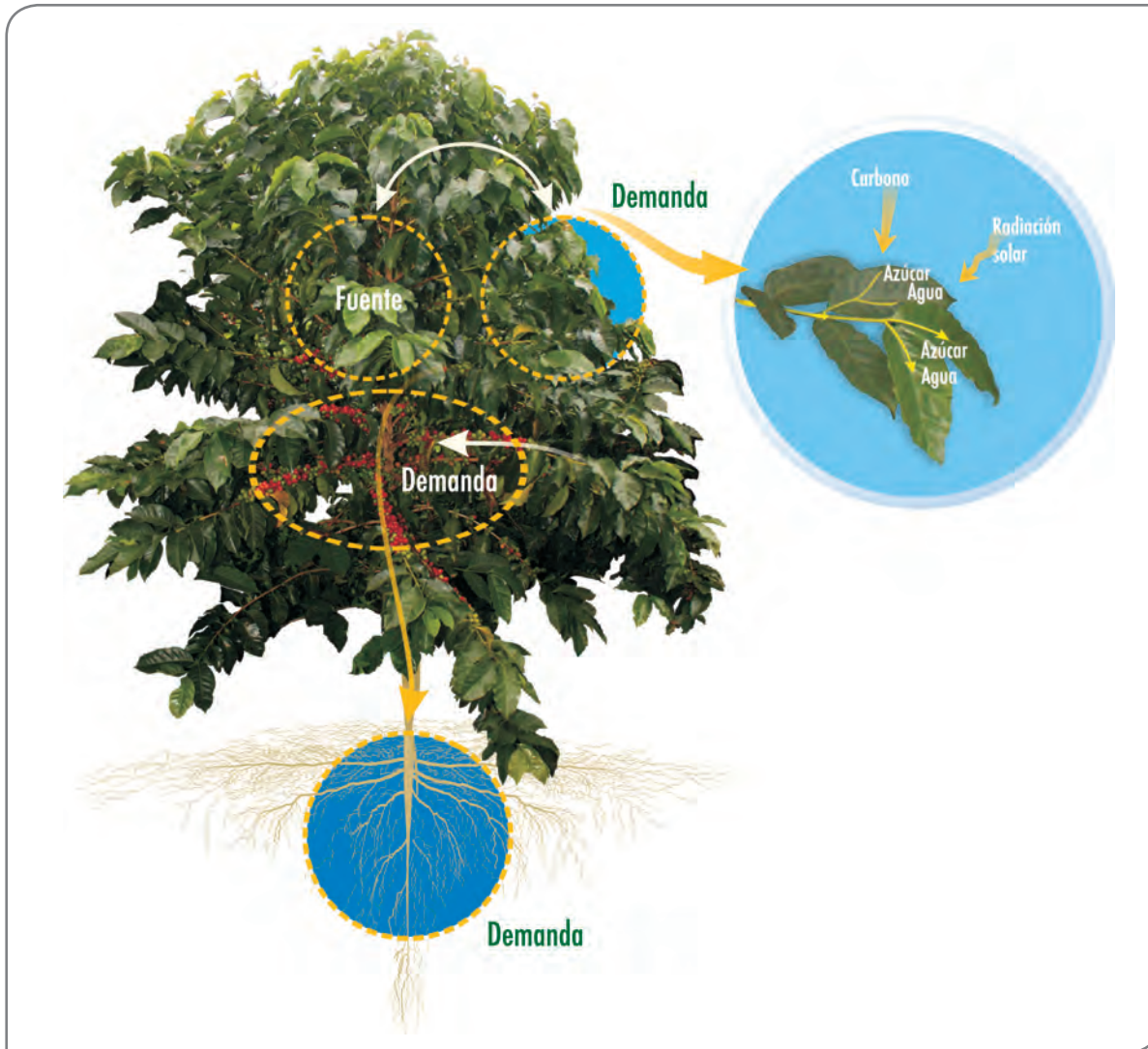


Figura 38.

Distribución de fotoasimilados en la planta de café.

de fotosíntesis máxima fueron los más altos, soportando los resultados de diversos trabajos donde se encontró que temperaturas similares en el campo generaron elevadas tasas de asimilación de CO_2 en café (Gómez, 2012).

A través de la marcación con ^{13}C de las plantas de café de 6 a 8 meses de edad, se evidenció cómo los metabolitos contenidos en las hojas con el paso del tiempo se exportaron hacia los tallos y raíces (Relación fuente-vertedero). Así mismo, se observaron diferentes respuestas de los almidones de acuerdo con la temperatura. Es así como a los 15°C los almidones demostraron menores necesidades energéticas, acumulándose en los cloroplastos, mientras a los 35°C , por efecto de un metabolismo más dinámico, las

hexosas y triosas fosfato son dirigidas hacia la síntesis de azúcares, para ser rápidamente enviadas a los tallos y raíces, mientras que a los 25°C su comportamiento fue regulado, de tal forma que hubo degradación de almidón, tanto de reserva como del recientemente sintetizado (Gómez, 2012), comportamiento que ha sido reportado en otras especies perennes como las forestales (Lambers *et al.*, 1998).

Cuando la planta pasa a una etapa reproductiva la relación fuente-vertedero cambia, de tal forma que los órganos demandantes (Frutos) tienen mayor capacidad de extraer los metabolitos en comparación con otros órganos como tallos y raíces. En esta etapa se observó la exportación de compuestos desde las hojas hacia los frutos. Aquellos frutos de mayor desarrollo presentaron

las mayores proporciones de almidones, proteínas y celulosa. Los azúcares totales no presentaron diferencias en concentración entre frutos de diferentes edades, lo

que muestra la importancia de éstos en todas las etapas de su crecimiento, y más aún, en el balance general de producción total de la planta.

Recomendaciones prácticas

- Las hojas son los sensores del ambiente para las plantas, y de su ángulo de inserción en la rama depende la cantidad de luz que capturan. En otras palabras, árboles cuyas hojas tengan un mayor ángulo de inserción tendrán acceso a una mayor cantidad de luz o de energía para su crecimiento y desarrollo.
- La arquitectura de la planta determina su arreglo espacial en el campo o densidad de siembra.
- La variación en la distribución de los ángulos de inserción del follaje es una característica importante que permite seleccionar genotipos que tengan una mejor adaptación frente a diferentes niveles exposición solar.
- Una distribución de la luz más uniforme en el dosel representa una mayor eficiencia fotosintética.
- Recuerde la importancia de tener hojas sanas y vigorosas en el cultivo de café ya que de éstas depende en gran parte la calidad y cantidad de la cosecha. Estas estructuras actúan como fábricas productoras de carbohidratos, que sirven para la formación de los demás órganos de la planta, incluyendo el fruto.
- El manejo de la densidad del cultivo y su distribución sobre la superficie del terreno hacen posible una mejor asimilación de CO₂, debido al mejor aprovechamiento de la luz solar. Recuerde que un IAF óptimo se alcanza en menos tiempo con mayores densidades de siembra.
- El área foliar de la Variedad Castillo® es mayor que en la variedad Colombia y la variedad Caturra. Para lograr una excelente producción se debe realizar un adecuado manejo de la fertilización.
- Condiciones de alta humedad relativa y alta temperatura media del aire se relacionan con daños en las estructuras florales, tales como “flor estrella” y pudrición de botones florales.
- Es muy importante favorecer la formación del núcleo del follaje del árbol, puesto que de éste depende el éxito de la próxima floración y cosecha.
- Después de 120 días de la floración comienza el período crítico o de mayor susceptibilidad del cultivo frente a la broca del café. Programe sus labores para prevenir los daños ocasionados por este insecto plaga.

Literatura citada

- ALVARADO, G.; MORENO, G. *Cómo se distribuye anualmente la cosecha de las variedades Caturra y Colombia? Chinchiná: CENICAFE, 1999. 4 p. (Avances Técnicos No. 260).*
- ALVARADO A., G.; OCHOA F., H.E. *Características fenotípicas de componentes de la variedad Castillo en dos ambientes. Cenicafé 57(82):100-121. 2006.*
- ARCILA P., J. *Fisiología del desarrollo foliar del café. p. 56-57. En: FNC. Informe anual de labores 1984-1985. Chinchiná (Colombia): CENICAFÉ, Septiembre de 1985. 85p*
- ARCILA P., J.; VALENCIA, A.G. *Observación del promedio de vida de las hojas de C. arabica. p. 33-34. En: FNC. Informe anual de labores 1975-1976. Chinchiná (Colombia): CENICAFÉ, 44p.*
- ARCILA P., J. *Productividad potencial del café en Colombia. p. 105-119. En: CENICAFÉ. 50 años de Cenicafé 1938-1988: Conferencias conmemorativas. Chinchiná: CENICAFÉ, 1990. p. 105-119.*
- ARCILA P., J. *Factores que limitan el desarrollo de las raíces del café. Chinchiná: CENICAFÉ, 1992. 8 p. (Avances Técnicos No. 176).*
- ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; BALDIÓN R., V.; BUSTILLO P., A. *La floración del café y su relación con el control de la broca. Chinchiná: CENICAFÉ, 1993. 6 p. (Avances Técnicos No. 193).*
- ARCILA P., J.; CHÁVEZ C., B. *Desarrollo foliar del café en tres densidades de siembra. Cenicafé 46(1):5-20. 1995.*
- ARCILA P., J.; BUHR, L.; BLEIHOLDER, H.; HACK, H.; WICKE, H. *Aplicación de la escala BBCH ampliada para la descripción de fases fenológicas del desarrollo de la planta de café Coffea sp. Chinchiná: CENICAFÉ, 2001. 31 p. (Boletín Técnico No. 23).*
- ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. *Relación entre la humedad del suelo y la floración y el desarrollo del fruto del café. Chinchiná: CENICAFÉ, 2003. 6 p. (Avances Técnicos No. 311).*
- ARCILA P., J. *Anormalidades en la floración del café. Chinchiná: CENICAFÉ, 2004. 8 p. (Avances Técnicos No. 320).*
- ARCILA P., J.; FARFÁN V., F.; MORENO B., A.M.; SALAZAR G., L.F.; HINCAPIÉ G., E. *Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná: CENICAFÉ, 2007. 309 p.*
- ASCANIO E.C.E. *Biología del café. Caracas: Universidad central de Venezuela, 1994. 308 p.*
- BACCHI, O. *Seca da semente de café aosol. Bragantia 14(22):225-236. 1955.*
- BARROS, R.S.; MAESTRI, M.; COONS, M.P. *The physiology of flowering in coffee: A review. Journal of coffee research 8(2-3):29-73. 1978.*
- CABEZAS M.; CORCHUELO, G. *Estimación de la interceptación de la radiación sola en papa criolla (Solanum phureja Juz.et BUK) en tres localidades colombianas. Agronomía colombiana 23(1):62-73. 2005.*
- CADAVID G., A.M.; RIAÑO H., N.M. *Fotosíntesis, arquitectura y producción de plantas de café Coffea arabica L. c.v. Colombia, bajo diferentes intensidades lumínicas. Santa Marta: Congreso de la sociedad colombiana de control de malezas y fisiología vegetal, 1998. 33p.*
- CAMAYO V., G.C. *Estudio anatómico y fisiológico de la diferenciación y desarrollo de las flores del café Coffea arabica L. var. Caturra. Popayán: Universidad del Cauca, 1995. 164 p. Tesis: Licenciada en biología.*
- CAMAYO, G.C.; ARCILA P., J. *Estudio anatómico y morfológico de la diferenciación y desarrollo de las flores del café Coffea arabica L. variedad Colombia. Cenicafé 47(3):121-139. 1996.*
- CAMAYO, G.C.; CHÁVEZ C., B.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A. *Desarrollo floral del café y su relación con las condiciones climáticas de Chinchiná, Caldas. Cenicafé 54(1):35-49. 2003.*
- CANNELL, M.G.R. *Effects of fruiting, defoliation and ring-barking on the accumulation and distribution of dry matter in branches of Coffea Arabica L. in Kenya. Experimental agriculture 7(01):63-74. 1971.*
- CANNELL, M.G.R. *Photoperiodic response of mature trees of arabica coffee. Turrialba 22(2):198-206. 1972.*
- CASTILLO, J.; MORENO, G. *La variedad Colombia: Selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del café. Chinchiná: CENICAFÉ, 1986. 171 p.*

- CASTILLO, J.; LÓPEZ, R. Nota sobre el efecto de la intensidad de la luz en la floración del cafeto. *Cenicafé* 17(2):51-60. 1966.
- CASTILLO R., M.E. Interceptación de la radiación solar en cafetales. Santa Fe de Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de agronomía, 1995. 107 p. Tesis: Magíster en Fitotecnia en el Área de Fisiología de Cultivos.
- CASTILLO R., M.E.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; SANABRIA R., J. Estructura del dosel e interceptación de la radiación solar en la planta de café *Coffea arabica* L. *Cenicafé* 47(1):5-15. 1996.
- CASTILLO R., M.E.; ARCILA P., J.; JARAMILLO R., A.; SANABRIA R., J. Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar del *Coffea arabica* L. *Cenicafé* 48(3):182-194. 1997.
- CASTILLO Z., J. Seleccione la semilla grande de café para las siembras. *Revista cafetera de Colombia* 19(146):60-68. 1970.
- CASTILLO Z., J.; MORENO R., L.G. La variedad Colombia: Selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del cafeto. Chinchiná: CENICAFÉ, 1988. 171 p.
- CHAPARRO, A.P.; CRISTANCHO, M.A., CORTINA, H.A.; GAITÁN, A.L. Genetic variability of *Coffea arabica* L accessions from Ethiopia evaluated with RAPDs. *Genetic Resources and Crop Evolution* (51):291-297. 2004.
- CHAPARRO C., M.C.; ROJAS A., J.M.; GÓMEZ P., C.R.; ARISTIZABAL V., G.E.; CORTINA G., H.A.; POSADA S., H.E.; ARCILA P., J.; MEJÍA M., C.G.; CÁRDENAS L., J. Guía para la implementación del protocolo producción de semillas de café variedad Castillo® y sus compuestos regionales en fincas de caficultores. Chinchiná: CENICAFÉ, 2012. 48 p.
- CUYA M., O.; LOMBARDI I., I. Influencia del tamaño de semilla en la germinación y crecimiento de plántulas de *Schinus molle*. *Revista forestal del Perú* 18(2): 17-27.1991.
- DRINNAN, J.E. The control of floral development in coffee *Coffea arabica* L. Queensland: University of Queensland. Department of botany, 1992. 157 p. Thesis: Doctor of philosophy.
- FAIGUENBAUM M, H.; ROMERO A., L. Efecto del tamaño de semilla sobre la germinación, el vigor y el rendimiento en un híbrido de maíz (*Zea mays*). *Ciencia e investigación agraria* 18(3):111-117. 1991.
- FRANCO, C.M. Fotoperiodismo em cafeeiro *C. arabica* L. Instituto de café do estado de Sao Paulo 27(164):1586-1592. 1940.
- FRANCO, C.; ALVARENGA, G. Maturação fisiológica da semente do cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv Mundo novo). *Ciencia e Prática* 5(81):48-54. 1981.
- FREE, J.B. Insect pollination of crops. 2nd ed. Cardiff: Harcourt Brace Jovanovich, 1993. 684p.
- GALVIS G. C., A. El mal rosado del cafeto. Chinchiná: CENICAFE, 2002. 8 p. (Avances Técnicos No. 299).
- GIL, V. L., F. Descripción de daños ocasionados por *Colletotrichum* sp. en flores y frutos de café en Colombia. Chinchiná: CENICAFE, 2001. 4 p. (Avances Técnicos No. 288).
- GARDNER, F.P.; BRENT P., R.; MITCHEL, R.L. Carbon fixation by crop canopies. p. 31-57. En: *PHYSIOLOGY of crop plants*. Iowa: Iowa state university press, 1985. p 28
- GARZÓN F., S.; FERNÁNDEZ Q., A.; ROA M., G.; ARCILA P., J. Evaluación de la calidad de la semilla durante su beneficio. *Cenicafé* 41(3):69-79. 1990.
- GÓMEZ L., F. Informe anual de actividades 2010. Chinchiná (Colombia): CENICAFÉ, 2010. 168 p.
- GÓMEZ, G. L., F. Metabolismo del carbono y relación fuente demanda en el cafeto (*Coffea arabica* L.). Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias, área agraria, 2012. 208 p. Tesis: Doctor en Ciencias.
- HOU G., V.L.; KRAMER, Y.S.; WANG, R.; CHEN, G.; PERBAL, S.; GILROY EB B. The promotion of gravitropism in *Arabidopsis* roots upon actin disruption is coupled with the extended alkalization of the columella cytoplasm and a persistent lateral auxin gradient. *Plant journal* 39(1):113-125. 2004.
- JARAMILLO R., A.; VALENCIA A., G. Los elementos climáticos y el desarrollo de *C. arabica* L. en Chinchiná (Colombia). *Cenicafé* 31(3):86-104. 1980.
- JARAMILLO R., A.; GUZMÁN M., O. Relación entre la temperatura y el crecimiento en *Coffea arabica* L., variedad Caturra. *Cenicafé* 35:57-65. 1984.
- JARAMILLO R., A. Clima andino y el café en Colombia. Chinchiná: CENICAFÉ, 2005. 196 p.

- JARAMILLO R., A.; RAMÍREZ B., V.H.; ARCILA P., J. Distribución de la lluvia: clave para planificar labores en el cultivo del café en Colombia. Chinchiná: CENICAFE, 2011. 8 p. (Avances Técnicos No. 411).
- JARAMILLO, A. Efecto de las abejas silvestres en la polinización del café (*Coffea arabica*: Rubiaceae) en tres sistemas de producción en el departamento de Antioquia. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, 2012. 82 p. Tesis: Maestría en Entomología.
- KLEIN, A.M., STEFFAN D., I., TSCHARNTKE, T. Beepollination and fruit set of *Coffea arabica* and *C. canephora* (Rubiaceae). *American Journal Botánica* 90(1):153-157. 2003.
- LEGUIZAMÓN, C. J., E. La mancha de hierro del cafeto. Chinchiná: CENICAFE, 1997. 8 p. (Avances Técnicos No. 246).
- LEON, J.; FOURNIER, L. Crecimiento y desarrollo del fruto de *Coffea arabica* L. *Turrialba* 12(2):65-73. 1962.
- LÓPEZ R., J.C. Informe anual de labores: Disciplina de fisiología vegetal. Chinchiná: CENICAFÉ, 2004. 30 p.
- LÓPEZ A., R. Observación sobre granos anormales de café y su ocurrencia en diferentes sitios de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 18(3):77-88. 1967.
- LÓPEZ R., J.C. Informe final del proyecto eficiencia en la utilización del nitrógeno por el cafeto (*Coffea arabica* L.). Chinchiná: Federación Nacional de Cafeteros, 2012. 36 p.
- MARÍN L., S.M.; ARCILA, P. J.; MONTROYA R., E.C.; OLIVEROS T., C. Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia). *Cenicafé* 54(3):208-225. 2003.
- MONCADA, M.P.; MCCOUCH, S. Simple sequence repeat diversity in diploid and tetraploid coffee species. *Genome* (47):501-509. 2004.
- MONROIG, M.F. Ecos del café: Morfología del cafeto. [En línea]. Mayagüez: Universidad de Puerto Rico, 2012. En: <http://academic.uprm.edu/mmonroig/id53.htm>. Consultado el 1 marzo de 2012.
- MEJÍA M., J.W. Arquitectura, interceptación de la radiación e intercambio gaseoso en introducciones de café. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2006. 94p. Tesis: Maestría en Ciencias Agrarias.
- NUTMAN F.J. The root system of *Coffea arabica* L.: Root system in typical soil in British east Africa. *Journal of experimental agriculture* (1):271-284. 1993.
- OCAMPO A., D.M. Fotosíntesis y cambios en la composición del pericarpio durante el desarrollo del fruto del cafeto *Coffea arabica* L. cv Caturra. Manizales: Universidad de Caldas, 2003. 62p.
- OCAMPO A., D.M.; RIAÑO H., N.M.; LÓPEZ R., J.C.; LÓPEZ F., Y. Intercambio de dióxido de carbono y cambios bioquímicos en el pericarpio durante el desarrollo del fruto del cafeto. *Cenicafé* 61(4):327-343. 2010.
- OLIVEIRA G., D.F.; RODRÍGUEZ, W.; MEZA DM, D. Grau da umidade de e temperatura na conservação de sementes de café. *Bragantia* 60(1):53-64, 2001.
- OROZCO G., L. Funciones de producción de café. Santa Marta: Sociedad internacional de biometría, para Centro América, Caribe, Colombia y Venezuela, 1995. p.11-15.
- ORTIZ, A. Cambios químicos del fruto asociados con su crecimiento: Informe anual de labores de la sección de fisiología vegetal 2003-2004. Chinchiná (Colombia): CENICAFÉ, Octubre 22 de 2004. 118p.
- ORTIZ A.; VEGA, F. E.; POSADA, F. Volatile composition of coffee berries at different stages of ripeness and their possible attraction to the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera:Curculionidae). *Journal of agricultural and food chemistry* 52(19):5914-5918. 2004.
- OSORIO B., CASTILLO Z., J. Influencia del tamaño de la semilla en el crecimiento de las plántulas de café. *Cenicafé* (20):20-40. 1969.
- PEÑA Q., A.J.; RAMÍREZ B., V.H., JARAMILLO R., A.; RENDÓN S., J.R.; ARCILA P., J. Effects of daylength and soil humidity on the flowering of coffee *Coffea arabica* L. in Colombia. *Revista Agronomía de la Facultad Nacional de Medellín* 64(1):5745-5754. 2011.
- PIRINGER, A.A.; BORTHWICK, H.A. Photoperiodic response of coffee. *Turrialba* 5(3):72-77. 1955.
- POISSON, J. Aspects chimiques et biologiques de la composition du café vert. p. 33-57. En: COLLOQUE Scientifique international sur le café (8 : November 28- December 3 : Abidjan). Paris : ASIC, 1977. p. 33-57.
- RAMÍREZ, V.H.; JARAMILLO, A.; ARCILA, J. Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales. *Cenicafé* 61(1):55-66. 2010.

- RAMÍREZ, V.H.; ARCILA, J.; JARAMILLO, A.; RENDÓN, J.R.; CUESTA, G.; MENZA, H.D.; MEJÍA, C.G.; MONTOYA, D.F.; MEJÍA, J.W., TORRES, J.C.; SÁNCHEZ, P.M.; BAUTE, J.E.; PEÑA, A.J. Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, térmica y de brillo solar. *Cenicafé* 61(2):132-158. 2010.
- RAMÍREZ, V.H.; ARCILA, J.; JARAMILLO, A.; RENDÓN, J.R.; CUESTA, G.; GARCÍA, J.C.; MENZA, H.D.; MEJÍA, C.G.; MONTOYA, D.F. MEJÍA, J.W.; TORRES, J.C.; SÁNCHEZ, P.M., BAUTE, J.E.; PEÑA, A.J. Variabilidad climática y la floración del café en Colombia. Chinchiná: CENICAFE, 2011. 8 p. (Avances Técnicos No. 407).
- RAMÍREZ, V.H. Aplicación de los índices hídricos en la identificación de genotipos de café potencialmente tolerantes al exceso hídrico. p. 36-37. En: CENICAFÉ. Informe anual de actividades 2011. Chinchiná: CENICAFÉ, 2011. 147p.
- RAVENT, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E *Biology of plants*. 6. ed. New York , Freeman Publisher Co., 1999. 944 p.
- RENDÓN S., J.R.; ARCILA P., J.; MONTOYA R., E.C. Estimación de la producción de café con base en los registros de floración. *Cenicafé* 59(3):238-259. 2008.
- RIAÑO H., N.; LÓPEZ, Y. Estructura de la planta y su relación con las funciones vegetales: La planta, estructura y funciones. Chinchiná: FMM-CENICAFÉ, 2008. CD
- RIVILLAS O., C.A.; CASTRO T., Á.M. Ojo de gallo o Gotera del cafeto *Omphalia flavida*. Chinchiná: CENICAFÉ, 2011. 25 p. (Boletín Técnico No. 37).
- RUIZ, R. Efecto de la fenología del fruto del café sobre los parámetros de la tabla de vida de la broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari). Manizales: Universidad de Caldas, 1996. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 87 p Tesis: Ingeniero Agrónomo.
- SALAZAR G., M.R. Estudio anatómico y fisiológico del fruto del café *Coffea arabica* L. var Colombia. Popayán: Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación 1993. 98 p. Tesis: Licenciada en Biología.
- SALAZAR G., M.R.; RIAÑO H., N.M.; ARCILA P.; J.; PONCE D., C.A. Estudio morfológico, anatómico y ultra estructural del fruto del café *Coffea arabica* L. *Cenicafé* 45(3):93-105. 1994.
- SALAZAR G., M.R.; ARCILA P., J.; RIAÑO H., N.M.; BUSTILLO P., A.E. Crecimiento y desarrollo del fruto de café y su relación con la broca. Chinchiná: CENICAFÉ, 1993. 4 p. (Avances Técnicos No. 194).
- SALAZAR G., M.R.; RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; PONCE, C. Estudio morfológico anatómico y ultraestructural del fruto de café *Coffea arabica* L. *Cenicafé* 45(3):93-104. 1994.
- SIMON N.; E., CORTES H.; S.L., DÍAZ H.; W., VIGNON G. Efecto del tamaño de la semilla en el crecimiento de las plántulas de *Coffea arabica*, L. *Cultivos tropicales* 11(2):45-52. 1989.
- SNOECK, J. Facteurs du rendement influences par les apports dá zotechez le caféi robusta en Cote d´Ivoire. *Café cacao thé* (25):173-180. 1981.
- SUÁREZ de C., F. Distribución de las raíces del cafeto en un suelo franco limoso. *Boletín Técnico Cenicafé* 1(12): 5-28. 1953.
- SUÁREZ S., J.V. Influencia de la precipitación en el crecimiento del fruto de café. Chinchiná: CENICAFÉ, 1975. 4 p. (Avances Técnicos No. 89).
- SUÁREZ V.S. Suelos pesados de la zona cafetera. Chinchiná: CENICAFÉ, 1977. 4 p. (Avances Técnicos No. 71).
- VALENCIA A., G. Granos negros y caída de frutos de café. Chinchiná: CENICAFÉ, 1972. 4 p. (Avances Técnicos No. 21).
- VALENCIA A., G. El área foliar y la productividad del cafeto. *Cenicafé* 24(4):79-89. 1973.
- VALENCIA A., G.; ARCILA P., J. Secamiento y caída de frutos tiernos de café. Chinchiná: CENICAFÉ, 1975. 2 p. (Avances Técnicos No. 40).
- VALENCIA A., G. Relación entre de área foliar (IAF) y la productividad del cafeto. *Cenicafé* 24(4):79-89. 1983
- VALENCIA A., G. Manual de nutrición y fertilización del café. Quito (ecuador): INPOFOS, 1998. 61 p.
- VALENCIA A, G. Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto. Chinchiná: CENICAFÉ : Agroinsumos del café, 1999. 94 p.

- VALIO, I.F.M. Inhibition of germination of coffee sedes (*Coffea arabica* L. c.v. Mundo novo) by the endocarp. *Journal of seed technology* (5):32-39. 1980.
- VELÁSQUEZ G., P.; ARCILA P., J.; ARISTIZÁBAL L., M. Relación entre el proceso de beneficio de la semilla de café *Coffea arabica* var. Colombia y el disturbio de la raíz bifurcada. *Cenicafé* 54(4):316-328. 2003.
- VÉLEZ A., B.E.; RIAÑO H., N.M.; ARCILA P., J.; MONTOYA R., E.C. Anatomía y ultraestructura foliar en diferentes genotipos de café: Informe interno. Chinchiná: CENICAFÉ. 1999. p 34
- VÉLEZ A.; B.E.; JARAMILLO R., A.; CHÁVEZ C., B.; FRANCO A., M. Distribución de la floración y la cosecha de café en tres altitudes. Chinchiná: CENICAFE, 2000. 4 p. (Avances Técnicos No. 272).
- VERGARA, C.H.; BANDANO, E.I. Pollinator diversity increases fruit production in mexican coffee plantations: The importance of rustic management systems. *Agriculture, ecosystems and environment* (129):117-123. 2009.
- WATSON, D.J. Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years *Annals of Botany* (1947) 11 (1): 41-76.
- WINTGENS, J.N. The coffee plant. p. 3-24. En: WINTGENS, J.N. *Coffee growing, processing, sustainable production: A guide book for growers, processors, traders and researchers*. Weinheim, Germany : Willey-VCH, 2004. p.
- WINTGENS, J.N.; WINTGENS, J.N.; WILEY V., W. *Germany coffee growing, processing, sustainable production: A guidebook for growers, processors, traders and researchers*. Weinheim (Alemania), Willey-VCH Verlag, 2009. 983 p.
- WIT, C.T. de. De photosynthesis of leaf canopies agric. Wageningen: Center for agricultural publications and documentation, 1965. 57 p.
- WORMER, T.M.; GITUANJA, J. Floral initiation and flowering of *Coffea arabica* L. in Kenya. *Experimental agriculture* 6:157-170. 1970.
- WRIGLEY, G. *Coffee*. Harlow: Longman, 1988. 639 p.