

Capítulo III

Fisiología del aguacate

Floración del aguacate

Las flores del aguacate presentan estructuras femeninas y masculinas viables en la misma flor. Sin embargo, las plantas presentan una separación temporal en el proceso de floración, fenómeno conocido como *dicotomía sincrona*, o separación temporal en la maduración de los sexos dentro de la misma flor. Este proceso se conoce técnicamente como *protoginia*, a través del cual el gineceo (u órgano femenino de la flor) madura antes que el androceo (u órgano masculino), de tal forma que las flores se abren en dos oportunidades. En la primera apertura, el estigma está receptivo, pero los estambres no han alcanzado la madurez suficiente para liberar polen y fertilizar la misma flor (Bernal-Estrada et al., 2020; Lobo, 1977).

Por otro lado, cuando las flores abren por segunda vez, los estambres ya están maduros y liberan polen, pero el estigma de la misma flor ya no se encuentra receptivo. Esto quiere decir que la flor del aguacate abre por periodos de dos días, comportándose como flor femenina en la primera apertura, en el primer día, y como flor masculina durante la segunda

apertura, en el segundo día (Davenport, 1986; Lobo, 1977). Bajo estas circunstancias, las flores no pueden ser fecundadas por el polen de la misma flor (o autofecundarse), sino que requieren que las flores de otros árboles a su alrededor estén liberando polen viable cuando sus estigmas se encuentran receptivos (Lobo, 1977). Por lo anterior, para que ocurra una polinización efectiva de las flores en los cultivos comerciales es necesario el establecimiento de árboles con distintos patrones de floración. De esta manera, algunos árboles liberan el polen requerido para la polinización de flores de los árboles cercanos, cuyas estructuras femeninas se encuentre receptivas. Este fenómeno ocurre debido a que todas las flores que alcanzan la madurez en el mismo árbol abren y cierran al unísono, siendo muy difícil que ocurra la fertilización de las flores con polen proveniente del mismo árbol.

Con relación a lo anterior, se han identificado dos patrones de floración en el aguacate. El primero se denomina tipo A, en el cual las flores abren por primera vez y actúan como femeninas en las primeras horas de la mañana y cierran al mediodía o en las primeras horas de tarde (figura 1). Luego, esas mismas flores abren por segunda vez, en la tarde del siguiente día, actuando en esta oportunidad como masculinas (Lobo, 1977). En el segundo patrón de floración, denominado tipo B, las flores actúan como femeninas y abren por primera vez al mediodía y cierran al final de la tarde, mientras que la segunda apertura, en la cual las flores actúan como masculinas, ocurre en la mañana del día siguiente o subsiguiente (figura 2) y depende de las condiciones ambiente en campo (Lobo, 1977).

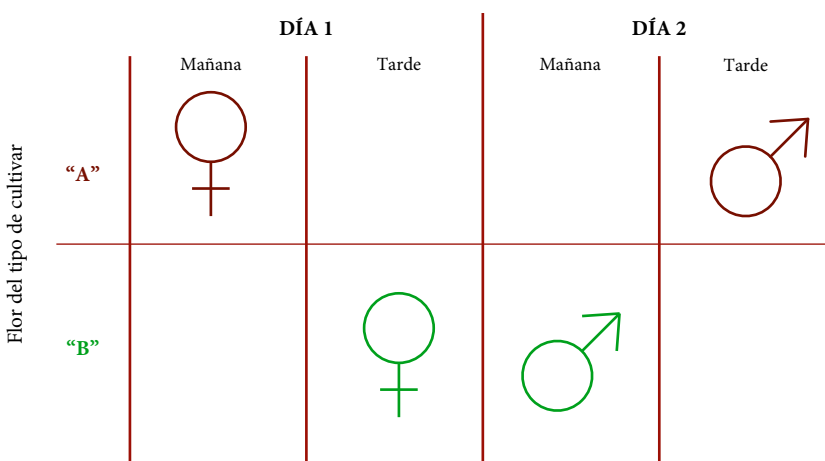


Figura 1. Momentos de florecimiento del aguacate para flores tipo "A" y "B".

Fuente: Adaptado de UC Riverside-College of Natural & Agricultural Sciences (s.f.)

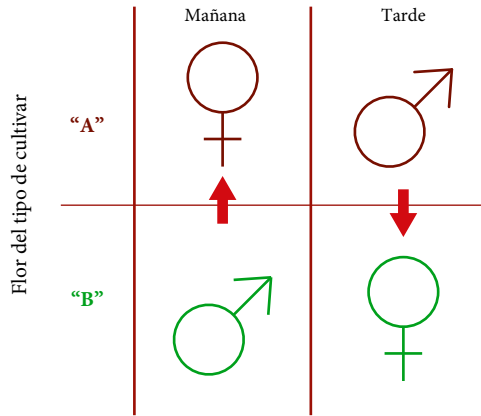


Figura 2. Patrones de floración del aguacate bajo las mismas condiciones en campo. Las flechas amarillas indican el movimiento del polen entre los tipos de flores complementarias.
Fuente: Adaptado de UC Riverside-College of Natural & Agricultural Sciences (s.f.)

Para resolver la situación mencionada y asegurar una polinización efectiva de las flores en las plantaciones o cultivos comerciales, se recomienda la alternancia de genotipos con Floración Tipo A y B, en proporción 4:1 durante la siembra. La tabla 1 presenta la clasificación de los patrones de floración de algunas de las variedades más conocidas de aguacate en Colombia.

Tabla 1. Patrón de floración de algunos genotipos de aguacate

Genotipo	Patrón de floración	
	Tipo A	Tipo B
Hass	X	
Choquette	X	
Lorena	X	
Booth 1	X	
Booth 8		X
Booth 7		X
Santana	X	
Trinidad	X	
Fuerte		X

Fuente: Lobo (1977)

El polen del aguacate no se dispersa por el viento debido a su consistencia cerosa y pegajosa. Esto hace que los granos se adhieran unos a otros entre sí, formando conglomerados de mayor peso, lo que dificulta su transporte por el aire (Davenport, 2011). Por esta razón, la presencia de agentes polinizadores en las plantaciones de

aguacate es importante para transferir el polen entre árboles. Entre los principales agentes polinizadores identificados en el aguacate están las abejas, avispas y moscas (Carabalí-Banguero et al., 2021; Dymond et al., 2021). En contextos donde los polinizadores naturales son escasos en plantaciones comerciales, se ha implementado con éxito el establecimiento de panales con abejas melíferas para favorecer la polinización (Carabalí-Banguero et al., 2021; Dymond et al., 2021).

Desarrollo del fruto

La duración del periodo de floración en el aguacate varía según las variedades o genotipos y el comportamiento del clima. En promedio, abarca de dos a tres meses para la mayoría de los cultivares (Papademetriou, 1976). Algunos cultivares inician el periodo de floración a finales de un año y continúan hasta los primeros meses del siguiente, mientras que otros florecen continuamente durante periodos prolongados de tiempo, llegando hasta los siete meses (Papademetriou, 1976).

En la subregión de los Montes de María se presentan dos periodos de floración. El primero, o periodo principal, ocurre a finales de año, entre los meses de octubre a diciembre, mientras que el segundo, o secundario, se da entre mayo y junio. Estos periodos de floración varían en intensidad y duración, lo que resulta en la presencia simultánea de frutos de diferentes edades en el árbol y un flujo permanente de producción que es más abundante en el primer semestre que en el segundo. La predominancia del flujo floral a finales de año es afectada principalmente por el comportamiento del clima, en especial por la temperatura y la precipitación. Como consecuencia, en los Montes de María, la producción de aguacate, aunque es permanente, se concentra mayormente entre los meses de abril y junio, con una segunda cosecha en el segundo semestre que puede ir desde septiembre hasta noviembre (Vega, 2012). En otras regiones del país con clima medio, en especial en áreas sembradas con aguacate Hass, el flujo floral del primer semestre supera al del segundo semestre y la cosecha se concentra a finales de año (Bernal-Estrada et al., 2017).

Una vez realizada la polinización de la flor, comienza el proceso de formación del fruto del aguacate. El fruto se desarrolla a partir de los tejidos del pistilo de la flor. La fecundación desencadena un activo proceso de división y expansión celular, que son responsables del aumento en el tamaño de los frutos. La fecundación del óvulo da lugar a la formación de un embrión que estimula el proceso de división celular (Schroeder, 1958).

Aunque se reconoce que tanto la división como la expansión celular ocurren simultáneamente durante el proceso de formación de los frutos, se ha demostrado que, en el aguacate, la expansión celular es más intensa solamente durante los primeros estadios de desarrollo del fruto. Luego, cuando la fruta ha alcanzado aproximadamente la mitad de su tamaño final, la expansión de las células disminuye, mientras que las divisiones celulares continúan hasta que el fruto alcanza sus dimensiones máximas. Esta es una característica única del aguacate, en la cual la fase final del crecimiento de los frutos no se debe tanto a la expansión celular como al aumento en su número (Bower & Cutting, 1988; Schroeder, 1958). En este sentido, a diferencia de otro tipo de frutos, la división celular no se limita solamente al periodo inicial de crecimiento, sino que también continúa durante todo el proceso de desarrollo del fruto, incluso en la etapa de madurez cuando el fruto todavía está unido al árbol que lo generó (Van Den Dool & Wolstenholme, 1983). El periodo de formación del fruto, desde la fertilización de flor hasta la madurez de este, oscila entre cinco y ocho meses, dependiendo de la variedad (Amórtegui, 2001).

Los seguimientos realizados para evaluar el aumento de peso y volumen de los frutos del aguacate indican un comportamiento o curva sigmoideal (Robertson, 1971; Valmayor, 1964). En esta curva, la división celular es muy activa, especialmente en el mesocarpio o parte carnosa del fruto y, en su mayor medida, es responsable de las variaciones en el tamaño del fruto (Barmore 1977; Valmayor 1964). En algunos casos, se ha observado que la expansión celular se detiene cuando el fruto alcanza aproximadamente el 50 % de su tamaño, mientras que la división celular explica el crecimiento que se presenta durante la parte final de formación del fruto (Bower & Cutting, 1988; Cummings & Schroeder, 1942).

El proceso de crecimiento del fruto del aguacate está fuertemente asociado con la actividad hormonal. Al inicio de la formación del fruto, se ha detectado un aumento en la actividad auxínica, la cual se ha vinculado con las relaciones fuente-demanda y el transporte de los carbohidratos necesarios para la formación de los frutos. De igual forma, se ha detectado la presencia de citoquininas, las cuales cumplen una función crucial en los procesos de división celular, y el ácido abscísico, asociado con el desarrollo del mesocarpio del aguacate; esta sustancia alcanza su punto máximo en la etapa de madurez del fruto (D'Asaro, 2017).

La semilla del aguacate

El fruto del aguacate es una baya de un solo carpelo que contiene una única semilla (figura 3). Por lo general, el fruto presenta asimetría en el ápice debido al crecimiento diferencial de los lados opuestos del fruto. El fruto consta de tres capas: exocarpio, que es la piel o corteza; mesocarpio carnososo, que corresponde a la porción comestible; y una fina capa interna junto a la semilla, que es el endocarpio. La semilla es grande y conspicua, compuesta por dos cotiledones carnosos, una plúmula, con su hipocótilo y la radícula, unidos centralmente (figura 4). El almidón es el principal material de almacenamiento en los cotiledones para el proceso de germinación y formación de las nuevas plantas. Los cotiledones presentan un sistema vascular que se extiende desde el pedicelo, ramificándose de manera asimétrica por el mesocarpio hasta alcanzar el embrión. Desde el embrión, los haces vasculares se extienden en paralelo a la superficie plana de los dos cotiledones (Cummings & Schroeder, 1942).

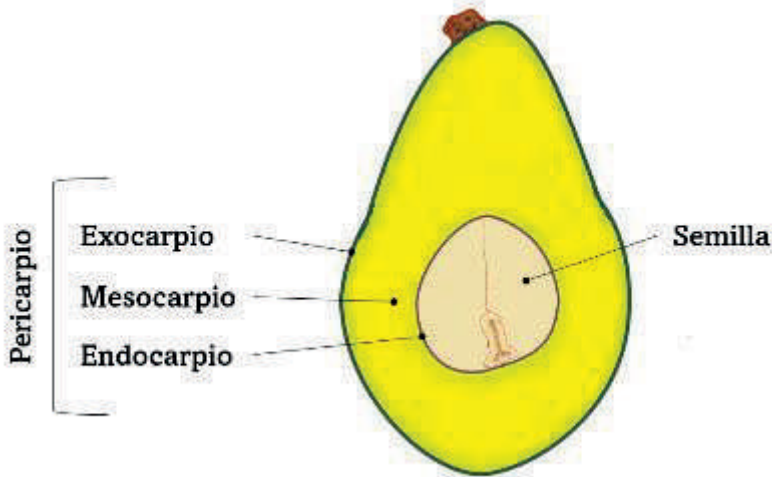


Figura 3. Diagrama de las partes del fruto de aguacate.

Fuente: Elaboración propia

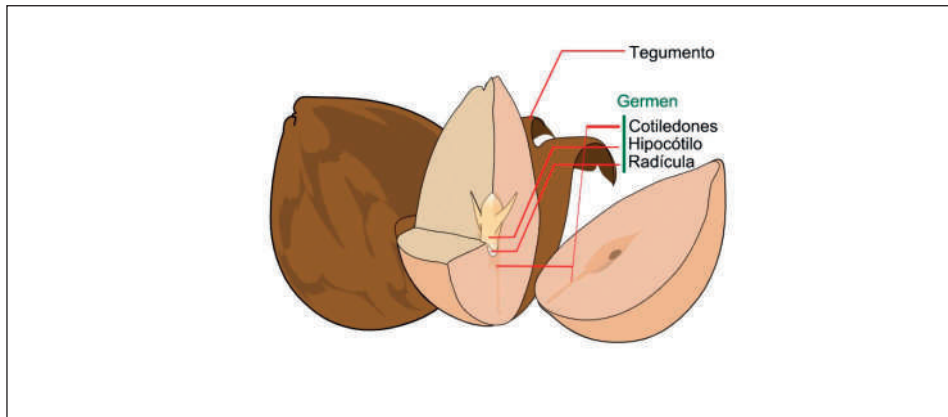


Imagen de dominio público.

Figura 4. Diagrama de la semilla de aguacate.

Fuente: Mariana Ruiz Villareal (2013).

Estudios realizados para determinar la composición nutricional de la semilla de aguacate indican su alto contenido de almidones, grasas y proteínas, además de minerales, algunas vitaminas y sustancias antioxidantes (Bahru et al., 2019; Setyawan et al., 2021). Debido a su composición química proximal, las semillas de aguacate han sido usadas para la industria de alimentos, cosmética, y tienen un uso potencial asociado a propiedades insecticidas y bactericidas (Leite et al., 2009; Segovia et al., 2016). En contraste, la pulpa del aguacate se caracteriza por su bajo contenido de ácidos grasos saturados, lo que la convierte en un componente valioso en las dietas para la prevención de enfermedades cardiovasculares (Fawcett, 2007). A partir de la pulpa se extraen aceites de alta calidad, principalmente empleados en la industria cosmética y alimentaria.

El proceso de maduración de los frutos

El aguacate es un fruto climatérico, lo que significa que la maduración del mesocarpio o parte comestible comienza después de que el fruto se ha separado de la planta madre (Schroeder 1958). Una vez que este se desprende, se activa en el fruto la producción de etileno, una hormona vegetal que desencadena todos los procesos metabólicos que conducen a la maduración (Hershkovitz et al., 2009a y 2009b). El proceso de maduración conlleva una serie de procesos metabólicos, la ruptura y descomposición de paredes celulares, y descomposición de almidones, procesos que requieren grandes cantidades de energía y que generan cambios en el color, sabor y textura de los frutos del aguacate, lo cual es atractivo para el consumidor (Dixon & Pak, 2008). Además, este proceso es irreversible e implica una serie de actividades

que se inician en el pedicelo donde una sustancia liberada en el momento de la cosecha, al ser arrancado el fruto de la planta madre, se desplaza hacia el resto del fruto, desencadenando procesos metabólicos que ocasionan modificaciones en sus propiedades físicas y químicas (Bruinsma & Paull, 1984; Tingwa & Young, 1975).

La madurez del aguacate ocasiona cambios en la firmeza y ablandamiento del fruto. Este ablandamiento se debe tanto a la pérdida de humedad como al rompimiento de membranas y paredes celulares, además de la descomposición de los almidones presentes en el mesocarpio del fruto (Ahmed & Barmore, 1980; Barmore, 1977). Durante este proceso, también se produce metabolismo de los lípidos y acumulación de aceites en los frutos (Kikuta & Erickson, 1968). Todos estos procesos implican un marcado aumento en las tasas de respiración de los frutos, lo que al final afecta el sabor percibido por el consumidor (Hobson, 1979).

Se han evaluado diversas metodologías con el propósito de retrasar la madurez de los frutos del aguacate una vez cosechados. El objetivo de estas técnicas es conservar los frutos durante el transporte hacia los mercados de exportación y alargar su vida útil en la estantería. Entre los métodos usados para retrasar la maduración de los frutos, se encuentra el almacenamiento a bajas temperaturas (5 y 10° C), la aplicación de altas concentraciones de dióxido de carbono (10 %) en los contenedores de almacenamiento, el recubrimiento de los frutos con cera (Bower & Cutting, 1988; Rodríguez et al., 2017), y el tratamiento con inhibidores del etileno (Feng et al., 2000).

Latencia de la semilla

La semilla del aguacate es recalcitrante, es decir que una vez colectadas y extraídas del fruto, deben sembrarse rápidamente, ya que pierden paulatinamente su viabilidad germinativa a medida que la semilla pierde humedad. En la literatura se indica que las semillas del aguacate pierden completamente su habilidad germinativa al reducir entre 20-50 % de su peso seco (Gálvez-Cendegui, 2017). Por lo anterior, se han realizado estudios con el objetivo de preservar la viabilidad de las semillas del aguacate durante el almacenamiento. Se ha descubierto que las semillas de la mayoría de las variedades pueden almacenarse bajo refrigeración durante un periodo de entre 5 y 15 meses, siempre y cuando se mantengan a una temperatura de 5,5 °C y 90 % de humedad relativa (Ernst et al., 2013; Halma & Frolich, 1949).

La semilla del aguacate criollo es de gran tamaño, lo cual la convierte en la preferida para los procesos de propagación e injertación en vivero, principalmente por sus atributos de rusticidad y tolerancia a las principales enfermedades del suelo. Sin embargo, en la fase de vivero, presenta una germinación desuniforme, ya que se utilizan frutos de diversos tamaños y orígenes genéticos en los procesos de propagación (López et al., 2012). Lo anterior es agravado por el prolongado periodo de floración de las plantaciones de aguacate en la subregión y el patrón de floración secuencial de las inflorescencias, lo que ocasiona el desarrollo de frutos de diferentes tamaños y estados de maduración (Bernal-Estrada et al., 2020).

Como consecuencia, los frutos que posteriormente llegan a los viveros para la extracción de las semillas presentan una alta variabilidad y calidad germinativa. Para uniformizar la germinación en los viveros, se han desarrollado técnicas de pretratamiento de semillas, entre las cuales se encuentran el almacenamiento de los frutos en el ambiente y bajo sombra, durante cortos periodos de tiempo para homogeneizar la madurez (hasta por tres semanas) (Ramírez-Gill, 2016). Otra técnica es la extracción y clasificación de las semillas según su peso y tamaño, seguida de la remoción del tegumento seminal, el despunte terminal y basal de las semillas, y el tratamiento con ácido giberélico (500-1000 ppm). Estos tratamientos han logrado uniformizar y acortar el tiempo de germinación (Ramírez-Gill, 2016).

