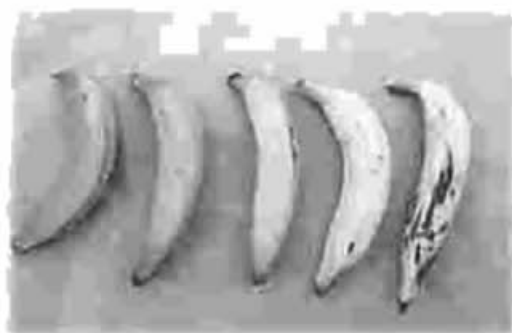


Rev. 12731

ANALIZADO



CAPÍTULO

2

FISIOLOGÍA DE LA MADURACIÓN

2. FISIOLÓGIA DE LA MADURACIÓN

Antes de tratar los temas relacionados con la maduración de los frutos consideramos oportuno transcribir una nota del libro *Fisiología y Bioquímica Vegetal* (Azcon-Bieto y Talon, 1996) para aclarar el significado de dos términos de la lengua inglesa "maturation" y "ripening", con la misma traducción en español pero con diferente significado. El término "maturation" (maduración fisiológica) define el proceso en el que se alcanza y finaliza el máximo estado de desarrollo del fruto; "ripening" (maduración organoléptica) comprende los cambios que se producen desde las últimas etapas del desarrollo hasta las primeras fases de la senescencia, en las que se producen las alteraciones características en la calidad de los frutos (cambios en el color, aroma, textura, etc.), que pueden coincidir en muchos casos con el comienzo del climaterio de los mismos. También se puede definir la "madurez fisiológica" como el estado de máxima acumulación de materia seca en el fruto y la "maduración" como el proceso siguiente de cambio de color de la cáscara, degradación de almidón y acumulación de azúcares en la pulpa.

La maduración es la fase final del crecimiento y desarrollo del fruto en la que se producen una serie de cambios coordinados que conducen a la senescencia y abscisión del fruto. La senescencia es la fase final de la vida útil de un órgano en la cual se presentan alteraciones irreversibles que conducen al desorden y muertes celulares por el aumento de la actividad de enzimas hidrolíticas. Durante el proceso fisiológico de maduración de los frutos ocurren varios procesos bioquímicos que le dan sus características de calidad y aceptabilidad para el consumo. Los cambios más perceptibles son alteraciones en pigmentos, textura y componentes del sabor que, fundamentalmente, se deben a cambios en niveles hormonales, respiración y organización celular. Los frutos climatéricos como el plátano presentan una disminución inicial de la tasa de respiración seguida por un gran aumento de ésta que coincide con la maduración del fruto y luego al final decrece cuando el fruto se torna sobremaduro. Cuando los frutos maduran ocurre la conversión de almidón a azúcares mediante un proceso fisiológico que es más lento en los plátanos (AAB) que en los bananos (AAA). Todos los frutos maduros de banano son más azucarados que los de plátano y, por lo general, son consumidos frescos; sin embargo, los dos tipos pueden ser consumidos como plátanos de cocción en el estado verde (Robinson, 1996). Conocer los procesos fisiológicos de la maduración es de gran importancia para el mejoramiento de la calidad y la

prevención de grandes pérdidas durante la producción, almacenamiento, industrialización y mercadeo de los frutos.

Existen evidencias considerables de que las rutas metabólicas cambian durante la maduración de los frutos. La actividad de las enzimas carboxilasas y aldolasas aumentan notoriamente durante la maduración de bananos y plátanos y paralelamente cambia la ruta de las pentosas fosfato. Algunos de los cambios más marcados durante la maduración (sustancias pécticas, enzimas pécticas, hemicelulosas y celulosas) ocurren en las paredes de las células y la suavidad y textura del fruto reflejan estos cambios (Bonner y Varner, 1965).

Después de cosechados, los frutos climatéricos como el plátano pasan por cuatro estadios de desarrollo fisiológico: preclimaterio, climaterio, maduración, maduración de consumo y senescencia. El preclimaterio representa el periodo desde la cosecha hasta la iniciación de la respiración climatérica; durante esta fase los frutos son verdes, de textura rígida y la actividad metabólica es baja, siendo el objetivo comercial prolongar al máximo esta fase. El climaterio se caracteriza por un incremento rápido en la respiración denominado "respiración climatérica" que generalmente ocurre cuando se completa el del proceso de maduración del fruto. El máximo climaterio puede ocurrir antes o después que el fruto es removido de la planta, dependiendo del tipo de fruto y los procedimientos de cosecha. Durante el estadio de maduración el cambio más notable es la pérdida paulatina del color verde y amarillamiento de la cáscara como resultado de la degradación de la clorofila, permitiendo que la pigmentación debida a los carotenos y xantofilas se torne visible; al mismo tiempo, la pulpa comienza a ablandarse y el almidón es convertido rápidamente a sacarosa, glucosa y fructosa (Sánchez - Nieva *et al.*, 1970). La madurez de consumo de los plátanos no es única, ya que generalmente son consumidos por la población en estado verde, pero también existen algunas preferencias para su consumo en estado maduro.

2.1. RESPIRACIÓN

La respiración es el proceso por medio del cual todos los órganos de las plantas forman, a partir de carbohidratos y otros substratos, compuestos de alta energía (ATP) y alto poder reductor ($\text{NADH} + \text{H}^+$) que son utilizados para las reacciones del metabolismo esencial necesarias para el crecimiento y desarrollo. El inicio de la maduración de los frutos está relacionado con un

importante aumento de la actividad respiratoria y de la biosíntesis de etileno. Todos los frutos, como seres vivos que son, respiran y transpiran, no sólo durante su fase de desarrollo en la planta, sino también durante la maduración y senescencia una vez recolectados.

El proceso de respiración durante la maduración se puede utilizar como índice para determinar el potencial de deterioro del producto; la vida postcosecha y el manejo requerido, siendo el principal objetivo del desarrollo de técnicas o tratamientos para disminuir la velocidad respiratoria y alargar la vida del producto (Yahia, 1992).

2.2. Etileno

Desde hace muchos años se conoce la capacidad que tienen algunos gases de estimular la maduración de frutos. En la China antigua se sabía que las frutas cosechadas maduraban con mayor rapidez en un recinto donde se quemaba incienso. Como dato anecdótico, el banano estuvo involucrado en las observaciones casuales que condujeron al descubrimiento de la acción del gas etileno sobre la maduración. En 1910, un informe anual del Departamento de Agricultura de Jamaica mencionaba que no se debían almacenar naranjas junto con bananos en los barcos porque cierta emanación de las naranjas hacía que los bananos se maduraran en forma prematura. Sin embargo, hoy se sabe que las naranjas sanas casi no forman etileno, por lo que, probablemente, fueron los hongos de naranjas infectadas los que produjeron la emanación. Al parecer, este informe fue la primera sugerencia de que las frutas liberan un gas que estimula la maduración, pero no fue sino hasta 1934 cuando se demostró que las plantas sintetizan etileno y que éste es el responsable de la maduración más rápida (Salisbury y Ross, 1994).

Los tejidos vegetales sintetizan etileno a través de una ruta metabólica que utiliza como precursor el aminoácido metionina. El etileno difiere de todas las fitohormonas conocidas en su extrema volatibilidad, característica gaseosa que permite que el etileno producido por una planta o fruto influya sobre el crecimiento y desarrollo de otros cercanos. Las fugas de gas natural, los gases desprendidos por maquinaria agrícola, las quemadas de materia orgánica, la vegetación en descomposición, enferma o vieja, la contaminación del aire y aún los tejidos vegetales sanos también pueden ser fuente de etileno.

Los frutos climatéricos maduran en la planta una vez que el nivel de etileno es alcanzado, pero algunos no lo hacen y requieren ser cosechados antes que ocurra la maduración. Se presume que en estos últimos un inhibidor del etileno se encuentra presente mientras el fruto está adherido a la planta madre y que va desapareciendo gradualmente después de cosechados. La naturaleza de este inhibidor es desconocida y podría no ser una sustancia sino un balance particular de otras hormonas. En los plátanos y bananos, la concentración madurante de etileno está presente en los frutos verdes pero éstos permanecen insensibles hasta que alcanzan la madurez fisiológica (Goodwing y Mercer, 1983).

Los plátanos y bananos verdes muestran un nivel bajo y constante de la producción de etileno hasta el inicio de la maduración, luego su producción se incrementa, acompañada por un aumento en la tasa de respiración, hasta alcanzar el pico climatérico (Burg y Burg, 1965). Después de alcanzada la maduración la producción de etileno declina significativamente, mientras que la tasa de respiración alcanza su valor máximo, luego baja lentamente, pero se mantiene a un nivel alto (Palmer, 1971). La producción de etileno en la cáscara es muy baja y la maduración de ésta depende, probablemente, del etileno de la pulpa en ausencia de una fuente externa. El etileno se incrementa únicamente durante la senescencia de la cáscara pero no ocurre un aumento de la respiración de ésta.

En las especies climatéricas, el etileno tiene la capacidad de estimular la maduración y su efecto en los frutos verdes depende, en general, de la concentración aplicada. Una vez que se ha iniciado el incremento climatérico de la respiración, la aplicación posterior de etileno no tiene efecto en la promoción de la maduración. La sensibilidad de los frutos al etileno se reduce durante el almacenamiento a bajas temperaturas, con el incremento de los niveles de CO₂ (inhibiendo la respiración) o disminuyendo la presión parcial de oxígeno que inhibe la respiración y la síntesis de etileno.

2.3. Cambios físicos

El tamaño, calidad y presentación de los frutos de plátano son influenciados por la variación de las condiciones ambientales en las zonas de producción. El comportamiento físico del fruto varía durante la maduración presentándose

cambios en el tamaño y la forma, coloración de la cáscara y la pulpa y variación significativa de la materia seca. Los cambios de color se deben a pigmentos localizados en los plastidios, vacuolos y el citoplasma de las células. En el proceso avanzado de la maduración, cuando se han logrado los máximos cambios en composición, se inicia el proceso de ablandamiento del fruto debido al incremento en la actividad de la enzima pectinasa.

2.3.1. Peso y tamaño

Las propiedades físicas del fruto cambian durante el proceso natural de maduración disminuyendo significativamente el peso promedio y la humedad del fruto, el peso de la pulpa aumenta y el de la cáscara disminuye, incrementándose la relación pulpa:cáscara (Sánchez-Nieva *et al.*, 1970; Stover y Simmonds, 1987; Firmin, 1991). Los cambios en la relación pulpa/cáscara durante la maduración del fruto pueden ser un indicador muy significativo de la consistencia del fruto y está muy relacionado con la edad del racimo (Dadzie, 1998). Los efectos de la temperatura sobre el peso del racimo pueden ser interpretados por su influencia en el número y tamaño de los frutos. Según Turner (1994), el efecto sobre el tamaño depende del peso inicial del fruto, de su tasa relativa de crecimiento y del tiempo necesario para alcanzar su estado óptimo de cosecha, mientras que la influencia de la temperatura sobre el número de frutos es más probable que ocurra durante el período de diferenciación del racimo. La reducción del peso fresco es típico del comportamiento metabólico de los frutos durante la postcosecha, siendo más pronunciada en los frutos que se desarrollan en las zonas cálidas y secas.

El tamaño de los frutos de Dominico-Hartón en el momento de cosecha es muy influenciado por la altitud, temperatura y brillo solar. La composición química del fruto y su comportamiento postcosecha está determinada por la cantidad de lluvia que haya precedido su llenado en la planta. El fruto tardará más tiempo en madurarse si su período de llenado transcurrió en la época lluviosa (Arcila *et al.*, 1998).

2.3.2. Agua

El agua es el mayor componente del fruto confiriéndole fragilidad a los tejidos. El calor de la respiración y el grado de madurez tienen una influencia importante

sobre las pérdidas de humedad del fruto. Los frutos de plátanos tipos "French" (Dominico) y "Horn" (Hartón) presentan un contenido de agua inferior al de los bananos Cavendish (Marriot, 1980). La pulpa está compuesta esencialmente de agua y carbohidratos, mientras que los contenidos de grasas y proteínas son bajos (Giami y Dismas, 1994). La cáscara contiene estomas y éstos continúan transpirando después del corte. La densidad de estomas en la cáscara no varía como consecuencia de la influencia ambiental durante el desarrollo y maduración de los frutos, sin embargo, las condiciones ambientales sí ejercen una marcada influencia sobre el mecanismo de apertura y cierre del poro estomático (Arcila *et al.*, 1998). Banks (1984) determinó que la apertura estomática aumenta durante la maduración de los frutos. No obstante, para que la pérdida de agua a través de los estomas sea importante durante la postcosecha, se requiere que éstos permanezcan abiertos por un periodo de tiempo muy amplio. La reducida densidad de estomas en la cáscara de los frutos de las musáceas sugiere que la pérdida estomática de agua debe ser relativamente baja (Burdon *et al.*, 1994). En los frutos de banano la principal ruta postulada para el intercambio de gases son los estomas (Banks, 1984) sin embargo, un estudio de los frutos de varios cultivares de plátano demostró que la pérdida de agua durante la maduración no está correlacionada con la densidad ni largo de los estomas (Burdon *et al.*, 1993); por lo cual se sugiere que la alternativa de la pérdida de agua es a través de la cutícula.

Las condiciones ambientales del trópico húmedo favorecen la pérdida rápida de agua de los frutos de plátano y se ha demostrado que esta pérdida de agua acelera la maduración (Burdon *et al.*, 1993), reduciendo la duración de la "vida verde" preclimaterica del fruto (George y Marriot, 1983). Además de las condiciones ambientales, los daños físicos a los frutos también influyen en la pérdida de agua. La abrasión de los frutos de plátano incrementó la pérdida de agua y redujo el periodo de maduración en 39% cuando la humedad relativa fue de 70 a 90%, mientras que con 100% de humedad relativa, la abrasión no aceleró la maduración debido a la prevención de la pérdida de agua que genera una atmósfera saturada (Ferris *et al.*, 1993).

El fruto verde, inmediatamente después de cortado, muestra una baja intensidad transpiratoria que luego se estabiliza a un nivel continuo que depende de la temperatura y la humedad. En el climaterio ocurre una drástica subida de la transpiración; a medida que el fruto madura se mantiene un

nuevo estado constante mayor que el del preclimaterio y, finalmente, se registra una caída en pérdida de agua (Simmonds, 1973). El contenido de humedad de la cáscara disminuye durante la maduración mientras en la pulpa aumenta. El porcentaje de agua en la pulpa aumenta durante la maduración debido a la hidrólisis del almidón y al movimiento osmótico de agua desde la cáscara hacia la pulpa. Loesecke (1950) demostró que un incremento en el peso de la pulpa, afectando la relación pulpa/cáscara, parece ser una consecuencia de la salida osmótica de humedad de la cáscara. Una diferencia marcada en la presión osmótica entre la pulpa y cáscara se desarrolla durante la maduración porque la concentración de azúcares se incrementa más rápidamente en la pulpa que en la cáscara. La cáscara del plátano aunque no es usada para la alimentación humana, ejerce una función reguladora entre la pulpa comestible y las condiciones ambientales externas, además de ser particularmente importante para proteger la pulpa contra daños físicos y desecación (Burdon *et al.*, 1993).

2.3.3. Color

Durante la maduración hay transformación de cloroplastos a cromoplastos ricos en carotenoides, acumulación de antocianinas y compuestos aromáticos. El cambio de color de los frutos en maduración se debe a la destrucción de la clorofila y la manifestación de otros pigmentos presentes. De acuerdo con la escala propuesta por Loesecke (1950) para definir los estados de maduración del banano Gros Michel, se ha adaptado para plátano una escala de maduración (Tabla 5) según el color de la cáscara de los frutos (Figura 1).

Tabla 5. Grados de maduración del plátano Dominico-Hartón.

Grado	Color	Descripción
1	Verde oscuro (V)	Verde intenso y uniforme
2	Verde claro (VC)	Verde con trazas de amarillo
3	Amarillo-verde (AV)	Más amarillo que verde
4	Amarillo (A)	Totalmente amarillo
5	Muy amarillo (MA)	Amarillo intenso con trazas oscuras

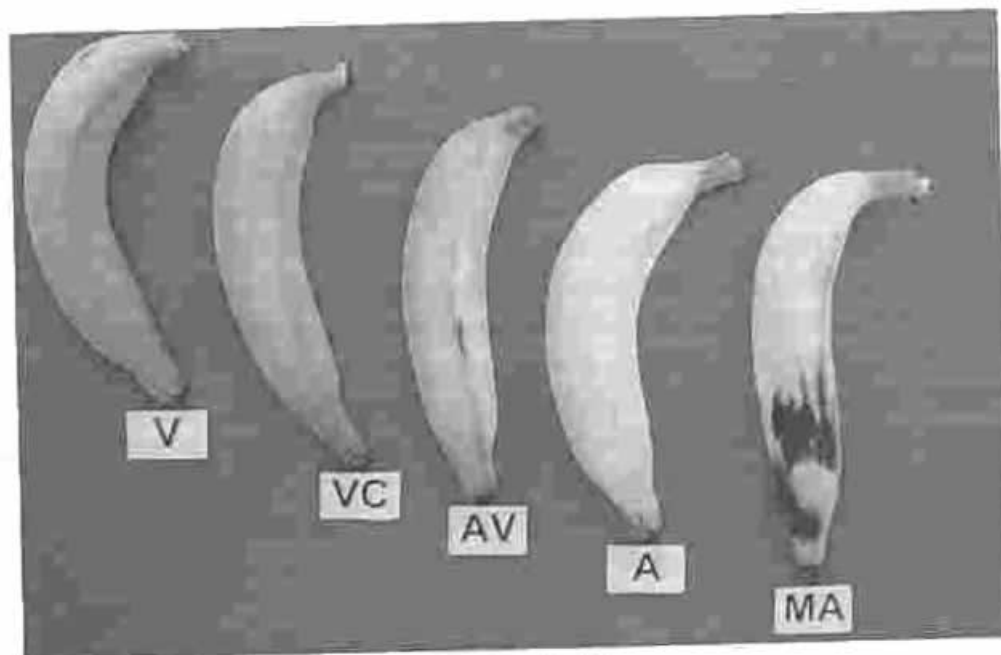


Figura 1. Escala de maduración del plátano (Domínguez-Hurtado)

El período de maduración de los frutos de plátano y banana es influenciado por la temperatura ambiental y la concentración de agua en la pulpa y cáscara (George y Marriott, 1983; Seymour *et al.*, 1987; Turner, 1994). En un estudio realizado en diferentes altitudes de la zona cafetera central colombiana (Arcila *et al.*, 1998) se observó que los frutos desarrollados en época seca maduraron más rápido que los de la época lluviosa. Durante la postcosecha el cambio de color de la cáscara del estado verde (V) al verde-claro (VC) fue más lento en los frutos provenientes de menor altitud desarrollándose en época seca. Esto se debe, posiblemente, a la influencia de las condiciones ambientales a que estuvieron sometidos los frutos, principalmente temperatura y precipitación, ya que éstas pueden afectar el cambio de color asociado con la maduración de los frutos de banana y plátano (Turner, 1994).

La comercialización del plátano en Colombia se realiza en diferentes presentaciones (racimos, manos y frutos) dependiendo de las preferencias del mercado. Estas presentaciones tienen una gran influencia sobre la vida útil del fruto, observándose que los frutos adheridos al racimo demoran más de 12 días para alcanzar el color amarillo (A), mientras que los frutos individuales lo alcanzan en menos de cinco días. Esto demuestra que el raquis ejerce una función fisiológica de sostenimiento metabólico de los frutos.

2.3.4. Aroma y sabor

El aroma característico de los plátanos y bananos maduros se debe a la combinación de compuestos volátiles, principalmente ésteres, alcoholes, aldehídos y cetonas. La concentración total de estos compuestos en el fruto de plátano es de 338 ppm (Hobson, 1996). Durante la maduración, la emisión de aromas incrementa hasta que la cáscara se torna oscura (Robinson, 1996). El sabor de los frutos está determinado por los componentes volátiles, la textura y la interacción entre azúcares reductores, no reductores y ácidos orgánicos. El amargor de los frutos inmaduros de plátano y banana está asociado con la astringencia de los compuestos fenólicos, que se encuentran localizados, principalmente, en los vasos de látex de la pulpa y cáscara. Los ácidos fenólicos proporcionan acidez, los flavanos astringencia y las flavonas amargor (Azcón-Bieto y Talon, 1996).

Los compuestos fenólicos están ampliamente distribuidos y sus funciones están relacionadas con la protección frente a heridas, con procesos de oxidación y son indicadores de la maduración del fruto pues su concentración decrece durante el proceso de maduración. Los fenoles participan en la resistencia a enfermedades ya que su concentración aumenta después de la infección y las moléculas oxidadas son potentes inhibidores de las enzimas pectolíticas relacionadas con la invasión de agentes patógenos. La pérdida de la astringencia durante la maduración se debe a la polimerización de los fenoles. Por ejemplo, la dopamina representa casi el 80% de los taninos presentes en la pulpa de frutos verdes pero disminuye durante el proceso de maduración. El oscurecimiento de la pulpa está ligado a la oxidación enzimática de los compuestos fenólicos realizados por la enzima polifenol oxidasa (PPO). La cáscara contiene el doble de polifenoles que la pulpa (Robinson, 1996). El consumo de frutos inmaduros produce una impresión de insipidez y astringencia, no solo porque no se ha producido la acumulación necesaria de azúcares solubles y compuestos aromáticos, sino porque se dificulta la ruptura y liberación de los componentes vacuolares durante la masticación (Hobson, 1996).

2.4. Cambios químicos

Cuando un fruto se separa de la planta no recibe más agua ni nutrientes y la fotosíntesis cesa, pero el proceso de respiración continúa, acompañado de

de carbohidratos en la pulpa, donde la síntesis de almidón es intensa y progresiva hasta alcanzar la madurez fisiológica. Durante el crecimiento de los frutos de plátano y banano la concentración de almidón en la pulpa aumenta hasta la madurez fisiológica y baja drásticamente (después coincidiendo esto con la aparición de los azúcares, los cuales se incrementan a medida que progresa la maduración (Simmonds, 1973; Lizana, 1976; Marral *et al.*, 1981). El contenido de azúcares es el componente mayoritario de los sólidos solubles, por lo cual estos son usados como criterio para establecer las normas de maduración de algunos frutos, y su calidad comestible suele estar mejor correlacionada con los sólidos solubles totales (Willis *et al.*, 1977).

A medida que transcurre la maduración del fruto, se sintetizan los azúcares totales, en su mayoría reductores, encontrándose muy bajos contenidos en frutos en estado verde (V), y valores alrededor del 35% en frutos maduros (A). La síntesis de azúcares es lenta después de cosechado el fruto y hasta que éste alcanza el estado verde claro (VC), correspondiente a la fase de preclimaterio; el aumento en azúcares ocurre cuando el fruto empieza a tornarse amarillo (A), acelerándose la síntesis de azúcares hasta alcanzar la coloración totalmente amarilla (Simmonds, 1973).

2.4.3. Ácidos orgánicos

Los ácidos orgánicos son esenciales para el mantenimiento del balance azúcar/ácido que confiere a los frutos de plátano y banano un gusto agradable durante la maduración (Liesecke, 1960) y pueden ser considerados como una reserva energética de los frutos ya que normalmente son degradados y convertidos a azúcares durante la maduración (Willis *et al.*, 1977). Se sabe que la mayoría de frutos tienen concentraciones elevadas de ácidos orgánicos relacionados con el ciclo de los ácidos tricarboxílicos (Ciclo de Krebs) y otras rutas metabólicas, cuyo exceso suele almacenarse en los vacuolos (Azcon-Bieto y Talon, 1996).

En plátano, la importancia fisiológica de concentrar mayor cantidad de ácido málico en los frutos radica en que éste puede servir como sustrato respiratorio necesario para las reacciones de síntesis de compuestos celulares. Los principales ácidos orgánicos en la pulpa del fruto son málico, cítrico y oxálico cuyos niveles se incrementan durante la maduración. En el fruto verde la concentración de ácido oxálico es mayor, mientras que en el fruto maduro es

el ácido málico (Palmer, 1971; Mariotti, 1980; Simmonds, 1973). En el plátano, al contrario de la mayoría de frutos, los niveles de ácidos orgánicos aumentan durante la maduración. La acidez titulable (proporción de acidez no combinada con cationes) es un parámetro bastante objetivo de la percepción detectada por los consumidores. En el plátano maduro, por ejemplo, la acidez titulable y el contenido total de ácido málico son muy similares ya que este ácido es casi el único constituyente y se encuentra mayoritariamente en forma libre. La pulpa del fruto de plátano Dominico-Hartón en estado verde contiene 0.7% del ácido málico y 1.5% en estado maduro. La cáscara en estado verde contiene 1.0% de ácido málico y 1.4% en estado maduro.

2.4.4. Proteína, fenoles y otros compuestos nitrogenados

Durante la maduración se producen cambios en la actividad enzimática que alteran las estructuras subcelulares, provocando cambios en la actividad mitocondrial, desintegración interna de los mitocondrios y pérdida de la eficiencia respiratoria. La cantidad total de compuestos nitrogenados permanece constante una vez que el fruto es arrancado de la planta, pero se presenta un ligero incremento neto en la proteína durante la maduración de algunos frutos. Algunos cambios en las rutas metabólicas observadas durante la maduración, entre ellos el aumento de la actividad de la enzima málica y la carboxilasa pirúvica, pueden explicar el aumento climatérico de la producción de CO₂ que ocurre en los frutos de plátano. La concentración de proteína bruta en la pulpa de los frutos de plátano es baja y similar a la de los bananos Cayendish. Morales *et al.* (1995), encontraron que el contenido de proteína bruta es mayor en la pulpa que en la cáscara durante los primeros estados de crecimiento del fruto de Dominico-Hartón, disminuyendo en la cosecha hasta alcanzar valores de 2.9% en la pulpa y 11.5% en la cáscara. Asiedu (1987) reportó un incremento de 24.1% en el contenido de proteína bruta de la pulpa de plátano durante la maduración como consecuencia de la conversión de enzimas y la síntesis de proteínas.

La pulpa del plátano, como muchos otros frutos, es susceptible al pardeamiento cuando es cortada o tajada, fenómeno directamente relacionado con niveles de ácido ascórbico, contenido de polifenoles, actividad de la enzima polifenol oxidasa (PPO) o a una combinación de estos factores (Golán *et al.*, 1997; Walter y Purcell, 1980).

En un estudio sobre los cambios en la composición química y actividad de la enzima PPO que acompaña el proceso de maduración de la pulpa de los frutos de plátano (Tabla 6), se encontró que la actividad de la enzima, el potencial de pardeamiento y el total de polifenoles fueron menores en la pulpa verde y se incrementaron hasta el estado de sobremaduración (MA). El grado de pardeamiento de la pulpa está correlacionada positivamente con la concentración total de polifenoles y la actividad de la PPO. La pulpa madura, más susceptible al pardeamiento presentó menores niveles de carotenoides y ácido ascórbico comparada con la pulpa verde que es menos susceptible al pardeamiento.

Tabla 6. Cambios en la actividad de la enzima polifenol oxidasa (PPO) y otros factores endógenos de la pulpa de plátano en diferentes estados de maduración (Giami y Dismas, 1994).

Factor	Estado de maduración		
	Verde	Madura	Sobremadura
Actividad PPO (unidades/g peso fresco)	21,1	85,3	44,3
Grado de pardeamiento (A450 en 3 h)	0,35	0,67	0,47
Ácido ascórbico (mg/100 g)	18,7	15,0	11,4
Polifenoles totales (mg/100 g)	19,9	60,89	51,0
Carotenoides totales (mg/100 g)	14,2	9,9	6,7

La adición de compuestos reductores, que transforman las quinonas en fenoles, permite retardar o impedir el pardeamiento enzimático. El compuesto más frecuente es el ácido ascórbico, pero se requieren grandes cantidades de éste (0,5 - 1,0% del peso del producto). En esas condiciones, la PPO sería

inactivada antes de que el ácido ascórbico desaparezca del medio. Resulta muy eficaz la inactivación de enzimas por calor, pero modifican las características organolépticas del producto. La congelación y deshidratación afectan la integridad del tejido vegetal y por tanto favorecen el pardeamiento enzimático. Contra la acción de la PPO resulta eficaz la desoxigenación que se obtiene por vacío, pero resulta complicado y costoso. (Flurkey y Jen, 1978)

2.4.5. Minerales

Los frutos de las musáceas se caracterizan por tener un contenido de minerales importante. La concentración de la mayoría de elementos minerales es mayor en la pulpa de los frutos de plátano que de banano (Offen y Thomas, 1993). Según Belalcázar *et al.* (1991), la pulpa seca del fruto de plátano al momento de la cosecha contiene 0,28% de nitrógeno (N), 0,07% de fósforo (P), 1,1% de potasio (K), 0,06% de calcio (Ca), 0,12% de magnesio (Mg), 20 - 40 ppm de hierro (Fe) y 2,5 ppm de zinc (Zn). El contenido total de N en la pulpa permanece constante una vez que el fruto ha sido removido de la planta madre y es extremadamente bajo en los frutos maduros. El contenido promedio de minerales en el fruto entero de banano es solo del 5,3%, del cual un 80% está en forma de K⁺, lo cual parece deberse a que el K⁺ tiene una función importante en la síntesis de almidón a partir de sacarosa durante el desarrollo de los frutos (Salisbury y Ross, 1994). Llanes *et al.* (1990), reportaron como bajos contenidos de calcio en la pulpa del orden de 0,17 a 0,23%.

En la Tabla 7 se puede apreciar que la mayor concentración de elementos minerales del racimo se encuentra en el raquis y en la cáscara de los frutos, indicando que estos subproductos tienen un gran potencial de uso como fuente de abono orgánico y como materia prima para la elaboración de alimentos para animales o productos industriales (Cayón y Bolaños, 1999).

Tabla 7. Composición mineral del fruto y raquis del racimo del clon Dominico-Hartón. (Cayón y Bolaños, 1999)

Elemento	Pulpa	Cáscara	Raquis
Nitrógeno (%)	0,3	0,8	1,1
Fósforo (%)	0,1	0,18	0,2
Potasio (%)	1,2	3,4	3,1
Calcio (%)	0,2	0,5	0,6
Magnesio (%)	0,2	0,2	0,2
Manganeso (ppm)	3	12	23
Zinc (ppm)	11	33	27
Cobre (ppm)	5	11	9
Hierro (ppm)	31	82	204

2.4.6. Fibra

Las paredes celulares de los vegetales se encuentran constituidas por celulosa y hemicelulosa, compuestos importantes en el desarrollo de fibra. Las hemicelulosas son grupos heterogéneos de polisacáridos capaces de formar enlaces de puentes de hidrógeno con celulosa y pueden contener numerosas hexosas y pentosas unidas. La pulpa de los frutos de plátanos y bananos contienen bajas concentraciones de fibra (0,84%) que no cambian durante la maduración (Robinson, 1996; Stover y Simmonds, 1987). En la zona cafetera colombiana, la pulpa de los frutos de plátano Dominico-Hartón presenta 0,8% de fibra y la cáscara 7,7%.

2.4.7. Vitaminas

En la Tabla 8 se puede observar que los frutos de plátano y banano son fuentes de vitaminas, sobresaliendo significativamente el plátano por el contenido de vitamina A que supera el de otros frutos tropicales.

Tabla 8. Contenido de vitaminas (mg /100 g) en la pulpa de plátano y banano comparado con otros frutos tropicales (Adaptado de Robinson, 1996).

Frutos	Vitamina A	Vitamina B1 (Tiamina)	Vitamina C
Plátano	0,20	0,05	20
Banano	0,03	0,04	10
Naranja	0,06	0,07	53
Mango	0,30	0,03	30
Aguacate	0,09	0,07	15
Papaya	0,30	0,03	50
Guayaba	0,10	0,05	300
Piña	0,03	0,09	50

2.4.8. Pigmentos

Los pigmentos más característicos de los vegetales pertenecen a tres grandes grupos: clorofilas (verdes liposolubles), carotenoides (amarillos, betacaroteno y licopeno liposolubles) y antocianinas (rojas y azules hidrosolubles). Marcados cambios en la pigmentación del fruto generalmente acompañan el aumento climático de la respiración. El cambio de color de la cáscara durante la maduración se debe, fundamentalmente, a la degradación lenta de la clorofila (Palmer, 1971), revelando gradualmente la presencia de otros pigmentos como carotenos y xantofilas. La percepción visual del cambio de color verde, ocurre después que el 60 a 70% de la clorofila se ha degradado. La tasa relativa de pérdida de la clorofila durante la maduración de plátanos (0,9 mg cm⁻² día⁻¹) es mucho mayor que la de bananos (0,6 mg/ cm²/ día⁻¹) y no es afectada significativamente con temperaturas entre 21 y 35°C (Seymour *et al.*, 1987). Este proceso ocurre rápidamente a temperaturas controladas de maduración (16-18°C) pero cuando la maduración se desarrolla bajo condiciones ambientales de temperatura (>25°C), la degradación de la clorofila cesa mientras que la pulpa continúa madurando (Robinson, 1996). La tasa de cambio del color de la cáscara depende del estado de madurez de cosecha, temperatura y otros factores ambientales.

En la mayoría de frutos, la conversión de cloroplastos a cromoplastos que

ocurre durante la maduración, va acompañada de la síntesis de una o varias clases de pigmentos, generalmente antocianinas o carotenoides (Hobson, 1996). Los carotenoides también están presentes en los frutos verdes de plátano, pero su síntesis se suspende durante la maduración. Las temperaturas altas incrementan la concentración de carotenoides y mantienen estable la clorofila en la cáscara reteniendo los frutos su color verde. Este mecanismo por el cual las temperaturas altas tienden a estabilizar la clorofila en la cáscara durante la maduración es aún desconocido (Turner, 1994). En Puerto Rico se han reportado contenidos de caroteno de 1,040 g/100g en plátano verde y de 670 g/100g en plátano maduro (Asenjo y Porrata, 1956).

2.4.9. Lípidos

Como la mayoría de frutos tienen un bajo contenido de lípidos, el posible papel de estos compuestos como sustratos durante la respiración climatérica ha sido considerado secundario. El contenido de lípidos en la pulpa de los frutos de plátano es bajo y similar a la de los bananos Cavendish y permanecen constantes durante el proceso de maduración (Simmonds, 1973). El 45% de los ácidos grasos de los lípidos son saturados, siendo el ácido linolénico el principal componente. La concentración total de lípidos en la pulpa fresca es de 0,2 - 0,5% y en la cáscara fresca es de 1%. (Robinson 1996; Stover y Simmonds 1987).



CAPÍTULO

3

ENFERMEDADES Y PLAGAS DEL FRUTO