

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Fresa: Generalidades

La fresa (Fig. 1) o *Fragaria spp.* pertenece la familia de las *Rosaceae* en el género *Fragaria*. Es originaria de las regiones templadas del mundo y se caracteriza por tener tallos rastreros, nudosos y con estolones, hojas grandes trifoliadas, pecioladas, blancas y frutos rojos aromáticos (SAGARPA, 2005).



Figura 1. Cultivo de fresas. (*Fragaria x ananassa* cv. Festival)

Existen varias especies (Fig. 2) entre las cuales están las oriundas de Europa como la *F. vesca*, *F. moschata duchesne* y *F. virides duchesne* que cuentan con frutos pequeños, y las nativas de Norte América como la *F. chiloensis duchesne* y *F. virginiana duchesne* cuyos frutos son más grandes (SAGARPA, 2005); de la hibridación de estas especies surgieron nuevos cultivos como los fresones (Anónimo, 1998).

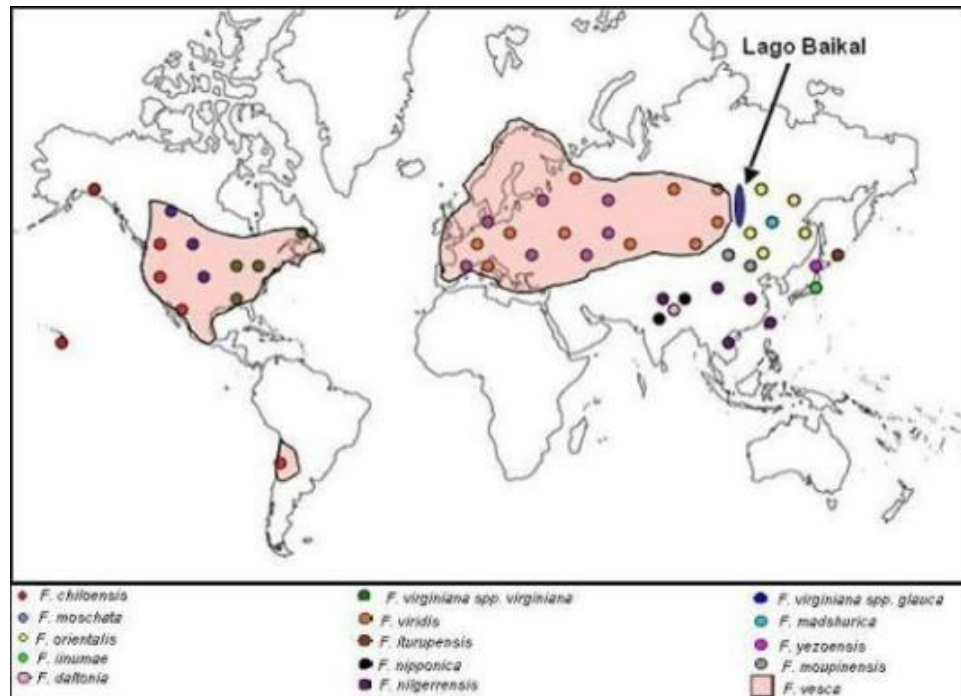


Figura 2. Distribución de las diferentes variedades de fresa a nivel mundial. Adaptado de Davis, 2000.

En México el cultivo de esta fruta se empezó con plantíos de variedades originarias de Lyon, Francia en el estado de Guanajuato; y en 1950, gracias a la demanda de EUA para complementar su abastecimiento durante el invierno, estas plantaciones empezaron a tomar mayor auge. Hacia finales de los años 80's la producción de fresa ya se había establecido en otros estados de la República como Michoacán, y se comenzaron a comercializar mejores variedades de este fruto, las cuales se siguen produciendo actualmente, como la Pájaro o Pico de Pájaro, Chandler, Selva, Oso grande, Seascape, Camarosa, Parker, Fern, entre otras (Anónimo, 1998).

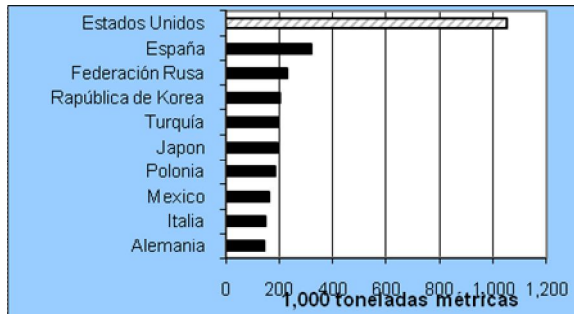


Figura 3. Principales productores de fresa a nivel mundial. (Roberts, 2005)

Actualmente la fresa representa un mercado de casi 3 millones de toneladas métricas con un valor de exportación de más de 1 billón de dólares a nivel mundial, donde México figura como el 8° productor (Fig. 3) y 3° exportador (Fig. 4) de esta fruta con una participación de poco más de 87 millones de dólares en 2005 ó 52 mil toneladas métricas de las 162 mil producidas (Roberts, 2005). De este volumen, el 95% se exporta a EUA (SAGARPA, 2005) y que para 2007, de acuerdo al reporte del Servicio de Información Agroalimentario y Pesquera o SIAP (2008), tuvo un incremento para un total de fresa exportada de más de 124 millones de dólares.

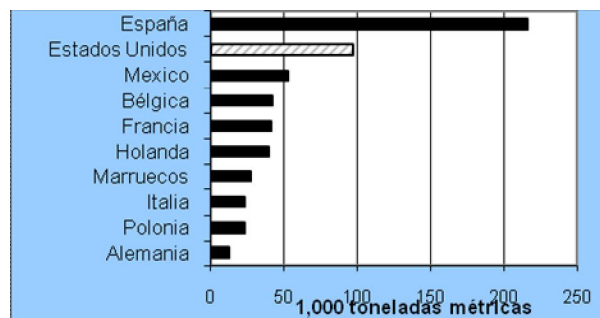


Figura 4. Principales exportadores de fresa a nivel mundial. (Roberts, 2005)

Dentro de la República Mexicana (Fig. 5), los principales estados productores son Michoacán, Guanajuato y Baja California, donde el primero

se considera la entidad con mayor participación, ya que cuenta con el 51% de la superficie sembrada, el 55% en cosechada y el 52% en la producción (Anónimo, 1998).

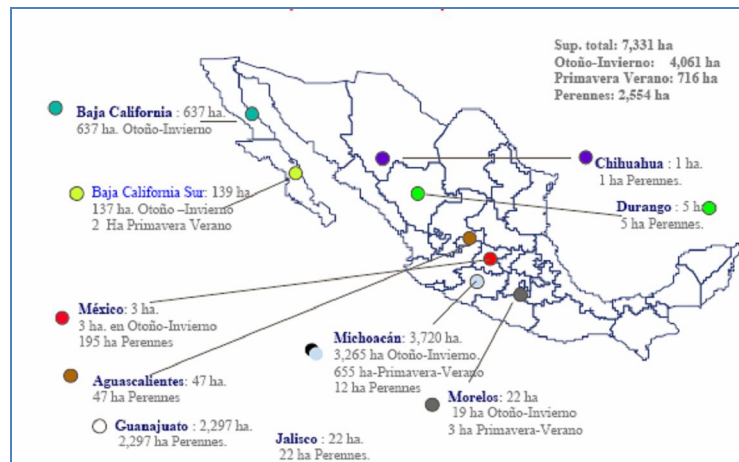


Figura 5. Principales estados productores de fresa en México (SAGARPA, 2005).

4.1.1 Características y propiedades de la fresa

Las fresas en realidad no son frutas, sino el final alargado del estambre de la planta; cuentan con más de 200 semillas en su piel las cuales no constituyen el medio normal de reproducción del vegetal ya que éste se reproduce por medio de un estolón (Institute of Food and Agricultural Science (IFAS) Agriculture Business Center, 2008). Estas “frutillas” pueden tener diferentes tamaños y formas (Fig. 6) dependiendo de la variedad, los más comunes son: achatada, esférica-cónica y de cuello cónico alargado (Darrow, 1966). Se cosecha generalmente a mano, ya que es un fruto susceptible a daño, y su producción sigue el proceso señalado en la figura 7.

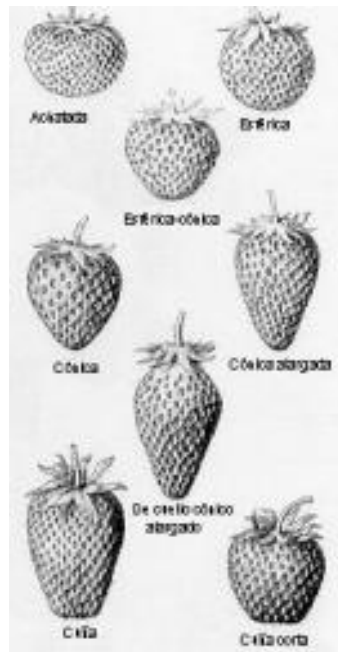


Figura 6. Formas y tamaños de la fresa. Adaptado de Darrow, 1966.

Después de la cosecha se recomienda llevarla a bajas temperaturas lo más pronto posible ya que el fruto sin tratar solo cuenta con una vida de 2 o 3 días, esto por lo general se logra por medio de aire forzado a 34°F (The California Strawberry Commission (CSC) y The California Minor Crops Council (CMCC), 2003) y después se recomienda mantenerlo en condiciones atmosféricas óptimas (90-95% HR, 5-10% O₂ y 15-20% CO₂) y temperatura adecuada (0°C) para que el producto tenga una vida útil que oscile entre los 7-10 días (Siller-Cepeda *et al.*, 2002).

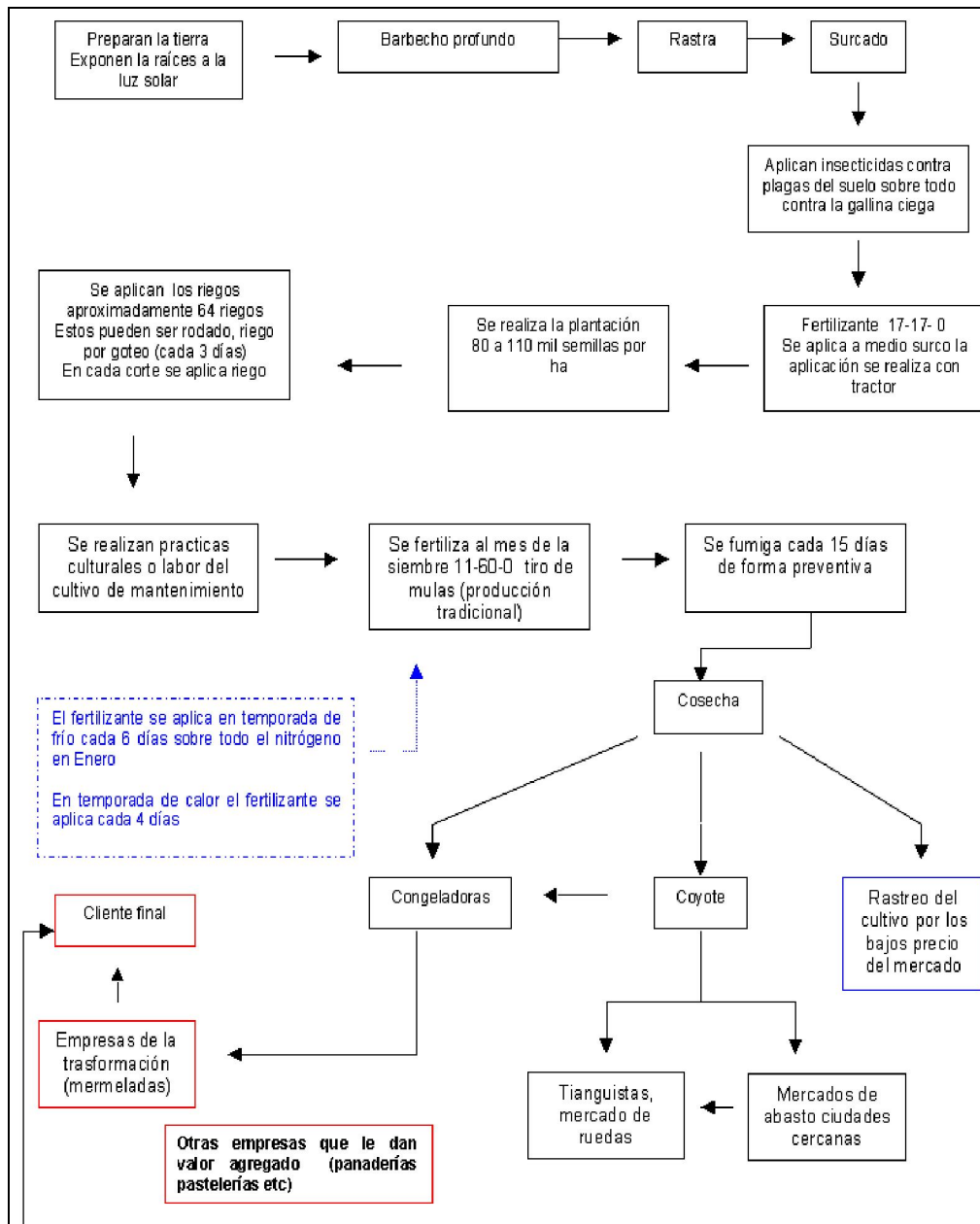


Figura 7. Cadena de producción de fresa (SAGARPA, 2005).

La fresa se caracteriza por tener sabores dulce ácido, debido a que cuenta con una variedad de azúcares y ácidos orgánicos, cuya concentración oscila dependiendo de la variedad (Tabla I).

Tabla I. Cantidad de azúcares (°Brix), pH y acidez titulable de algunas variedades de fresa. Adaptado de Yorgey et al., 2001.

<i>Variedad</i>	<i>°Brix</i>	<i>pH</i>	<i>Acidez titulable (% ácido cítrico)</i>
Benton	11.64	3.37	1.09
Firecracker	9.74	3.43	1.36
Gaviota	6.57	3.76	0.50
Hood	12.37	3.45	0.98
Puget Reliance	11.39	3.38	1.12
Puget Summer	12.34	3.42	1.32
Redcrest	13.36	3.20	1.63
Sweet Charlie	9.89	3.58	0.97
Totem	10.64	3.46	0.95

La fresa cuenta con una gran variedad de micronutrientes funcionales (Tabla II) como la vitamina C, folato y fibra, además de una serie de fitonutrientes como las elagitaninas y quercetina que tienen efectos preventivos contra enfermedades cardiovasculares, cáncer y pérdida cognoscitiva (Ross, *et al.* 2007; Mertens-Talcott, *et al.* 2006; Seeram, *et al.* 2006; Zhaoping, 2006; CSC, 2008; Oregon State University (OSU), 2008 y Burton-Freeman, 2006); mientras que las antocianinas, responsables de su coloración roja, son eficientemente absorbidas por el cuerpo y tienen efectos antioxidantes (OSU, 2008), gracias a este efectos los compuestos muestran una acción preventiva contra enfermedades cardiovasculares e infartos, inhiben el crecimiento de tumores y tienen efectos anti cancerígenos; algunos otros son utilizados para mejorar la agudeza visual y tratar desórdenes circulatorios, diabetes y úlceras, además de que tienen propiedades anti inflamatorias aparte de actividad antiviral y antimicrobiana (Wrolstad, 2001).

Tabla II. Micronutrientes funcionales de la fresa (Adaptado de OSU, 2008).

Substancia	Unidad	Cantidad	Beneficio
Alanina	µg/g	310	AA (amino ácido) componente de proteínas
Acido Alfa – Linolénico	µg/g	780	Acido graso Omega 3 encontrado en sus semillas
Alfa-caroteno	µg/g	0.05	Carotenoide, similar al beta-carotene, puede transformarse en vit A, antioxidante, anti cancerígeno.
Alfa-tocoferol	µg ATE/g	1.4	Vitamina E, antioxidante
Antocianina	µg/100g	450-1,000	Antioxidante, protege membranas
Arginina	µg/g	260	A A, puede afectar las funciones inmunológicas
Acido ascórbico	µg/g	567	Vitamina C, antioxidante
Boro	µg/g	1-160	Posible rol en el mantenimiento de huesos y puede necesitarse para funciones de la membrana
Acido caféico	µg/g	2	Antioxidante
Calcio	µg/g	140	Mantiene los huesos y dientes, involucrado en neurotransmisión y contracción en músculos
Cromo	µg/g	0.005-0.18	Trabaja con la insulina para regular el nivel de azúcar en la sangre
Acido coumárico	µg/g	14-27	Antioxidante
Acido elágico	µg/g	570	Anti cancerígeno
Acido ferúlico	µg/g	2	Antioxidante
Fibra	µg /g	23	Ayuda a reducir el colesterol
Flavonoides	µg/g	35-79	Antioxidante , incluye quercetina y kaempferol
Acido fólico	µg/g	0.18	Necesario para la formación de células rojas, división celular y síntesis de proteínas
Acido gálico	µg/g	80-121	Antioxidante
Histidina	µg/g	120	AA esencial
Yodo	µg/g	0.157-0.23	Necesario para el funcionamiento correcto de la tiroides
Hierro	µg/g	3.8	Constituyente de la hemoglobina, ayuda a transportar oxígeno en el cuerpo y previene la anemia
Isoleucina	µg/g	140	AA esencial
Leucina	µg/g	310	AA esencial
Luteína	µg/g	0.3-3	Carotenoide, importante para la visión
Lisina	µg/g	250	AA esencial
Magnesio	µg/g	100	Necesario en los sistemas enzimáticos involucrados en la producción de energía
Manganeso	µg/g	2.9	Co-factor en sistemas enzimáticos involucrados en la formación de huesos, producción de energía y metabolización
Metionina	µg/g	10	AA esencial
Acido pantoténico	µg/g	3.4	Importante en el metabolismo del nervio y cerebro
Fósforo	µg/g	190	Mantiene huesos y dientes fuertes
Riboflavina	µg/g	0.7	Libera energía de los alimentos, necesario para tener piel y ojos sanos
Acido salicílico	µg/g	13.6	Puede ayudar a reducir el riesgo de coágulos en la sangre y enfermedades cardiovasculares
Selenio	µg/g	0.007	Antioxidante, protege a la vitamina E
Silicon	µg/g	10-270	Puede ser importante en la estructura y crecimiento de los huesos
Tiamina	µg/g	0.2	Necesaria para liberar la energía de los alimentos y el funcionamiento del sistema nervioso
Treonina	µg/g	190	AA esencial
Triptofano	µg/g	70	AA esencial
Valina	µg/g	180	AA esencial
Vitamina B-6	µg/g	0.6	Importante en el metabolismo de proteínas y grasas
Zinc	µg/g	0.33	Importante en la síntesis de proteínas, cicatrización y crecimiento

4.1.2 Respiración y madurez de la fresa

La maduración es el resultado de una red compleja de cambios, muchos de los cuales ocurren independientes uno del otro (Tabla III). Este proceso transforma una fruta fisiológicamente madura pero aún no comestible en una con una sensación organoléptica satisfactoria, marcando el fin del desarrollo de la fruta y el principio de su senescencia (Wills *et al.*, 1982).

Tabla III Cambios que pueden ocurrir durante la maduración (Adaptado de Wills, *et al.* 1982).

<i>Cambios ocurridos durante la maduración de frutos</i>
Maduración de las semillas
Cambios de color
Desprendimiento de la planta madre
Cambios en la tasa de respiración
Cambios en la tasa de producción de etileno
Cambios en la permeabilidad del tejido
Ablandamiento: cambios en la composición de sustancias pécticas
Cambios en la composición de carbohidratos
Cambios en los ácidos orgánicos
Cambios en las proteínas
Producción de volátiles (sabor)
Desarrollo de piel cerosa

La mayoría de los cambios fisicoquímicos que ocurren en las frutas cosechadas están relacionados con el metabolismo oxidante, e incluso la respiración. En la respiración se encuentran tres fases: descomposición de polisacáridos en azúcares simples, la oxidación de azúcares simples en ácido pirúvico y la transformación aeróbica de piruvato y otros ácidos

orgánicos en CO₂, agua y energía (Pantastico, 1975). La figura 8 muestra algunas de estas reacciones.

La evaluación de la respiración puede medirse determinando las pérdidas que experimenta el sustrato, la cantidad de O₂ consumida, la de CO₂ liberada, calor producido y energía desarrollada. Con las mediciones de CO₂ y O₂ es posible evaluar la naturaleza del proceso.

La proporción CO₂ a O₂ se denomina *cociente de respiración* (CR), el cual es útil para deducir la naturaleza del sustrato, que tan completa y el grado en que el proceso es anaeróbico o aeróbico. Cuando CR es igual a 1 si los metabolitos son azúcares, >1 cuando el sustrato está oxigenado, es decir, se usan ácidos orgánicos que requieren menos O₂ para la evolución de una cantidad comparable de CO₂ y <1 si el sustrato tiene una proporción de oxígeno a carbono menor que una hexosa, la oxidación no es completa o el CO₂ formado se utiliza en otros procesos de síntesis.

Estos valores deben estimarse cuando la tasa de respiración llegue a la uniformidad, ya que pueden ser afectados por numerosos factores (Pantastico, 1975).

Dependiendo de la tendencia en la tasa de respiración las frutas pueden clasificarse como climatéricas (Fig. 9 y Tabla IV), las cuales tienen un pico respiratorio característico, y no climatéricas, las cuales carecen de éste (Wills *et al.*, 1982).

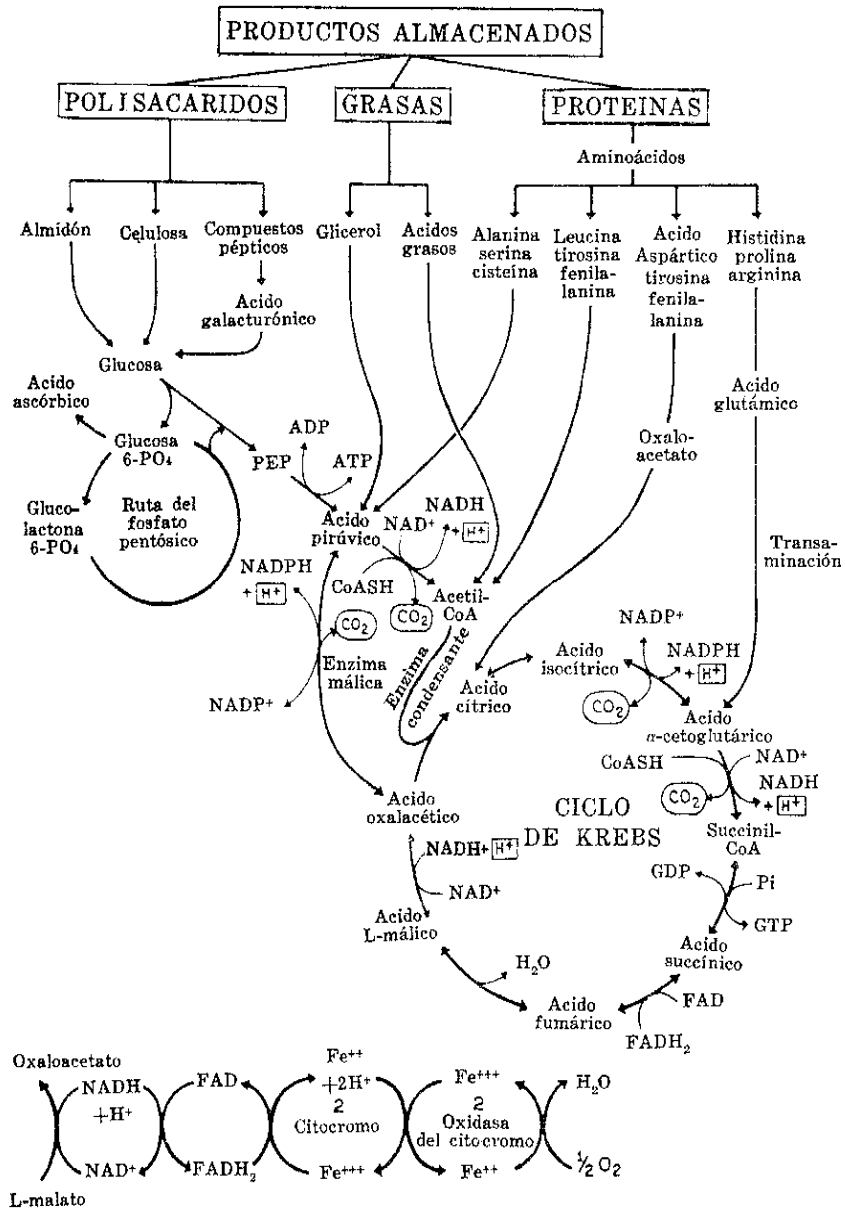


Figura 8 Reacciones ocurrientes durante la respiración de plantas. Pantastico (1975)

De acuerdo con la tabla IV, la fresa es una fruta no climatérica, esto es que no solo no tiene un rápido incremento en la tasa de respiración durante la maduración (Fig. 9), sino también que no presenta, en algún

punto de su línea de desarrollo, un ascenso en su tasa de respiración, con un ascenso análogo en la producción de etileno (Pantastico, 1975).

Tabla IV Clasificación de algunos frutos en climatéricos y no climatéricos (Adaptado de Wills, *et al.* 1982).

<i>Frutas climatéricas</i>	<i>Frutas no-climatéricas</i>
Aguacate (<i>Persea americana</i>)	Cereza: Dulce (<i>Prunus avium</i>)
Banana (<i>Musa spp.</i>)	Agria (<i>Prunus cerasus</i>)
Chabacano (<i>Prunus armeniaca</i>)	Fresa (<i>Fragaria spp.</i>)
Chirimoya (<i>Annona cherimolia</i>)	Limón (<i>Citrus limonia</i>)
Ciruela (<i>Prunus sp</i>)	Mandarina satsuma (<i>Citrus reticulata</i>)
Durazno (<i>Prunus persica</i>)	Mora azul (<i>Vaccinium corumbosum</i>)
Feijoo (<i>Acea sellowiana</i>)	Naranja dulce (<i>Citrus sinensis</i>)
Gooseberry china (<i>Actinidia chinensis</i>)	Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)
Higo (<i>Fleus carica</i>)	Piña (<i>Ananas comosus</i>)
Mango (<i>Mangifera indica</i>)	Tomatillo (<i>Cyphomandra betacea</i>)
Manzana (<i>Malus sylvestris</i>)	Uva (<i>Vitris vinifera</i>)
Melón musk (<i>Cucumis melo</i>)	
Papaya (<i>Carica papaya</i>)	
Pera (<i>Pyrus communis</i>)	
Persimmon (<i>Diospyros kaki</i>)	
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	
Sandía (<i>Citrullus lanatus</i>)	

Debido a que la fruta continúa su respiración después de la cosecha, los cambios fisicoquímicos avanzan, terminando en la senescencia y muerte del fruto. El estudio y prolongación del tiempo en que se dan dichos cambios es muy importante para la prolongación de la vida de anaquel (Potter, 1986).

Los cambios que se dan se pueden generalizar en un decaimiento en la cantidad de almidón que, por su desdoblamiento debido a actividad

enzimática, culmina en un aumento en la cantidad de azúcares del sistema (Potter, 1986).

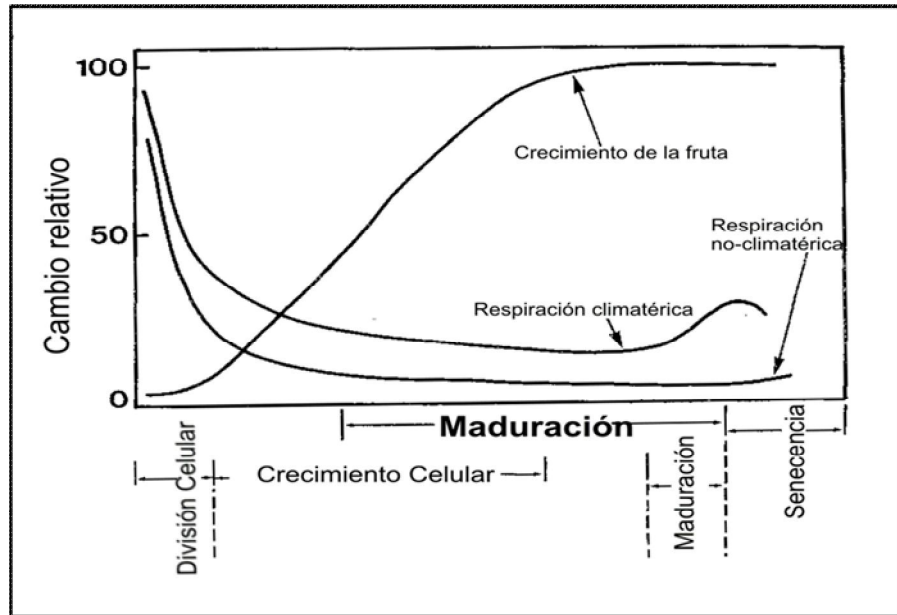


Figura 9 Cambios de la fruta a diferentes etapas. Adaptado de Wills *et al.*, (1982).

La textura durante la maduración se ve afectada en tres niveles: molecular, celular y orgánico. En el nivel molecular, la naturaleza química de la pared celular e interacción entre los biopolímeros que la constituyen son factores determinantes de la textura. En la senescencia y desarrollo de la planta, la modificación de dichos polímeros resulta en cambios contribuyentes a las propiedades de textura percibidas. Estos cambios pueden llevar a la deterioración de la textura y palatabilidad de la fruta que resultan ya sea en ablandamiento o endurecimiento, y aunque no se ha llegado a concluir con exactitud el mecanismo, es generalmente aceptado que los cambios enzimáticos en la pared contribuyen a la textura del producto final (Van Dijk y Tijssens, 2000).

En el nivel celular, los factores determinantes de la textura son la arqueoestructura de los tejidos, compuesta por el grosor de la pared celular, tamaño, forma y adhesión de la célula, y organización de los tejidos. Donde una célula larga tiene un menor radio superficie/volumen, y dicho incremento en volumen afectará la textura; por otro lado la adhesión célula-célula determina el punto de ruptura del vegetal en la aplicación de una fuerza, donde, para una adhesión baja la ruptura se da entre paredes celulares que mantiene la integridad de la célula; mientras que una gran fuerza de adhesión provocara una ruptura de tejido a través de la célula lo que provocará que el contenido celular se libere y se afecten tanto la textura como el sabor del vegetal (Van Dijk y Tijskens, 2000).

Para el nivel orgánico se utiliza la medición reológica y/o análisis sensorial. Sin embargo, el cambio de las propiedades en textura depende en primera instancia tanto del nivel molecular como el celular, los cuales se reflejan en el orgánico. Aunque no hay una clara explicación de cómo sucede con exactitud este cambio en propiedades, es generalmente aceptado que no se puede explicar con información proveniente de un solo nivel, sino con la interacción de todos. Así la textura de los vegetales es el producto de un conjunto de fuerzas físicas originadas por los siguientes procesos o propiedades (Van Dijk y Tijskens, 2000):

- Presión de turgor dentro de la célula intacta y asociado con la tensión del tejido
- Compuestos especiales dentro de la célula que generan fuerza (ej. Almidón)

- Fuerzas cohesivas en la célula: propiedades químicas de la pared celular
- Fuerzas de adhesión entre células: propiedades de la pectina.
- Estructura general y forma de células separadas
- Estructura general y forma de tejidos: fuerza y distribución

Dependiendo de la ocurrencia e importancia relativa de dichos fenómenos se pueden dar varios escenarios (Van Dijk y Tijskens, 2000):

- Cuando solo la tensión de tejido (turgor) se presenta como fenómeno principal, los productos son suaves y jugosos perdiendo textura durante su procesamiento, como las fresas.
- Con las fuerzas de la pectina como dominantes, los productos tienden a ser esencialmente crujientes y jugosos. Cualquier ruptura se da a través de la célula y el jugo se libera. Este es el caso de las manzanas.
- Si las fuerzas de pared celular predominan, los productos son, en esencia, secos y harinosos, por lo que una ruptura se da entre paredes celulares, lo que permite que el contenido de jugo se queda dentro de la célula.
- Para una dominación de tejido vascular, el vegetal es duro y fibroso como los espárragos.

Otro factor importante en el cambio de textura es la disminución en la cantidad de pectina insoluble en agua, correspondiente a un aumento en

pectina soluble en agua; esto contribuye al ablandamiento gradual de los vegetales. De manera adicional, la viscosidad del gel de pectina se ve afectada por los ácidos y azúcares, los cuales cambian su concentración con la maduración (Potter, 1986).

La reducción de la cantidad de ácidos orgánicos de las frutas durante el almacenamiento y maduración influye también de manera importante en la textura. En consecuencia, debido a la susceptibilidad de la mayoría de los pigmentos, el color cambia conforme al contenido de ácido (Potter, 1986).

En el caso de la fresa esta pigmentación está dada por las antocianinas, que son un grupo de compuestos solubles en agua, pertenecientes a los flavonoides y responsables de los colores brillantes como naranjas, rojos y azules. En estos compuestos un aumento en el grado de hidroxilación da una coloración azul, mientras que la formación de glicósidos y metilación resultan en colores rojos; esto es, el color de las antocianinas cambia con el pH del medio como resultado del equilibrio establecido entre dos especies con color: el cation flavilium (AH^+) y la base quinoidal (A); y dos sustancias incoloras, la pseudobase cardinal (B) y calcona (C), resultando en la hidratación AH^+ ; así a pH's bajos el color es rojo, cercanos a 7 es morado y para mayores a 7, azul intenso (Dorantes-Alvarez y Chiralt, 2000).

4.1.3 Plagas y enfermedades de la fresa

Debido a que las fresas son extremadamente sensibles al ataque de plagas y enfermedades, que además están conformadas por un gran número de microorganismos e insectos, su cuidado y manejo son muy complejos y constituyen un reto (CSC y CMCC, 2003) . Las infestaciones que afectan a la fresa pueden clasificarse (Fig. 10) en insectos y arañas, enfermedades, nemátodos y maleza (University of California in Davis (UC Davis), 2005).

La gran mayoría de estas infestaciones son tratadas y eliminadas durante la pre-cosecha, sin embargo existen enfermedades que son de gran importancia en la post-cosecha y que no tienen un tratamiento químico (excepto fumigación con MeBr) para su erradicación y pueden causar grandes pérdidas. La más común y es el moho gris *Botrytis cinerea* (Fig. 11), ya que este microorganismo posee la habilidad de crecer a bajas temperaturas que son empleadas en el almacenamiento de la fruta (CSC y CMCC, 2003; UC Davis, 2005).

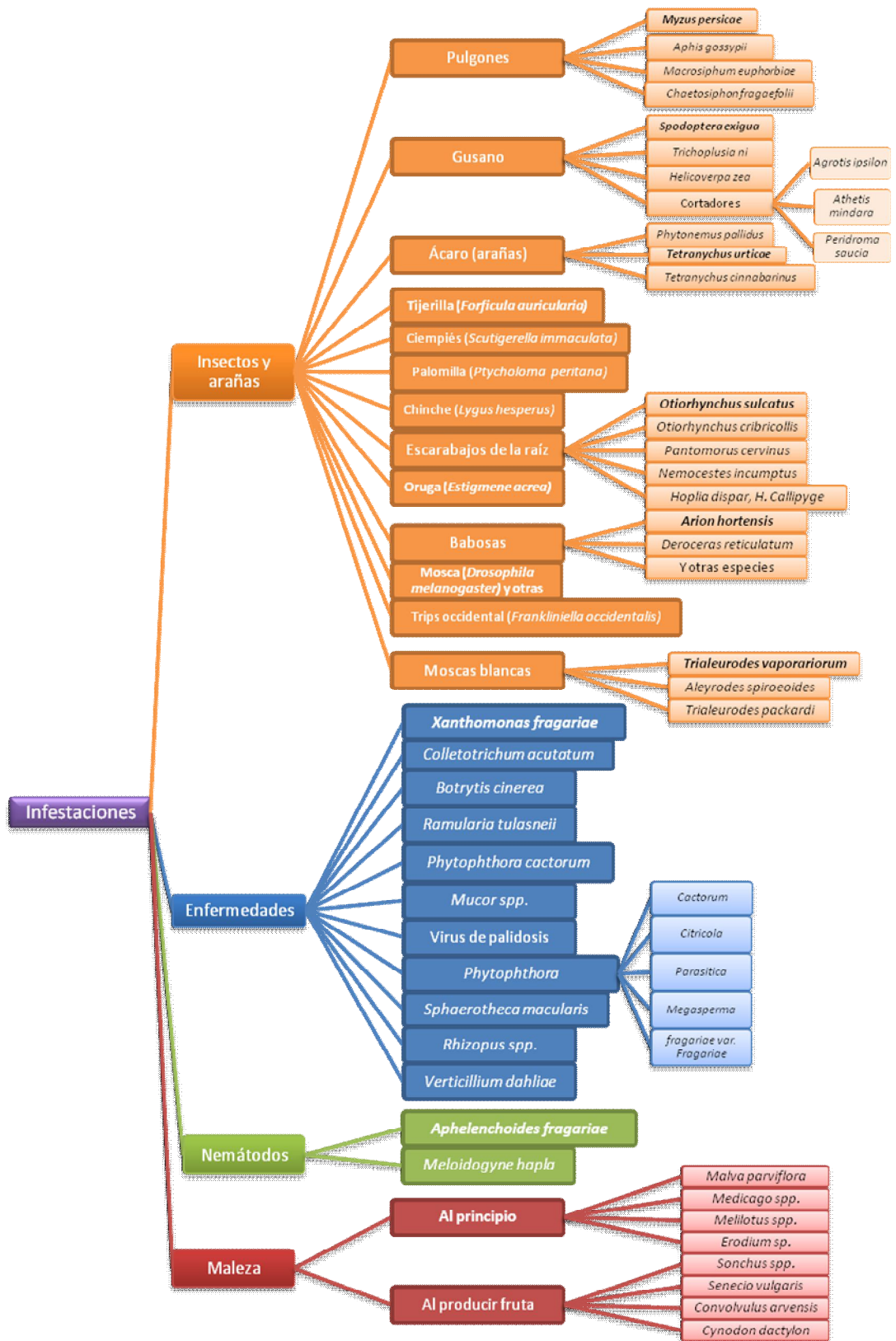


Figura 10. Plagas que atacan a la fresa. Adaptado de UC Davis, 2005.

La infección por este organismo, al igual que otros, se da en las primeras etapas de cultivo donde puede reducir el valor de la cosecha en un 40% si no se usan métodos químicos de control y las pérdidas pueden ser hasta del 60% si la enfermedad es severa lo cual representaría el 100% en pérdida económica. Sin embargo, puede suceder que los síntomas no se presenten hasta la cosecha y almacenamiento, donde la contaminación puede esparcirse rápidamente representando pérdidas totales del producto. Los únicos métodos para controlar esta enfermedad son preventivos e incluyen la remoción de fruta descompuesta, enfriamiento inmediatamente después de la cosecha y mantenimiento de las condiciones de almacenamiento adecuadas, tanto en temperatura como en composición de gases atmosféricos (CSC y CMCC, 2003; UC Davis, 2005).



Figura 11. Fresa contaminada con *Botrytis cinerea* en dos diferentes etapas de la enfermedad: temprana (a) y avanzada (b) (UC Davis, 2005).

Otras enfermedades post-cosecha son causadas por cepas de *Rhizopus spp* (Fig. 12a) y *Mucor spp* (Fig. 12b) cuyas esporas pueden ser acarreadas por el aire o insectos de las hojas a la fresa, sin embargo la infección solo puede tener lugar si hay alguna herida en la cual la se pueda

asentar. Como métodos de prevención se utilizan plásticos que limitan el contacto con suelos y plantas contaminadas, enfriado después de su cosecha y mantenimiento de las condiciones de almacenamiento adecuadas (CSC y CMCC, 2003; UC Davis, 2005).

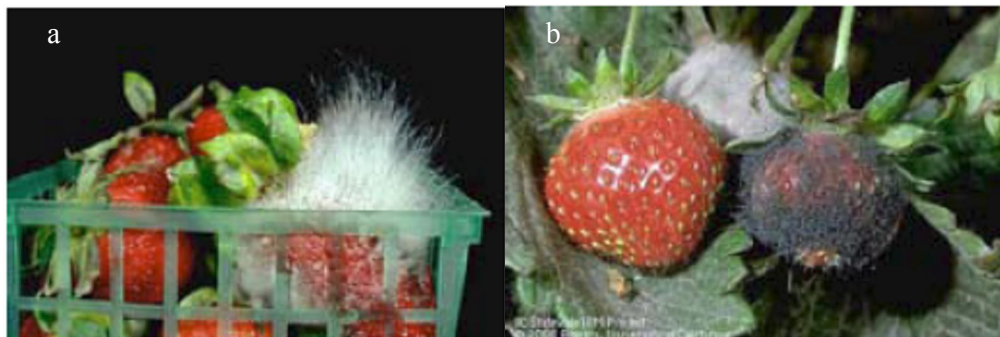


Figura 12. Fresa contaminada con *Rhizopus spp* (a) y *Mucor spp* (b) (UC Davis, 2005).

Los insectos son otro inconveniente que se presenta en el periodo posterior a la cosecha, la mosca de la fruta o vinagre *Drosophila melanogaster* (Fig. 13) y otras variedades se encuentran entre las plagas principales ya que depositan huevecillos en la fruta madura, lo que representa un problema para los frutos destinados a la congelación que se dejan madurar en el campo. Los tratamientos preventivos recomendados para esta peste son el uso de insecticidas previo a la cosecha y buenas prácticas de sanidad (CSC y CMCC, 2003; UC Davis, 2005).



Figura 13. Fresa contaminada con larvas de *Drosophila melanogaster*. (UC Davis, 2005).

Como ya se mencionó anteriormente el manejo de infestaciones es muy complejo y los tratamientos químicos son los métodos más utilizados para el control de insectos, parásitos y enfermedades; donde el MeBr es el más usado debido a su extrema efectividad en tratamientos pre-cosecha para fumigación de suelos y en los fitosanitarios post-cosecha. Sin embargo el llamado “Protocolo de Montreal”, llevado a cabo en Noviembre de 1992, establece que el uso de este químico deberá discontinuarse completamente para el año 2015 debido a su capacidad para disminuir la cantidad de ozono atmosférico. Debido a esto se han empezado a estudiar métodos alternativos para el tratamiento de cultivos tomando en cuenta tanto la efectividad de estos como su impacto ambiental (CSC y CMCC, 2003; USDA, 2006).

En el caso de fresa existen tres tratamientos fitosanitarios oficiales de la USDA para el tratamiento de infestaciones, de los cuales dos son hidrotérmicos para la planta madre (Tabla V) y uno es químico para la fruta (Tabla VI).

Tabla V. Tratamientos hidrotérmicos fitosanitarios oficiales para fresa de la USDA. Adaptado de USDA, 2008.

<i>Clave</i>	<i>Plaga objetivo</i>	<i>Metodología</i>
T-558-1	<i>Pratylenchus spp.</i>	Inmersión en agua caliente a 127°F (52.78°C) por 2 minutos
T-569-1	<i>Aphelenchoides fragariae</i>	Inmersión en agua caliente a 121°F (49.44 °C) por 7 minutos

Cabe mencionar que los tratamientos hidrotérmicos son únicamente para la eliminación de una enfermedad y un nemátodo, mientras que las demás plagas son eliminadas mediante fumigación con MeBr.

Tabla VI. Tratamiento químico (T-101-z-2) fitosanitario oficial para fresa de la USDA. Adaptado de USDA, 2008.

<i>T (°F)</i>	<i>Dosis (lb/1000ft³) de MeBr</i>	<i>Concentración mínima (oz) después de:</i>	
		0.5 h	2 h
≥80	1.5	19	14
70-79	2	26	19
60-69	2.5	32	24
50-59	3	38	29

4.2 Tratamientos post-cosecha no químicos para alimentos

Como se mencionó anteriormente, los tratamientos post-cosecha se realizan generalmente por medio de la fumigación de los productos con diversos compuestos químicos entre los cuales destaca el MeBr debido a su gran efectividad y bajo costo. Sin embargo existen alternativas no químicas

como tratamientos térmicos, disminución de temperatura e irradiación. Estos tratamientos no habían tenido auge anteriormente por las conveniencias que presentan las fumigaciones como su bajo costo, fácil aplicación y poco efecto en la calidad del producto a diferencia de los costos energéticos elevados de las cadenas de frío, los tratamientos térmicos y, aunque la irradiación no presenta altos costos, si tiene muy poca aceptación con los consumidores. Sin embargo los tratados internacionales, como el “Protocolo de Montreal” (United Nations Environment Programme (UNEP), 2006), y las exigencias de productos sin residuos químicos por parte de los consumidores han promovido la búsqueda de alternativas.

En el caso de las fresas existen algunos estudios realizados con diferentes tecnologías como tratamientos post-cosecha. Simpson *et al.* (2003) proponen exponer la fruta a acetaldehído en concentraciones de 1-4% en presencia de 20kPa de CO₂ para controlar *Frankliniella occidentalis* y arañas, obteniendo mortalidad >90% sin llegar impactar en gran medida la calidad. Mientras que en la Conferencia Internacional sobre las alternativas para el uso de MeBr celebrada en Sevilla, España en Marzo del 2002, se nombraron como las alternativas más viables para tratamientos pre-cosecha el uso de 1,3-D cloropicrina en una película de polietileno o una película impermeable, dazomet, solarización mas la irrigación de metam sodio; también se propuso la solarización mas biofumigación con abono de gallina. Otras propuestas son la producción de plantas madres en medios diferentes a la tierra como fibra de coco o bagazo de uva; el uso de sustancias como azidas y yodometano; sin embargo se menciona que no hay ninguna

alternativa representativa para los tratamientos fitosanitarios (Batchelor y Bolivar, 2002).

4.2.1 Irradiación

Esta es una tecnología ampliamente usada e investigada para un sin número de aplicaciones que van desde esterilización hasta tratamientos post-cosecha. Kader (1986) la propone como una alternativa fitosanitaria con dosis máximas de 2.5 kGy o la combinación de la tecnología con tratamiento térmico, hidrotérmico o atmósfera modificada con una menor dosis.

Por otro lado, Pan *et al.* (2004) plantean la irradiación con rayos ultravioleta de onda corta o UV-C (4.1 kJ/m²) y tratamiento térmico con aire a 45°C por 3 h en fresas, los cuales pueden aplicarse solos o en combinación para controlar el crecimiento de *Botrytis cinerea* y *Rhizopus stolonifer* encontrando resultados favorables dando una vida de anaquel a 20°C de 3 días para los tratamientos individuales y de 5 para la combinación, sin una alteración significativa de la calidad.

4.2.2 Tratamientos térmicos

Estos tipos de tratamientos han sido los más usados en la industria tanto para producir alimentos seguros como para prolongar la vida de anaquel de los productos. Civello *et al.* (1997) proponen el uso de aire caliente como tratamiento fitosanitario empleando temperaturas de 42 ó 48°C por 3 h donde se obtiene una vida de anaquel a 20°C de 2 y 3 días

respectivamente sin cambios significativos a los atributos sensoriales; por otro lado Vicente *et al.* (2002) aplicaron aire a 45°C por 3h sumado a la refrigeración a 0°C logrando una vida de 14 días a 0°C más 24h a 20°C sin cambios significativos en calidad; y por último Vicente *et al.* (2003) sugieren el uso de empackado en atmósfera modificada (5% de CO₂ y O₂ + 90%N₂) en una película PD961EZ (Cryovac®, W.R. Grace & Co. Conn, EUA) más un tratamiento térmico con aire a 45°C por 3h aunado a refrigeración logra una vida de 14 días a 0°C más 24 h a 20°C sin mayores cambios sensoriales. Sin embargo todas estas metodologías disminuyen la cantidad de antocianinas en la fruta debido a sus largos tiempos de exposición a temperaturas relativamente bajas, por lo cual el uso de calentamiento dieléctrico, como MO y RF, es una alternativa atractiva debido a que los tiempos necesarios para alcanzar dichas temperaturas son significativamente menores.

4.2.2.1 Calentamiento dieléctrico: Microondas y Radio frecuencia

Como ya se ha mencionado, los tratamientos térmicos son una alternativa a los tratamientos químicos post-cosecha y uno de los métodos más antiguos y usados para la inactivación de microorganismos ya que sus resultados son generalmente buenos, su aplicación una vez desarrollado el protocolo es fácil y los costos son comparables o menores en relación a otras tecnologías; Wang *et al.* (2006) reportaron que para tratar nueces el

costo aproximado para un equipo escala planta piloto es de \$0.23 centavos de dolar/kg, el cual debe disminuir al escalarlo a un plano industrial. Sin embargo los largos tiempos de exposición de los métodos tradicionales de calentamiento pueden disminuir la calidad de la fruta al igual que su valor nutrimental. Es por ello que los tratamientos asistidos con microondas son una opción muy atractiva para la post-cosecha debido a que este método de calentamiento permite reducir los tiempos de exposición considerablemente (Sosa-Morales, 2009).

Mecanismo de calentamiento

Las microondas son ondas del espectro electromagnético, al igual que las ondas de radiofrecuencia (RF), de las cuales se diferencian por el uso de diferentes frecuencias (Fig. 14 y Tabla VII), generadores, forma de aplicación y propiedades dieléctricas de los materiales (Tang y Wang, 2007).

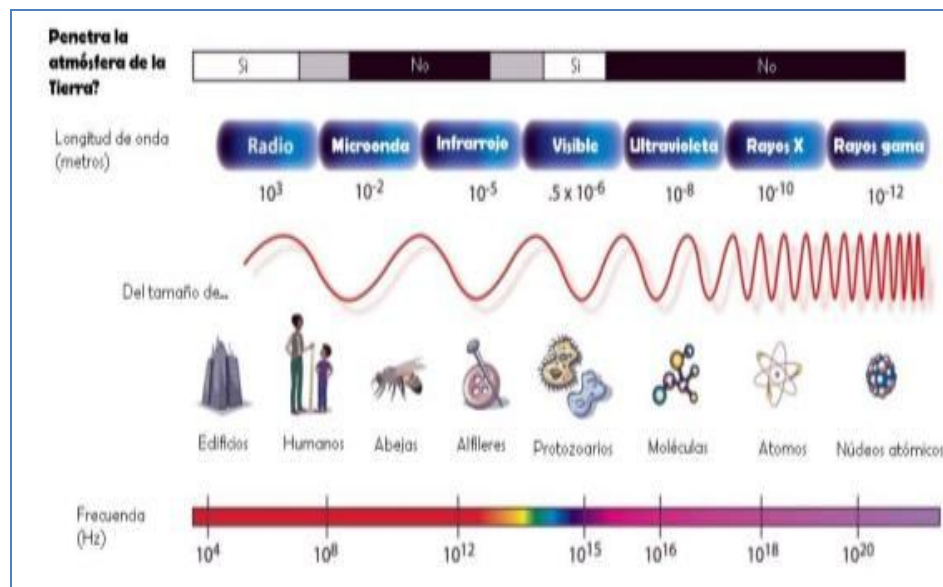


Figura 14. Espectro electromagnético. Adaptado de Education World, Inc., 2008.

El calentamiento se da por la conversión de energía eléctrica, provista por un campo eléctrico de alta frecuencia, a calor (Rowley, 2001) debido a la intercepción de las ondas por un material dieléctrico (alimento) que aumenta su temperatura de forma volumétrica. Esta elevación se puede dar por dos mecanismos principalmente: polarización iónica, que se da cuando los iones de una solución se mueven en respuesta a un campo eléctrico, y rotación de dipolos, que sucede cuando las moléculas polares tratan de alinearse con el campo en cuestión; en ambos casos se incrementa la temperatura como resultados del movimiento de las moléculas o fricción (Decareau y Peterson, 1986).

Tabla VII. Bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) disponibles para el calentamiento dieléctrico. Adaptado de Rowley, 2001.

<i>Tecnología</i>	<i>Frecuencia</i>
Radio Frecuencia	13.56 MHz ± 0.05%
	27.12 MHz ± 0.6%
	40.68 MHz ± 0.05%
Microondas	≈900 MHz (dependiendo del país)
	2450 MHz ± 50 MHz

La energía convertida a calor puede calcularse por medio de la siguiente fórmula (Rowley, 2001):

$$P_v = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 \quad (1)$$

Donde:

P_v : es la energía disipada por unidad de volumen (asumiendo que

$P=V^2/R$, para V _ voltaje y R _ resistencia)

f: es la frecuencia del campo aplicado (Hz)

ϵ_0 : es una constante (permisividad en el espacio o vacío, $8.854 \cdot 10^{-12}$

F/m)

ϵ'' : factor de pérdida dieléctrico

E: la fuerza del campo eléctrico en el material dieléctrico (V/m)

Simplificando (Tang y Wang, 2007):

$$Q = 5.563 \cdot 10^{-11} f \epsilon'' E^2 \quad (2)$$

Teniendo así que el calor transformado por unidad de volumen es directamente proporcional a la frecuencia e intensidad del campo y el coeficiente de pérdida del material dieléctrico.

Propiedades dieléctricas

Para calcular la cantidad de calor que se genera dentro del material de estudio es importante conocer las propiedades dieléctricas del mismo, que son dependientes de la frecuencia y la temperatura (Fig. 15), las cuales ayudan a entender la interacción entre este y los campos energéticos, además de que ayuda a estimar la profundidad de penetración de los mismos y a predecir la uniformidad del calentamiento. Dentro de éstas, se encuentra la permitividad que es el número usado para describir la influencia de las propiedades dieléctricas en la reflexión de las ondas electromagnéticas en las interfaces y la penetración o atenuación de dichas ondas dentro del material (Tang y Wang, 2007):

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - j \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3)$$

Donde:

ϵ^* : es la permitividad

ϵ_∞ : es el infinito o permitividad relativa a alta frecuencia

ϵ_s : es la estática o permitividad relativa a cero frecuencia

ω : es la frecuencia angular

τ : es el tiempo de relajación del material dieléctrico (s)

O expresado de otra manera:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (4)$$

Donde:

ϵ' : es la parte real o constante dieléctrica (energía acumulada) que influye la distribución del campo eléctrico y la fase en la cuál viajan las ondas a través del material

ϵ'' : es la parte imaginaria o factor de pérdida dieléctrica, que influye la atenuación y absorción de energía

Así mismo, el factor de pérdida se puede definir gracias a las contribuciones derivadas de la conducción iónica y rotación de dipolos de la siguiente forma (Tang y Wang, 2007):

$$\epsilon'' = \epsilon''_d + \epsilon''_\sigma = \epsilon''_d + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (5)$$

Donde los subíndices d y σ indican las contribuciones debido a la rotación de dipolos y conducción iónica respectivamente y la conductividad iónica del material σ (S/m) = $\omega \epsilon_0 \epsilon''_\sigma$.

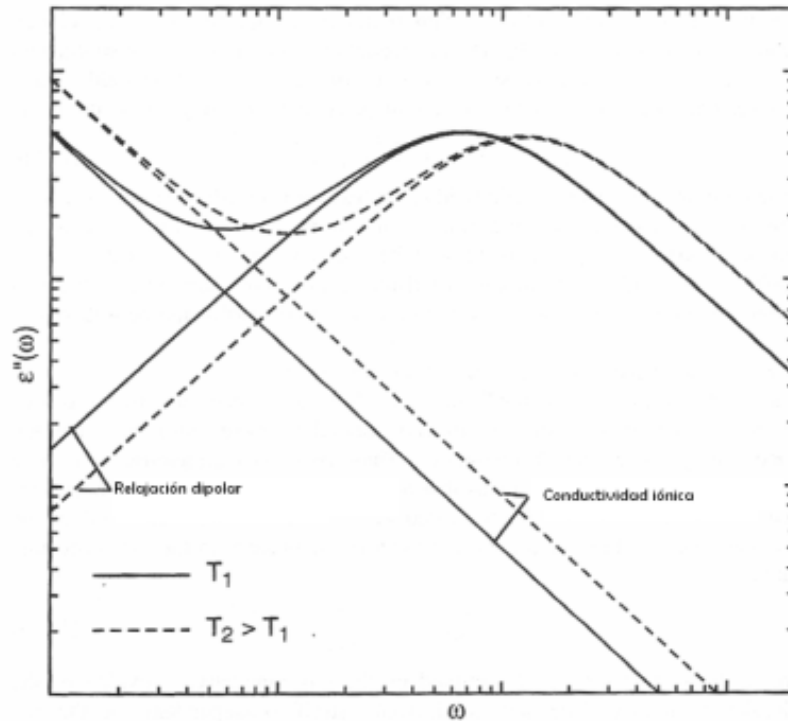


Figura 15. Dependencia de la frecuencia debido a la relajación dipolar, conductividad iónica y su superposición del factor de pérdida dieléctrico. Adaptado de Rowley, 2001.

Profundidad de penetración de las ondas

Esta se define como la distancia a la cual la energía del campo incidente se reduce a $1/e$ ($\approx 37\%$), para $e = 2.718$, se mide desde la

superficie del producto (Decareau y Peterson, 1986) y se calcula como (Tang y Wang, 2007):

$$dp = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]}} \quad (6)$$

Para:

dp: distancia a la energía del campo incidente se reduce a 1/e

c: velocidad de la luz en el vacío ($3 \cdot 10^8$ m/s)

Esta distancia es inversamente proporcional a la frecuencia (Tang y Wang, 2007) y es dependiente de las características de cada alimento como se muestra en la tabla VIII.

Tabla VIII. Profundidad de penetración (cm) de algunas frutas calculadas con propiedades dieléctricas medidas a 20°C. Adaptado de Tang y Wang, 2007.

<i>Fruta</i>	<i>27 MHz</i> <i>(Radiofrecuencia)</i>	<i>915 MHz</i> <i>(Microondas)</i>	<i>1800 MHz</i>
Manzana Golden Delicious	15.2	5.3	2.2
Manzana Red Delicious	18.9	4.6	2.1
Almendra	538.2	1.9	2.3
Cereza	8.5	2.8	1.4
Uva	10.9	3.7	1.8
Naranja	10.1	2.7	1.5
Nuez	653.6	3.1	2.3
Aguacate	5.1	1.5	1.1
Chirimoya	9.4	1.5	1.1
Fruta de la pasión	9.0	2.7	1.5
Zapote blanco	9.0	1.8	1.3

Uso de microondas y radio frecuencia como tratamientos térmicos para la inactivación de microorganismos y plagas

El tratamiento térmico asistido por tecnologías de calentamiento dieléctrico para la inhibición de varios microorganismos y plagas, tanto *in vivo* como *in vitro*, ha sido estudiado por diferentes autores teniendo los siguientes resultados.

Para frutos, Ikediala *et al.* (1999) trataron cerezas dulces (*Prunus avium* L.) en un equipo de 915 MHz a nivel planta piloto auxiliado por un sistema de aire caliente para estudiar la mortalidad de larvas de *Cydia pomonella* L. y el efecto del tratamiento en la calidad del producto, comparados contra un grupo testigo (la fruta fumigada con MeBr); encontrando una mortalidad de 98% para el tratamiento a 55°C (manteniendo la temperatura por 2 minutos y enfriando con baño de agua por 5) seguido de un día de almacenamiento a bajas temperaturas (1°C) para la variedad Bing obteniendo parámetros de calidad comparables al control. Este último trabajo señala que pueden esperarse resultados alentadores y similares para el tratamiento de fresa ya que tiene comportamientos similares a la cereza.

Por otro lado la radio frecuencia se ha utilizado en una serie de estudios en nueces (*Juglans regia* cv Chandler) para el control de plagas (larvas en quinto estadio de *Amyelois transitella*) encontrando que a 25kW y 27MHz tratamientos de 55°C con retención de 5 minutos fueron suficientes para obtener el 100% de mortalidad sin afectar de forma significativa sus atributos sensoriales ni promover la rancidez del producto (Wang *et al.*,

2001; Wang *et al.*, 2002 ;Wang y Tang, 2004; Mitcham *et al.*, 2004 y Wang *et al.*, 2007).

En el estudio de hongos, Cruz-Guerrero *et al.* (2008) utilizaron calentamiento asistido por microondas para estudiar la inhibición de *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *A. ochraceus* y *A. parasiticus* en sistemas modelo a diferentes a_w (0.99, 0.97 y 0.95), utilizando un nivel de potencia de 10 durante 0, 3, 6 hasta 18 s encontrando inhibición al aplicar el máximo nivel de potencia durante 12-15s para actividades de agua altas, mientras que a bajas a_w logradas con NaCl se necesitó exponer el hongo por 18s.