

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.

**Efecto de la Irradiación Ultravioleta C Sobre la Actividad
Metabólica del Meristemo Apical del Espárrago (*Asparagus
officinalis* L.) Almacenado a Diferentes Temperaturas**

Por

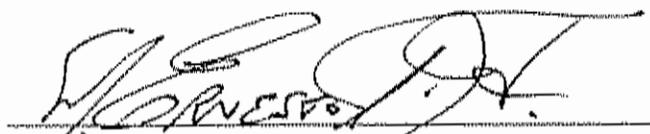
Francisco Torres Rivas

Tesis aprobada por la
Coordinación de Tecnología en Alimentos de Origen vegetal

Como requisito parcial para obtener el grado de
Maestría en Ciencias

APROBACIÓN

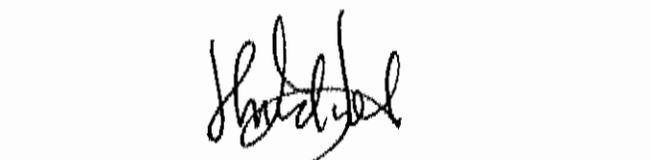
Los miembros del comité designado para revisar la tesis de Francisco Torres Rivas, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias.



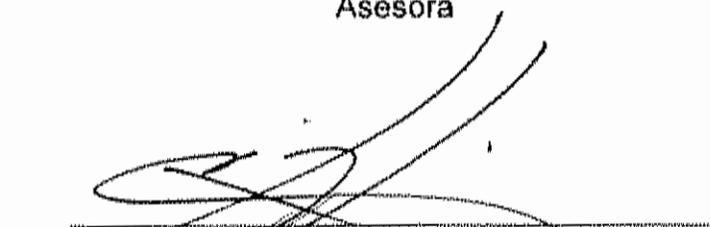
Dr. Martín Ernesto Tiznado Hernández
Director de Tesis



Dra. Rosalba Troncoso Rojas
Asesora



Dra. Herlinda Soto Valdez
Asesora

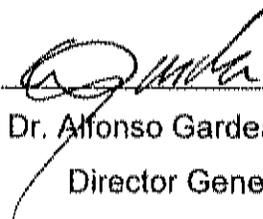


Dr. Reginaldo Báez Sañudo
Asesor

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial del autor, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita del director del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD)

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar créditos al CIAD, previa aprobación escrita del manuscrito en cuestión, del director de tesis.



Dr. Alfonso Gardea Béjar
Director General

AGRADECIMIENTOS

Al *Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.* Por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y recibirme como miembro de su comunidad.

A CONACyT por el apoyo económico en la realización de esta tesis y de mis estudios de maestría.

A mi director de tesis *Dr. Martín Ernesto Tiznado Hernández*, por brindarme todo su apoyo, comprensión y confianza. Por su inmensa paciencia especialmente en la parte teórica del presente trabajo de investigación. Gracias por todo el tiempo que me brindó, espero haberlo aprovechado al máximo. Por último mil gracias por haberme recibido y haber confiado en mí.

A mi comité de Tesis, *Dra. Rosalba Troncoso, Dra. Herlinda Soto y Dr. Reginaldo Báez*, por su asesoría y tiempo para la revisión de esta tesis.

Mil gracias a mis compañeros y amigos Alberto Sánchez y Alberto Javier Ojeda, que sin ellos esto no podría haber sido posible. Gracias por desvelarse junto conmigo al lado del calorímetro ¡Que ricas papas asadas!

A *Ana María Calderón, Alberto González, Alma Rosa Islas, Jorge Mercado, Jesús Manuel García* y a *Toño* por el préstamo de material y equipo.

A *René Valenzuela, Francisco Vázquez, Pame, Tania Carvallo* y *Francisco Vázquez (El Güero)* por su ayuda y sus consejos técnicos.

Muchas gracias a todo el equipo de frutos cortados: *Dr. Gustavo González, Mónica Villegas y Reynaldo Cruz*, por recibirme y arroparme desde los primeros días de mi llegada a esta ciudad y a este centro de investigación. Así mismo, doy las gracias a *Fernando, Saúl y Ricardo*, compañeros de ciencia.

Un especial agradecimiento a la Dra. Ana María Calderón, simplemente por TODO!!! Mencionaré solo algunas cosas de ese TODO, porque no hay papel suficiente para escribirlo ni tiempo para contarlo TODO: en primer lugar por aceptarnos en el programa de maestría, por todo el apoyo brindado en esos momentos difíciles y en los no tan difíciles, por creer no solo en mí sino en mi adorable esposa, por todos esos consejos tan sabios y por todas esas pláticas (un poquito antes de las 6:00 p.m.), pero sobre todo quiero darle las gracias por llevarme, perdón, por llevarnos esos ricos panecitos y/o galletitas que tanta falta nos hacían los sábados por la mañana. En fin, gracias por TODO!!!

Estoy de acuerdo con mi esposa, *René y Adriana* son sin más, "la sal y la pimienta" del laboratorio de proteínas, mi segunda casa o mi primera casa, bueno da igual, muchas gracias por ser quien son. Se les extraña...

Mis más sinceros agradecimientos a todos y cada uno de mis compañeros de generación, que logramos (entre todos) pasar momentos felices. Gracias por la primer pachanga que tuvimos, donde todos conocimos a una tal *Esperanza Latigo Sadomasoquista*; que hubieran sido los sábados de cartas sin tu desagradable, digo agradable compañía.

Gracias a dos de mis mejores amigos (en la historia): *Roberto y Angélica*. Que momentos tan maravillosos compartimos, desde la primer vez que fuimos a Tucson, hasta ahora y para siempre!!!. Ya no sé que más poner, pero si escribo poco mi cuasi-compadre se va a sentir mucho. Este.... este... bueno, los estimo

mucho y los quiero más. Ya queremos bautizar a *Renzo*. Los extrañamos un mundo, quiero costillitas a la barbecue!!!. No te sientes porque quedaron en dos páginas, verdad?

Gracias a los otros dos de mis mejores amigos (en la historia): *Aringarosa (Javier)* y a *Silas (Frank)*. Que puedo decir de ustedes, son como dos florecillas en el campo, a caray perdón, eso es otra historia. Créanme que ustedes son de esas raras personas en las que uno puede ciegamente confiar (se podría decir que son realmente mis amigos). Los seguimos esperando acá en Juaritos...

Pues ni modo, creo que también tengo que mencionar a otros dos de mis mejores amigos (sí, como no): *Luis* y *Gerardo*. Gracias por toda su ayuda bibliográfica (Bueno, en cuanto a este tema solo le puedo agradecer a *Luis*), Muchachos créanme que ustedes también serán recordados por siempre, marcaron mi vida de una forma especial...

Definitivamente me complace y me regocijo al darles las gracias infinitas a mis padres, *Francisco Torres* y *Gloria Rivas*, ustedes han sido mi guía, mi luz, mi ejemplo, mi todo en este maravilloso sueño de la vida. Realmente no existen palabras para agradecerles, pues cualquier cosa quedaría demasiado corta, los AMO.

A mi hermano, *David O. Torres*; que puede decir uno de los hermanos... Son como tus hermanos. Hermanos, esta palabra lo resume todo, pero aun así se queda muy corta, gracias por ser MI HERMANO!!! Te AMO.

*Cinthy*a, mi AMOR. Gracias por todos esos momentos en los que me levantaste literalmente del suelo, créeme que no hubiera podido hacer la maestría sin tu inmenso apoyo y paciencia. Gracias por todos tus consejos y por

esas levantadas de ánimo. Gracias por ayudarme a crecer, no solo como hombre de ciencia, sino como amigo, como hombre, como esposo, mil gracias. TE AMO!!!

A DIOS, que sin Él, simplemente nada podría ser, no existiría el Universo, tu Universo. Al igual que muchos de los aquí mencionados, tu ayuda fue infinita, así como tu amor por mi. Te daré las gracias el día que te vea a los ojos, hasta entonces...

Contenido

| | Pag. |
|--|------|
| ÍNDICE DE CUADROS | XI |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XII |
| RESUMEN | XIV |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS | 3 |
| 2.1. Historia | 3 |
| 2.2. Importancia del cultivo del espárrago | 4 |
| 2.2.1. Generalidades | 4 |
| 2.2.2. Producción a nivel mundial y nacional | 4 |
| 2.3. Características del cultivo del espárrago | 6 |
| 2.3.1. Morfología y anatomía | 6 |
| 2.3.2. Requerimientos edafoclimáticos | 9 |
| 2.3.2.1. Clima | 9 |
| 2.3.2.2. Iluminación | 10 |
| 2.3.2.3. Suelo | 10 |
| 2.4. Condiciones óptimas de almacenamiento postcosecha | 11 |
| 2.5. Criterios de calidad postcosecha | 12 |
| 2.6. Composición química y valor nutrimental del espárrago verde | 13 |
| 2.7. Fisiología del espárrago | 15 |
| 2.7.1. Cambios fisiológicos postcosecha | 18 |
| 2.7.1.1. Respiración | 18 |
| 2.7.1.2. Pérdida de carbohidratos solubles, proteínas y ácidos grasos | 19 |
| 2.7.1.3. Crecimiento y doblado | 22 |
| 2.7.1.4. Color | 23 |
| 2.7.1.5. Textura (Firmeza) | 23 |

| | |
|--|----|
| 2.7.1.6. Sabor | 27 |
| 2.8. Técnicas postcosecha para la conservación del espárrago | 27 |
| 2.8.1. Atmosferas modificadas | 28 |
| 2.8.2. Temperaturas de refrigeración | 30 |
| 2.8.3. Altas temperaturas (Escaldado) | 31 |
| 2.8.4. Radiación UV-C | 32 |
| 3. HIPÓTESIS | 40 |
| 4. OBJETIVOS | 40 |
| 4.1. Objetivo general | 40 |
| 4.2. Objetivos específicos | 40 |
| 5. MATERIALES Y MÉTODOS | 41 |
| 5.1. Material vegetal | 41 |
| 5.2. Tratamientos | 41 |
| 5.3. Actividad metabólica | 42 |
| 5.3.1. Tasa de respiración | 42 |
| 5.3.2. Calor metabólico | 43 |
| 5.4. Criterios de calidad | 44 |
| 5.4.1. Firmeza | 44 |
| 5.4.2. Crecimiento | 45 |
| 5.4.3. Doblado | 45 |
| 5.4.4. Porcentaje de pérdida de peso fresco | 45 |
| 5.4.5. Carbohidratos Solubles | 46 |
| 5.4.6. Color | 47 |
| 5.4.7. Estado hídrico | 48 |
| 5.4.7.1. Potencial osmótico | 48 |
| 5.4.7.2. Potencial de presión | 49 |
| 5.4.7.3. Potencial hídrico | 50 |

| | | |
|----------|------------------------------|----|
| 6. | ANÁLISIS ESTADÍSTICO | 51 |
| 7. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 52 |
| 7.1. | Actividad metabólica | 52 |
| 7.1.1. | Tasa de respiración | 52 |
| 7.1.2. | Calor metabólico | 54 |
| 7.2. | Criterios de calidad | 56 |
| 7.2.1. | Firmeza | 56 |
| 7.2.2. | Crecimiento | 58 |
| 7.2.3. | Doblado | 59 |
| 7.2.4. | Pérdida de peso fresco | 61 |
| 7.2.5. | Carbohidratos | 62 |
| 7.2.6. | Color | 67 |
| 7.2.7. | Estado hídrico | 69 |
| 7.2.7.1. | Potencial osmótico | 69 |
| 7.2.7.2. | Potencial de presión | 70 |
| 7.2.7.3. | Potencial hídrico | 71 |
| 8. | CONCLUSIONES | 73 |
| 9. | RECOMENDACIONES | 73 |
| 10. | REFERENCIAS | 74 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | Pág. |
|---|------|
| 1. Principales países productores de espárrago | 6 |
| 2. Composición química del espárrago verde en base a 100 g de materia fresca | 14 |
| 3. Características de las diferentes regiones de la luz ultravioleta y sus efectos..... | 33 |

INDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| 1. Espárragos | 3 |
| 2. Anatomía del espárrago | 8 |
| 3. Espárrago de calidad | 12 |
| 4. Espectro electromagnético | 33 |
| 5. Velocidad de respiración de turiones de espárrago tratados con UV-C (0, 5 y 10 min) y almacenados a 2 (A), 5 (B) y 20°C (C), respectivamente .. | 53 |
| 6. Calor metabólico de las puntas de los turiones de espárrago tratados con 0, 5 y 10 min de exposición a la irradiación UV-C y almacenados a diferentes temperaturas. A) 2°C y B) 5°C | 55 |
| 7. Cambios en la firmeza de turiones de espárrago, tratados con irradiación UV-C por 0, 5 y 10 min, almacenados a 2 (A) y 5°C (B) por un periodo de 20 días | 57 |
| 8. Crecimiento longitudinal del turión de espárrago tratado con irradiación UV-C por 0, 5 y 10 min y almacenados a 2 (A) y 5°C (B) durante 20 días | 59 |
| 9. Doblado de la punta del turión de espárrago tratado con irradiación UV-C (0, 5 y 10 min), almacenados a 2 (A) y 5°C (B) durante 20 días | 60 |

| | |
|--|----|
| 10. Porcentaje de pérdida de peso fresco de turiones de espárrago tratados con irradiación UV-C (0, 5 y 10 min), almacenados a 2 (A) y 5°C (B) por un periodo de 20 días | 62 |
| 11. Cambios iniciales (0 días) y finales (20 días) en los carbohidratos solubles (fructosa y glucosa) en las zonas apical, media y basal de turiones de espárrago verde almacenados bajo diferentes condiciones de irradiación UV-C y de temperatura | 66 |
| 12. Parámetros de color L*, Hue y Croma en turiones de espárrago bajo diferentes condiciones de irradiación con UV-C y de temperatura de almacenamiento | 68 |
| 13. Potenciales osmótico, hídrico y de presión en turiones de espárrago durante el almacenamiento bajo diferentes condiciones. A) Control a 2°C; B) 5 min UV-C a 2°C; C) 10 min UV-C a 2°C; D) Control a 5°C; E) 5 min UV-C a 5°C; 10 min UV-C a 5°C | 72 |

RESUMEN

La región apical de turiones de espárrago (*Asparagus officinalis* L. cv. "Brock") de calidad estándar, fué irradiada con UV-C a niveles de: 0, 2.46 y 4.93 KJ/m². Posteriormente, los turiones fueron almacenados a 2 y 5°C (por 20 días) o a 20°C (por 5 días).

La actividad metabólica del meristemo apical del turión de espárrago fue evaluada mediante la tasa de respiración y el calor metabólico, durante los primeros 5 días de almacenamiento de manera consecutiva y posteriormente cada 4 hasta los 20 días. Además se evaluó la calidad postcosecha en base a los siguientes parámetros: Pérdida de peso fresco, firmeza, crecimiento, doblado, color, carbohidratos solubles (fructosa, glucosa y sacarosa) y el estado hídrico del turión de espárrago, potencial hídrico, osmótico y de presión (turgencia). Las evaluaciones se registraron al inicio y posteriormente cada 4 hasta los 20 días de almacenamiento.

Al término del período del almacenamiento, no se observaron efectos significativos ($P > 0.05$) de la irradiación UV-C en respiración, calor metabólico, crecimiento, doblado, color, carbohidratos solubles, firmeza ni en los potenciales hídrico, osmótico y de presión con respecto al control. Sin embargo, se encontró una diferencia significativa ($P < 0.05$) en el porcentaje de pérdida de peso fresco para el lote almacenado a 5°C donde el control perdió un 12.16% de su peso inicial y los tratamientos de 2.46 y 4.93 KJ/m² de UV-C registraron pérdidas del 4.97 y 6.12%, respectivamente. Los tratamientos de UV-C evaluados en el presente experimento no alteraron la actividad metabólica del meristemo apical. Sin embargo, mantuvieron por más tiempo la calidad postcosecha del espárrago considerando como variable de criterio la pérdida de peso fresco.

1. INTRODUCCIÓN

El espárrago verde (*Asparagus officinalis* L.) figura entre las hortalizas con mayor valor agregado. Presenta una gran demanda y su reputación gastronómica está ampliamente consolidada, con lo cual alcanza un alto valor comercial en el mercado internacional de exportación [Rigau, 1978].

El cultivo del espárrago se conoce desde la más remota antigüedad; sin embargo, la gran demanda a nivel mundial de que hoy en día es objeto, ha contribuido, no solo a cultivarlo en mayor escala, sino a desarrollar nuevas técnicas de cosecha, almacenamiento, transportación y manejo, así como protocolos diseñados con el fin de mantener su frescura y su calidad postcosecha [Infoagro, 2002; Rigau, 1978].

El deterioro de la calidad postcosecha del producto, ocurre principalmente debido a la alta actividad metabólica del meristemo apical. Es por esto que las técnicas desarrolladas hasta el momento, tienen como objetivo principal reducir la tasa de respiración de la zona apical del espárrago, disminuyendo así los cambios fisiológicos que conllevan a su deterioro [Uchino et al., 2004]. Esto ha sido posible, principalmente a través del uso de temperaturas de refrigeración, atmósferas modificadas y escaldado. Aunque estas técnicas son ampliamente utilizadas, su éxito solo ha sido parcial, debido a que presentan efectos adversos en la calidad postcosecha del espárrago, como el daño por frío, producción de metabolitos tóxicos y ablandamiento del tejido, respectivamente [Kennedy et al., 1992; Báez-Sañudo et al., 1999; Paull y Chen, 1999].

Una de las alternativas para el mantenimiento de la calidad postcosecha del espárrago, es el uso de técnicas no térmicas, con menores efectos negativos en la calidad como es el caso de la irradiación ultravioleta de la región C (UV-C) [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004]. Se ha reportado que la aplicación de esta tecnología ha logrado disminuir los brotes de raíces nuevas en papa y zanahoria, así como la apertura y crecimiento del ápice meristemático en perejil [Sparrow y Christensen, 1954; Frohnmeyer y Staiger, 2003].

En base a lo anterior el presente trabajo tiene como objetivo, evaluar el efecto de la irradiación ultravioleta de la región C (UV-C) sobre la actividad metabólica del meristemo apical y la calidad postcosecha del espárrago verde.

2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1. Historia

El cultivo del espárrago es antiquísimo, ya que esta hortaliza se ha identificado en pinturas egipcias (3000 a. C.), donde aparecen atados en manojos con una, dos o tres ligaduras (Figura 1); al parecer eran utilizados como ofrenda a los dioses. A través de la historia el espárrago ha sido utilizado como una planta ornamental, medicinal y también en el arte culinario [Güvenç y Koyuncu, 2002; Rigau, 1978]. Esta hortaliza fue muy apreciada tanto por los griegos como por los egipcios. Sin embargo, fueron los romanos quienes introdujeron este cultivo a Europa septentrional, para que posteriormente se difundiera por todo el continente europeo, asiático y africano [Infoagro, 2002; Güvenç y Koyuncu, 2002].

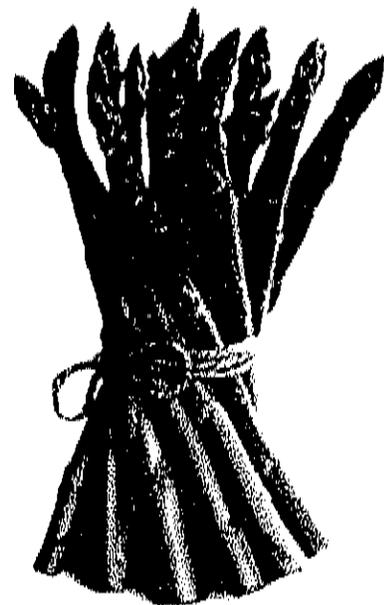


Figura 1. Espárragos.

A través de la historia, se han desarrollado un gran número de variedades del espárrago; a la fecha se encuentran más de 300 variedades registradas. Estudios realizados sobre las variedades del espárrago sugieren que las variedades que se cultivan en la actualidad tienen su procedencia en selecciones llevadas a cabo en Holanda en el siglo XVIII [InfoAgro, 2002; Rigau, 1978].

2.2. Importancia del Cultivo del Espárrago

2.2.1. Generalidades

El espárrago se encuentra disponible por periodos cortos durante el año ya que su temporada de cosecha se limita a 6 ú 8 semanas en climas templados. Por lo que un grupo de investigadores en Taiwán, desarrolló una técnica de cosecha que logró extender el periodo de producción desde marzo hasta octubre [Bhowmik et al., 2002; Bhowmik et al., 2001]. Dicha técnica es llamada "tallo principal", la cual consiste en dejar de 3 a 5 turiones (tallos principales) de una misma corona desarrollarse por completo, con la intención de que estos tallos mantengan el suministro de nutrimentos a la corona y al sistema radicular, mientras que los turiones adyacentes son continuamente cosechados. Sin embargo, se observó que tanto la capacidad de almacenamiento como la calidad de los turiones de espárrago, disminuye conforme avanza la temporada de cosecha [Bhowmik et al., 2002; Pressman et al., 1993].

2.2.2. Producción a Nivel Mundial y Nacional.

El espárrago se encuentra entre las hortalizas de mayor valor económico, debido a sus características gastronómicas y a su corto periodo de cosecha lo cual hace que exista una alta demanda en el mercado internacional [Rigau, 1978; InfoAgro, 2002; Bhowmik et al., 2002]. A pesar de que el cultivo del espárrago no es moderno, las exigencias actuales han contribuido a

aumentar su producción en mayor escala, de tal forma que hoy en día constituye un negocio altamente lucrativo, especialmente para los productores y exportadores de este cultivo [Rigau, 1978; InfoAgro, 2002].

En el año 2005, la producción mundial de espárrago fue de 6,647,543 toneladas métricas, donde China fue el principal país productor con aproximadamente el 88.85 % del total, la cual está mayormente dedicada al consumo interno del país. México ocupa el quinto sitio con una participación del 1 % de la producción mundial, por debajo de países como Perú, Estados Unidos de Norte América y Alemania, respectivamente. La lista de los 10 principales países productores de espárrago a nivel mundial y su producción, se encuentra en el cuadro 1 [FAO, 2005].

A nivel nacional, Sonora es el principal estado productor de espárrago, aportando un total de 35,374 toneladas, lo cual representa aproximadamente un 58 % de la producción nacional total. Guanajuato se encuentra en la segunda posición con una producción de 18,130 toneladas y el tercer lugar lo ocupa Baja California Norte con un total de 8,239 toneladas aproximadamente [SAGARPA, 2006].

La producción de los estados de Guanajuato, Jalisco, Nuevo León, Querétaro y Coahuila se cosecha en el periodo primavera-verano, destinando casi la totalidad hacia la industria alimenticia. Mientras que los estados de Sonora, Baja California Norte y Baja California Sur, cosechan durante el periodo de invierno-primavera, destinando el total de su producción a la exportación en fresco hacia el mercado internacional, principalmente a Estados Unidos de Norte América y Japón [SAGARPA, 2006].

Cuadro 1. Principales países productores de espárrago.

| Países | Producción 2005 (toneladas) |
|---------------|------------------------------------|
| China | 5,906,000 |
| Perú | 193,000 |
| EE.UU. | 102,780 |
| Alemania | 76,581 |
| México | 67,247 |
| España | 47,600 |
| Italia | 44,437 |
| Japón | 29,600 |
| Grecia | 24,300 |
| Filipinas | 21,000 |

En Sonora, la producción del espárrago se realiza principalmente en las regiones de Caborca y San Luis Río Colorado, aportando casi el 100% de la producción estatal. En estas regiones de producción se utiliza un sistema de riego y fertilización presurizada considerado tecnológicamente avanzado [InfoAgro, 2002].

2.3. Características del Cultivo del Espárrago

2.3.1. **Morfología y Anatomía**

El espárrago verde pertenece a la familia *Liliaceae*, a la cual también pertenecen la cebolla, el ajo y el puerro entre otros vegetales. Del género *Asparagus*, al cual pertenecen aproximadamente 300 especies (entre

ornamentales y comestibles), la que más interesa al horticultor por su importancia económica, es la especie *officinalis* (esparraguera oficial o común) [InfoAgro, 2002; Güvenç y Koyuncu, 2002; Rigau, 1978; Wien, 1997].

Esta especie se encuentra en el mercado en dos modalidades, la blanca y la verde, donde el espárrago blanco tiene una mayor preferencia en los mercados europeo y asiático (excepto Japón); mientras que el espárrago verde es más popular en Estados Unidos de América, Australia, Chile, Taiwán y Nueva Zelanda, así como algunos otros países del continente americano [Bhowmik y Matsui, 2003]. Sin embargo, el consumo del espárrago verde (principalmente procesado) en el continente europeo, ha aumentado considerablemente en la última década debido a que tanto el cultivo como la cosecha son más económicos. Además el espárrago verde es menos fibroso que el espárrago blanco, por lo que es más tierno y dulce [López et al., 1996].

Asparagus officinalis L. es una planta herbácea y perenne que puede permanecer en producción durante un período de 8 a 10 años. La esparraguera es dioica (sexos separados); con lo cual hay plantas femeninas y masculinas [InfoAgro, 2002; Rigau, 1978; Wien, 1997].

Desde el punto de vista agronómico, en el cultivo de espárrago, las plantas masculinas son preferibles ya que estas son más productivas en tejido vegetativo (turiones) que las plantas femeninas. Esto puede deberse a que las plantas femeninas utilizan parte de sus reservas energéticas en la formación de flores, frutos y semillas; mientras que las plantas masculinas que no producen flores, frutos ni semillas pueden acumular estas reservas en su sistema radicular para ser utilizadas en la próxima producción de turiones. Otra ventaja agronómica de las plantas masculinas se origina del hecho de que no producen

semillas y por lo tanto no existe el riesgo de que se originen nuevas plantas, lo cual multiplicaría la densidad de la plantación [InfoAgro, 2002].

El aumento en densidad podría reducir la calidad de los turiones, ya que no alcanzarían los calibres requeridos por las normas de calidad vigentes para su exportación. Esto debido a la competencia, que presentan las plantas hijas, en términos de espacio, agua y nutrientes disponibles en el suelo. Además de lo mencionado, las plantas masculinas son más precoces y longevas que las femeninas [InfoAgro, 2002; Rigau, 1978].

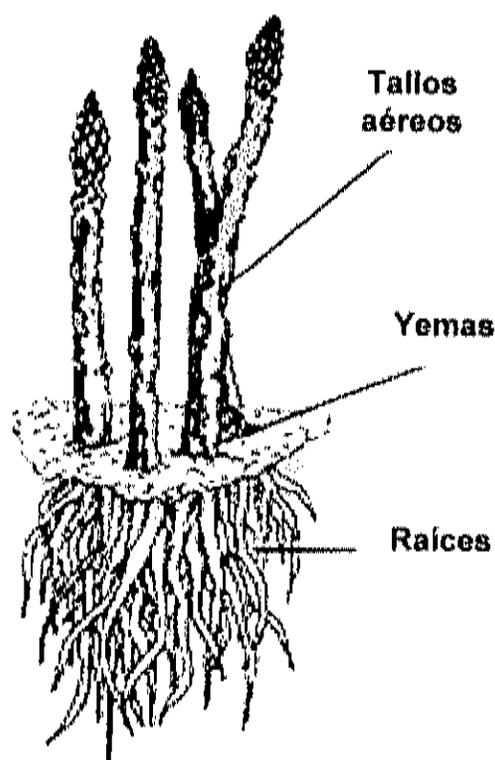


Figura 2. Anatomía del espárrago.

La planta del espárrago está formada por tallos aéreos (turiones), que pueden ser ramificados, si se dejan desarrollar completamente, alcanzando una altura máxima de 1 a 2 metros. Posee una parte subterránea constituida por raíces cilíndricas, gruesas y carnosas, las cuales acumulan reservas energéticas que son utilizadas en la siguiente producción de los turiones y por yemas, que es a lo que comúnmente en conjunto se le denomina como "garra" (Figura 2). Las yemas, son los órganos que al desarrollarse producen los "turiones", parte comestible y

comercializable de esta hortaliza. Sin embargo, la raíz también es comestible, ya que se emplea con frecuencia como diurético ligero [InfoAgro, 2002; Wien, 1997].

Las flores son pequeñas, generalmente solitarias, campanuladas y con la corola verde amarillenta. Su polinización es cruzada con un alto porcentaje de alogamia. El fruto es una baya redondeada de 0.5 cm de diámetro, de color verde al inicio del desarrollo y rojo en estado maduro. Cada fruto tiene aproximadamente de 1 a 2 semillas, las cuales son de color pardo oscuras o negras, brillantes y grises en el interior, con forma poliédrica y/o redonda, presentando un alto porcentaje de germinación. Las hojas (también llamadas brácteas) en estado de desarrollo de los turiones, pueden presentarse verdes, violeta, rosadas o blancas [InfoAgro, 2002; Rigau, 1978].

2.3.2. Requerimientos Edafoclimáticos

2.3.2.1. Clima.

El espárrago es una especie sensible a los cambios de temperatura. La temperatura ambiente ideal para el crecimiento de los turiones de espárrago se encuentra en el rango de los 11 a los 13°C de media mensual. El óptimo desarrollo vegetativo se produce a una temperatura de 18 a 25 °C. Temperaturas menores de 15 °C durante el día y 10 °C durante la noche detienen su desarrollo, así como temperaturas mayores de los 40 °C. La humedad relativa óptima para el crecimiento de los turiones de espárrago es entre el 60 y el 70 % [InfoAgro, 2002].

Cuando el cultivo se desarrolla al aire libre y se encuentra en una zona de vientos dominantes en una sola dirección, las hileras del cultivo no deben ofrecer resistencia al viento, para evitar posibles efectos adversos sobre el desarrollo de los turiones de espárrago [InfoAgro, 2002].

2.3.2.2. Iluminación.

El espárrago verde necesita condiciones de luz intensa, ya que una de las más importantes características de la calidad del mismo, es precisamente el color verde oscuro, el cual se debe presentar en al menos dos terceras partes de la longitud total del turión. Por lo tanto, el cultivo deberá encontrarse en un lugar completamente abierto con una exposición máxima a los rayos solares, para la inducción en la síntesis de clorofila que es la sustancia responsable del color verde intenso de esta hortaliza [InfoAgro, 2002; Rigau, 1978].

2.3.2.3. Suelo.

El espárrago puede crecer y desarrollarse prácticamente en todos los terrenos. Sin embargo, para que el cultivo tenga tanto la calidad requerida como una producción abundante, es necesaria una textura franco-arenosa o limosa, además el suelo no debe ser pedregoso para evitar un deterioro sobre la yema apical de la raíz del turión debido a roces con las piedras [Infoagro, 2002; Rigau, 1978].

El cultivo no debe recibir demasiada agua ya que el espárrago es muy sensible al estrés por anoxia que ocurre en la raíz debido a la presencia de agua en el suelo. Por otro lado, el pH óptimo del suelo está comprendido entre 7.5 y 8. El espárrago es uno de los cultivos de huerta que presenta una mayor resistencia a la salinidad tanto en el suelo como del agua de riego [InfoAgro, 2002; Rigau, 1978].

2.4. Condiciones Óptimas en Almacenamiento Postcosecha

El espárrago es altamente perecedero, por lo que una vez cosechado debe de enfriarse inmediatamente a una temperatura de 0 a 2°C. Una demora de 4 horas en su enfriamiento puede provocar un incremento del 40% en la fuerza de corte, debido al aumento en la firmeza del turión [Hernández-Rivera et al., 1992; Báez-Sañudo et al., 1999].

Las condiciones comerciales recomendadas para el almacenamiento de espárrago fresco son de 0 a 2°C con una humedad relativa del 95 al 99% y en oscuridad. Además, el suministro de agua en la base del turión contribuye a mantener el balance hídrico y turgencia del mismo. Bajo estas condiciones se logra una vida de almacenamiento de 14 a 21 días. Sin embargo, si la temperatura de almacenamiento se mantiene a 0°C por un período mayor a 10 días, los turiones de espárrago desarrollan daño por frío [Báez-Sañudo et al., 1999]. Por otro lado, aún cuando la humedad relativa elevada es esencial para prevenir la deshidratación y para mantener la frescura de los turiones de espárrago [Hernández-Rivera et al., 1992], estas condiciones deben aplicarse en combinación con temperaturas bajas, para evitar la proliferación de patógenos y el crecimiento del turión [Báez-Sañudo et al., 1999].

Las bajas temperaturas de almacenamiento, favorecen el retraso de la senescencia y pérdida del sabor, además de que reducen la producción de etileno en los turiones de espárrago (2.1 $\mu\text{L}/\text{Kg}\cdot\text{h}$). Esto último beneficia el mantenimiento de la calidad del turión ya que la exposición al etileno acelera la lignificación [Hernández-Rivera et al., 1992; Hennion et al., 1992].

2.5. Criterios de Calidad Postcosecha

La calidad y vida útil postcosecha del espárrago, no solo están influenciadas por las prácticas durante la cosecha y la postcosecha, sino también por algunos factores precosecha tales como: la densidad de siembra, la fertilización, irrigación, tipo de suelo y la poda de los tallos débiles [Báez-Sañudo et al., 1999].

Un buen espárrago para consumo fresco (figura 3), debe tener una longitud deseada (de 15 a 18 cm o hasta 24 cm, según el mercado demandante), ser completamente recto, sin desarrollo excesivo de fibra, ser turgente, fresco, firme, con un diámetro aceptable (según al mercado demandante), con la punta bien cerrada y con brácteas y ramificaciones incipientes, sin presencia de olores y/o sabores no característicos del espárrago y de color verde oscuro (al menos 2/3 partes de la longitud total del turión, de la punta hacia la base) [Báez-Sañudo et al., 1999].



Figura 3. Espárrago de calidad

Los espárragos totalmente verdes son preferidos por el consumidor, ya que los espárragos con bases blancas son asociados con un incremento en su firmeza. Sin embargo, se considera que una pequeña porción de tejido blanco en la base, puede retardar los procesos degenerativos bajo las condiciones comerciales de distribución [Báez-Sañudo et al., 1999]. Por otro lado, el turión es un órgano tierno y delicado, lo que lo hace propenso al daño físico postcosecha el cual puede ocurrir como resultado de raspaduras,

compresiones, rompimiento de las puntas y ataque de insectos. La presencia de daños físicos disminuye la calidad del producto, incrementando la pérdida de agua por transpiración y la posibilidad de incidencia de enfermedades, además de ser visualmente menos atractivo. Tampoco debe presentar desordenes fisiológicos o síntomas de ataque por plagas o microorganismos [Báez-Sañudo et al., 1999].

2.6. Composición Química y Valor Nutricional del Espárrago Verde.

En el turión, el agua representa aproximadamente el 97% de la composición total de esta hortaliza, la cual se encuentra en forma libre así como ligada y mantiene la turgencia de las células e indirectamente su textura. Los carbohidratos son el grupo de constituyentes mayoritarios y se encuentran presentes como azúcares de bajo peso molecular (monómeros) o polímeros de alto peso molecular [Baéz-Sañudo et al., 1999].

La importancia nutricional de los alimentos, depende del contenido de nutrientes, su disponibilidad y en la cantidad consumida de los mismos [Moreno-Rojas et al., 1992]. Una porción de espárrago de aproximadamente 175 gr proporciona dos terceras partes de los requerimientos diarios de vitamina C de una persona adulta, una tercera parte de la vitamina A y la décima parte del hierro requeridos (Cuadro 2) [Baéz-Sañudo et al., 1999]. De una lista de los 23 vegetales más consumidos en Estados Unidos de Norte América, el espárrago ocupa el primer lugar, en cuanto a la calidad y cantidad total de antioxidantes (rutina, ácido ascórbico, tocoferol, ácido ferúlico y glutatión) [Nindo et al., 2003; Sun et al., 2005].

Cuadro 2. Composición química del espárrago verde en base a 100 g de materia fresca.

| Variable Analizada | Contenido |
|---------------------------|------------------|
| Materia seca (%) | 6.81 |
| Fibra (%) | 13.16 |
| Azúcares (%) | 5.14 |
| Proteína (%) | 33.94 |
| N (%) | 5.43 |
| P (g/100g) | 0.81 |
| K (g/100g) | 4.20 |
| Ca (g/100g) | 0.56 |
| Fe (mg/100g) | 24.93 |
| Mn (%) | 4.35 |
| Mg (g/100g) | 0.23 |
| Na (g/100g) | 33.24 |
| Zn (g/100g) | 10.35 |
| Co (mg/100g) | 6.73 |
| Cu (mg/100g) | 2.68 |
| Vit. A (U.I) | 980.00 |
| Tiamina (mg/100g) | 0.23 |
| Riboflavina (mg/100g) | 0.15 |
| Niacina (mg/100g) | 2.20 |
| Vit. C (mg/100g) | 48.00 |

En cuanto a la distribución de los minerales en los turiones de espárrago, Moreno-Rojas et al, (1992) llevaron a cabo un estudio donde encontraron que la concentración de: Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, K, y Na fueron directamente proporcionales al diámetro de los turiones, mientras que las

concentraciones de Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, K y Zn fueron mayores en la zona apical de los turiones. Amaro-López et al. (1999) encontraron resultados similares. Lo anterior hace del espárrago una hortaliza nutricionalmente importante ya que en años recientes el interés por los minerales ha aumentado considerablemente. Esto debido principalmente a la fuerte relación entre el consumo de minerales en la dieta y la disminución en la prevalencia de enfermedades crónicas como: hipertensión, osteoporosis y enfermedades cardiovasculares [Moreno-Rojas et al., 1992; Amaro-López et al., 1999].

2.7. Fisiología del Espárrago

Los turiones del espárrago crecen muy rápidamente sobre el terreno, a razón de 70 mm/día aproximadamente a una temperatura de 20⁰C, por lo que la actividad metabólica es muy intensa debido a la división celular que se lleva a cabo en el meristemo apical. De acuerdo a esto, el espárrago presenta una alta tasa de respiración (de 351 mg CO₂/Kg*h en campo) para satisfacer la demanda energética requerida por el meristemo apical. Este fenómeno es típico en tejidos que se encuentran en etapas iniciales de su desarrollo vegetativo (división celular, diferenciación celular y expansión), como es el caso del espárrago [Villanueva et al., 2005; Bhowmik y Matsui, 2003; Villanueva-Suárez et al., 1999; Brash et al., 1995; Gariépy et al., 1991].

Durante el crecimiento del turión de espárrago, la división celular se lleva a cabo en el meristemo apical, el cual se encuentra en una región comprendida entre 0 y 15 mm a partir de la punta del turión. Las células generadas por división celular, son gradualmente desplazadas hacia una segunda zona comprendida entre los 15 y 35 mm a partir de la punta del turión.

Es en esta zona donde se inician los procesos de diferenciación y expansión celular. La tasa de expansión celular determina en gran medida el crecimiento del turión. Una vez que los procesos de expansión y diferenciación celular han concluido, las células (ya maduras) son conducidas a una tercera zona donde algunas de estas células inician el proceso de senescencia, lo cual incluye la lignificación de la pared celular para formar parte de los tejidos vasculares o de soporte [Ku y Woolley, 2006; Bhowmik y Matsui, 2003].

Durante la postcosecha, la tasa de respiración del espárrago del meristemo apical, disminuye drásticamente con respecto a la que se ha registrado en campo, a niveles de 40 mg CO₂/Kg*h a 1-2°C y de 60 mg CO₂/Kg*h a 5°C. Sin embargo, estos valores de respiración continúan siendo muy elevados en comparación con otros productos hortofrutícolas (por comparación: aproximadamente 15 veces la tasa de respiración postcosecha de la manzana) [Villanueva et al., 2005; Bhowmik y Matsui, 2003; Villanueva-Suárez et al., 1999; Brash et al., 1995; Gariépy et al., 1991].

En el caso del turión de espárrago la cosecha induce un estrés muy drástico debido a la falta repentina de su fuente de nutrientes, hormonas, agua y minerales. Como consecuencia los turiones de espárrago no pueden mantener su homeostasis metabólica, y bajo estas condiciones son inducidos artificialmente a un proceso de senescencia acelerada [Hurst et al., 1993; King et al., 1990; Costa et al., 2006; King et al., 1995]. Debido a esto, los turiones se deterioran rápidamente, consumiendo sus reservas energéticas en un corto plazo, por lo que se ven imposibilitados de cubrir la demanda energética para mantener la integridad del tejido del turión. Como consecuencia su vida de anaquel es de tan solo 4 a 5 días a una temperatura de 20 a 25 °C y de 2 a 3 semanas a una temperatura de 2°C [Bhowmik y Matsui, 2003; Hurst et al., 1993; Irving y Hurst, 1993; King et al., 1990].

Los cambios fisiológicos que se presentan durante postcosecha incluyen: disminución en la tasa de respiración, cambios en el sabor y color, así como pérdida de agua, clorofila, ácido ascórbico, carbohidratos solubles (esencialmente sacarosa) y proteínas. Además se presenta un aumento de aminoácidos libres y de amoníaco (tóxico para las células vegetales). También se presentan incrementos en la firmeza como consecuencia de la lignificación de los tejidos vasculares, o disminución, a consecuencia de la pérdida de la integridad celular. Debido a todos los cambios mencionados, los turiones de espárrago se vuelven más susceptibles a enfermedades y ataques por microorganismos [An et al., 2006; Bhowmik y Matsui, 2003; Siomos et al., 2000; Hurst et al., 1993; Irving y Hurst, 1993; King et al., 1990].

Aunque los cambios fisiológicos postcosecha se presentan en el turión completo, la zona apical es la más sensible a los cambios degenerativos al estar compuesta principalmente por tejido inmaduro. Por lo que se presentan en esta zona los primeros síntomas visuales de deterioro así como una disminución en los procesos fisiológicos [Bhowmik y Matsui, 2003; Hurst et al., 1993; King et al., 1990].

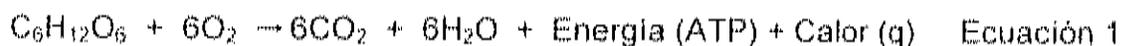
Se ha observado que la zona apical demanda una gran cantidad de metabolitos, los cuales son movilizados desde las zonas media y basal del turión. Esto sugiere que la zona apical tiene un papel muy importante en la regulación de los cambios fisiológicos postcosecha del turión y por lo tanto en los cambios en calidad [Bhowmik y Matsui, 2003; Hurst et al., 1993; King et al., 1990].

2.7.1. Cambios Fisiológicos Postcosecha

2.7.1.1. Respiración.

En el caso de productos vegetales que presentan un metabolismo muy activo (como el espárrago), la velocidad de deterioro es directamente proporcional a la tasa de respiración, por lo que los principales cambios fisiológicos postcosecha del espárrago se deben a esta característica [Brash et al., 1995].

La respiración es un proceso del metabolismo oxidativo que genera energía libre en forma de ATP. Este proceso es regulado fisiológicamente por la demanda de ATP, el intercambio gaseoso celular, la concentración de los sustratos de la respiración, la concentración de enzimas glucolíticas y por el estado de desarrollo del producto, entre otros [Uchino et al., 2004; Yasunaga et al., 2002]. El proceso de la respiración es simplificado en la ecuación 1, considerando la glucosa como fuente de carbono.



Específicamente en el espárrago, el factor externo que más influencia tiene sobre la tasa de respiración es la temperatura de almacenamiento, sin embargo existen otros factores no fisiológicos que también influyen sobre la respiración tales como: el tiempo transcurrido desde la cosecha y la temporada de cosecha [Lipton, 1990; King et al., 1990; Uchino et al., 2004].

En el espárrago se ha observado que generalmente la velocidad de respiración se reduce de un 30 a un 40% durante las primeras 24 horas

postcosecha. [Lipton, 1990; Lill et al., 1990; King et al., 1990; Uchino et al., 2004]. El CO₂ producido por el proceso de respiración en el espárrago, es mayor que al que se puede atribuir por la pérdida de carbohidratos, lo que sugiere la degradación de otro tipo de sustratos como proteínas y lípidos en la respiración del espárrago [King et al., 1990]. Esto se observa en el cambio en los cocientes de la respiración conforme avanza el período postcosecha. En un inicio, el cociente es cercano a 1, disminuyendo a valores de 0.5 después de las 12 horas de almacenamiento a 20°C, lo cual es típico en tejidos privados de carbohidratos solubles, que se encuentran degradando sustratos alternos en la respiración [Hurst et al., 1994; Irving y Hurst, 1993].

Por otro lado, la alta tasa de respiración del espárrago, lo hace más susceptible a la pérdida de agua (deshidratación) y esto a su vez provoca un incremento en la cantidad de fibra (susceptible de ser lignificada), un aumento de la acidez y cambios indeseables en el color del turión [Báez-Sañudo et al., 1999].

De acuerdo a lo mencionado, para mantener la calidad postcosecha de los productos hortofrutícolas, el proceso de la respiración ha sido artificialmente controlado mediante el uso de temperaturas de refrigeración, atmósferas controladas y atmósferas modificadas, principalmente [Uchino et al., 2004].

2.7.1.2. Pérdida de carbohidratos solubles, proteínas y ácidos grasos.

En frutas y vegetales frescos, las reservas energéticas son consumidas mediante el proceso de la respiración, el cual no solo degrada a los carbohidratos (glucosa, fructosa y sacarosa), sino que una vez agotadas dichas reservas también consume proteínas y ácidos grasos [Uchino et al., 2004].

Debido a lo anterior, se presentan incrementos en las concentraciones de aminoácidos libres, fosfato inorgánico y amoníaco, así como disminuciones en las concentraciones de las enzimas glucolíticas. Esto es típico para tejidos en estado de senescencia o privados de carbohidratos solubles [Uchino et al., 2004; Irving y Hurst, 1993; Lee et al., 1991].

En cuanto al consumo de carbohidratos en postcosecha, la sacarosa es el primer azúcar en presentar una disminución importante en su concentración, tanto en la zona apical como en el resto del turión. Este comportamiento sugiere la importancia del suministro de sacarosa desde la corona y raíces de la planta al turión para el mantenimiento del proceso de la respiración [Bhowmik y Matsui, 2003; McKenzie et al., 2004].

King et al (1990) observaron en espárrago (almacenados a 20°C), que a las 24 h postcosecha las concentraciones de glucosa y fructosa disminuyeron en un 75% con respecto a su valor inicial, mientras que a las 48 h postcosecha las reservas de estos carbohidratos son casi totalmente consumidas, correlacionando con una rápida disminución en la tasa de respiración del espárrago, lo que sugiere que el suministro de los metabolitos debe de estar en íntimo equilibrio con la tasa de su consumo [McKenzie et al., 2004; King et al., 1990].

El contenido de aminoácidos libres, disminuye en un 20% durante las primeras 12 h de almacenamiento a 20°C, posteriormente se presenta un aumento hasta alcanzar valores cercanos a los niveles iniciales a las 24 h. A las 48 h se observa un contenido del 160% de los niveles iniciales de aminoácidos libres. Mientras que el contenido total de proteínas aumenta en un 10% en las primeras 12 h postcosecha, para disminuir hasta en un 90% a las

48 horas con respecto de los niveles iniciales de proteína. Estos datos sugieren la degradación de proteínas como fuente de aminoácidos libres. [King et al., 1990].

El uso de proteínas como sustratos alternos en el proceso de respiración del espárrago, trae como consecuencia un aumento en los niveles de amoníaco que es un compuesto tóxico para la planta. El amoníaco aumenta en un 200% en las primeras 24 horas de almacenamiento a una temperatura de 20°C y posteriormente a las 48 horas postcosecha, el incremento es de 15 veces con respecto a los niveles iniciales de amoníaco. El aumento de amoníaco en el espárrago se debe a la deaminación de los aminoácidos asparagina, glutamina y arginina, así como a la actividad de la enzima fenilalaninamoníoliasa, la cual libera amoníaco durante la síntesis de lignina, flavonoides y algunos otros metabolitos secundarios [King et al., 1990].

El contenido lipídico del tejido del espárrago es mínimo, sin embargo, este varía de acuerdo a la zona del turión, registrándose mayores concentraciones en la zona apical del turión, probablemente debido a la alta actividad metabólica de este tejido (división celular) [King et al., 1990].

Por otro lado, Lill et al (1996), encontraron que a mayor concentración de carbohidratos solubles en la punta de los turiones de espárrago menor es la presencia de la podredumbre en las puntas de los mismos, desorden fisiológico que limita la vida postcosecha del espárrago. Posteriormente Lill y Borst (2001), encontraron que los turiones cortos (50 mm) son menos susceptibles a la podredumbre de la punta que los más largos (250 mm), debido a que los turiones más largos tienen menor contenido de carbohidratos solubles con respecto a los más cortos. Además, se ha reportado que la concentración de

carbohidratos es mayor a los inicios de la temporada de cosecha y va disminuyendo conforme esta avanza.

Por lo tanto y de manera global, la calidad del espárrago se reduce conforme se agotan sus reservas de carbohidratos, proteínas y lípidos [Uchino et al., 2004; Irving y Hurst, 1993; Lee et al., 1991; King et al., 1990].

2.7.1.3. Crecimiento y doblado.

La apariencia de los turiones de espárrago es de suma importancia para la comercialización de los mismos. Si los turiones no son enfriados inmediatamente después de su cosecha y almacenados a una temperatura de 5°C (o menor), el crecimiento del turión continúa debido a la actividad meristemática, provocando la separación de las brácteas, lo cual reduce de forma importante la calidad del producto. Además, se ha observado que si la base del turión está en contacto con agua, el crecimiento también se ve favorecido [Paull y Chen, 1999].

Por otro lado, la curvatura de la punta de los turiones de espárrago es ocasionada principalmente por el geotropismo negativo. Esta es una característica típica de los tallos que ocurre principalmente cuando los turiones de espárrago son almacenados horizontalmente y/o a temperaturas mayores a los 5°C. El doblado de la punta de los turiones los hace menos atractivos a la vista del consumidor. También se ha observado el doblado de los turiones cuando el crecimiento de éstos es limitado por las dimensiones de la caja de empaque [Paull y Chen, 1999].

2.7.1.4. Color.

El cambio del color "verde oscuro" de los turiones de espárrago a un verde/amarillo, es otro de los parámetros de calidad importante, que es afectado principalmente por el tiempo de almacenamiento y la temperatura. El cambio en el color del turión, se debe a la degradación de la clorofila, fenómeno que forma parte del proceso natural de la senescencia en las plantas, y que en el espárrago se ha observado que ocurre después de una semana de almacenamiento [Siomos et al., 2000; King et al., 1987].

Por otro lado, el desarrollo de una coloración violeta en las brácteas de los turiones es producido por la acumulación de antocianinas, lo cual reduce la calidad de los turiones de espárrago. La biosíntesis de antocianinas involucra una serie de reacciones bioquímicas, algunas de las cuales son inducidas por la luz, mientras que el resto proceden bajo oscuridad. De acuerdo a esto, se ha observado que la biosíntesis de antocianinas no se presenta en turiones mantenidos en oscuridad constante durante su almacenamiento [Siomos et al., 2001].

2.7.1.5. Textura (Firmeza).

Uno de los parámetros más importantes para evaluar la calidad en los turiones de espárrago verde es la textura. Como ya se mencionó anteriormente, ésta puede aumentar como consecuencia de la lignificación de los tejidos o como una pérdida de la misma (flacidez) debido a la pérdida de la integridad celular (pérdida de presión de turgencia). La celulosa y la pectina son los dos componentes más importantes de la pared celular en frutas y vegetales, que se relacionan con la textura característica de cada producto [Li y

Zhang, 2005; Rodríguez-Arcos et al., 2002a; Siomos et al., 2000; King et al 1990].

Existen tres clases generales de tejido: epitelial (epidermis), vascular y estructural (parénquima, clorenquima y esclerénquima) [Rodríguez-Arcos et al., 2002a; Villanueva-Suárez et al., 1999]. El tejido epitelial se encuentra en la superficie y actúa como una barrera protectora. El tejido vascular está constituido por el xilema y por el floema y su función es el transporte de sales minerales y fotosintatos, respectivamente. En el xilema es donde normalmente se inicia el desarrollo de lignina, lo que proporciona mayor firmeza en los tejidos vegetales en los estados de desarrollo avanzados. El tejido estructural forma la mayor parte del tejido de la planta, el cual está compuesto por tres tipos de células: el parénquima, que constituye la mayor proporción del tejido estructural siendo su principal función como tejido de reserva; el clorenquima, el cual le proporciona un cierto soporte y fuerza a la planta; y el esclerénquima, tejido que le confiere la mayor fuerza mecánica a la planta [Rodríguez-Arcos et al., 2002a].

Las células esclerenquimatosas son más rígidas y compactas conforme avanza el estado de desarrollo del tallo. En los tejidos vegetales comestibles constituidos por el tallo de la planta, como es el caso del turión de espárrago, los tejidos lignificados se encuentran presentes sólo en cantidades muy pequeñas, [Rodríguez-Arcos et al., 2002a].

El aumento en la firmeza, está relacionado con las modificaciones bioquímicas en la composición de la pared celular (constituida por pectinas, hemicelulosa, celulosa, proteínas y fenoles). Durante el almacenamiento postcosecha ocurren cambios sustanciales en cuanto a la estructura y composición de la pared celular, de tal forma que las frutas tienden a

ablandarse mientras que los vegetales a endurecerse; sin embargo, en el espárrago suceden ambos procesos [Rodríguez et al., 1999].

Específicamente en espárrago, se ha observado una pérdida de galactosa que forma parte de la pared celular (fenómeno observado en el ablandamiento de frutas), así como una pérdida de polímeros de xilosa y celulosa en la zona apical (involucrando el ablandamiento en esta zona), mientras que en la zona basal se ha observado un aumento de polímeros de xilosa y celulosa (indicando un endurecimiento en esta zona) [Rodríguez et al., 1999]. Sin embargo, se ha demostrado que los compuestos fenólicos (además de los involucrados en la lignificación) tienen un impacto significativo en la textura del espárrago verde [Rodríguez-Arcos et al., 2002b]. Rodríguez-Arcos et al. (2004) observaron un incremento en los entrecruzamientos entre fenoles y polímeros de xilosa presentándose un aumento en la adhesión celular y con ello un aumento en la firmeza de los turiones de espárrago, principalmente en los tejidos parenquimatosos.

De acuerdo a lo anterior, el aumento de la firmeza en espárrago, es debido a la lignificación de los tejidos fibrosos y vasculares, así como al desarrollo de fibra susceptible a la lignificación, como consecuencia de las modificaciones en la pared celular [An et al., 2005; Rodríguez-Arcos et al., 2002a; Siomos et al., 2000; Báez-Sañudo et al., 1999; Montoya et al., 1999].

La biosíntesis de la fibra está influenciada por diferentes factores como la temperatura pre-cosecha y la temperatura de almacenamiento, entre otros; además se ha observado una correlación positiva con la longitud del turión [An et al., 2005; Rodríguez-Arcos et al., 2002a; Siomos et al., 2000; Montoya et al., 1999]. La mayoría de los componentes de la fibra son derivados de polímeros de la pared celular entre los que se encuentran azúcares neutrales como

ramnosa, fucosa, arabinosa, xylosa, manosa, galactosa y glucosa, además de ácidos urónicos. Las concentraciones y las proporciones relativas de estos componentes se ven afectados durante el almacenamiento del espárrago [Villanueva-Suárez et al., 1999].

El grado de lignificación de los tejidos fibrosos progresa desde la parte basal del turión hacia la parte apical. Además, la lignificación se favorece por la presencia de etileno, ya sea por aplicación exógena o por producción endógena del propio espárrago [Rodríguez-Arcos et al., 2002a; Báez-Sañudo et al., 1999; Montoya et al., 1999].

La lignificación, está controlada por las enzimas fenilalaninamonioliasa, peroxidasa y por isoperoxidasas, las cuales son estimuladas positivamente por la temperatura y la intensidad luminosa. En plantas, las enzimas peroxidasa involucradas en la lignificación son responsables de la polimerización de los alcoholes hidroxicinámicos con la lignina. Mientras que la enzima fenilalaninamonioliasa es responsable de la conversión de L-fenilalanina al ácido trans-cinámico, el cual es un intermediario clave en el metabolismo de la lignina [An et al., 2005; Siomos et al., 2000].

Por otro lado, la disminución en la firmeza del turión de espárrago es debido a la pérdida de la integridad celular. King et al (1990), observaron que a las 96 horas postcosecha a 20°C, el tonoplasto celular se había degenerado, así como otros componentes celulares, como es el caso de los ribosomas. Sin embargo, este proceso degenerativo (degeneración estructural de plástidos) se inicia a partir de las 24 horas postcosecha y se da inicialmente en las células corticales internas, antes que en las externas. Lo que sugiere que el espárrago puede presentar un deterioro fisiológico más avanzado que el indicado por su apariencia externa [King et al., 1990; Costa et al., 2006].

Por todo lo anterior, la textura y los cambios en la firmeza de los turiones de espárrago se relacionan con el contenido de fibra y el grado de lignificación de la misma [Rodríguez-Arcos et al., 2002a; Hennion y Hartmann, 1990]. Así como con la pérdida de la integridad celular, provocando que los tejidos se vuelvan más vulnerables a desórdenes fisiológicos y ataques por microorganismos [Rodríguez-Arcos et al., 2002; Bhowmik y Matsui, 2003].

2.7.1.6. Sabor.

A pesar de que la mayoría de los análisis se han enfocado en minimizar los problemas fisiológicos antes descritos, King et al., (1987) encontraron una alta correlación entre el sabor y el deterioro de la calidad del turión de espárrago. Este cambio del sabor del turión se debe a la pérdida de carbohidratos solubles (debido a la alta tasa de respiración), por lo que se presenta como un cambio de la dulzura principalmente de la punta del turión. Tanto la parte media como la basal permanecen sin cambios por un período mayor, al no ser tan activas metabólicamente como la zona apical [King et al., 1987]. Además, la lignificación de los tejidos del espárrago provoca el desarrollo de sabores amargos indeseables [Sun et al., 2005].

2.8. Técnicas Postcosecha para la Conservación del Espárrago

Para mantener la frescura y la calidad postcosecha de los turiones de espárrago, las tecnologías actuales tienen como objetivo el control de los procesos metabólicos en general, donde la respiración es el principal de ellos. Esto se ha logrado mediante la utilización de: atmósferas modificadas,

temperaturas de refrigeración y procesos de escaldado, entre otros. Sin embargo, estas tecnologías presentan ciertas desventajas [Uchino et al., 2004; Villanueva-Suárez et al., 1999].

2.8.1. Atmósferas modificadas

Experimentos recientes en atmósferas modificadas, han demostrado que independientemente de la temperatura de almacenamiento, la tasa de respiración del espárrago es afectada por la composición del aire que rodea al producto, principalmente por la acumulación de CO₂, el cual es producido por el proceso de respiración de los turiones [Bhowmik y Matsui, 2003; Villanueva et al., 2005; Gariépy et al., 1991]. Dentro del envase, la composición del gas depende del balance entre las reacciones metabólicas del espárrago y las propiedades de difusión del CO₂ de la película plástica [Villanueva et al., 2005]. Además, se ha observado que una concentración de CO₂ del 10%, inhibe la síntesis de antocianinas y además promueve su degradación (previniendo la coloración violeta de las brácteas), mantiene la concentración de algunos antioxidantes (ácido ascórbico y glutatión) e inhibe la producción de etileno endógeno (evitando la lignificación de los tejidos fibrosos) [Mckenzie et al., 2004; Siomos et al., 2005; Siomos et al., 2001; Saito et al., 2000].

Mediante el uso de atmósferas modificadas se ha logrado aumentar la vida de anaquel de los turiones de espárrago. Sin embargo, esto sólo ha sido posible durante períodos de almacenamiento en frío, por lo que el uso de esta tecnología solo presenta una mejora adicional poco rentable [Bhowmik y Matsui, 2003; Siomos et al., 2000].

Por otro lado, mediante la tecnología de atmósferas modificadas, actualmente se están realizando estudios que tienen por objetivo, extender la vida de anaquel a temperatura ambiente. Sin embargo, para el caso de espárrago, la aplicación de esta tecnología requiere del uso de temperaturas de refrigeración. Debido a esto, la utilización de atmósferas controladas no representa un efecto benéfico sustancial al efecto de las bajas temperaturas [An et al., 2006; Villanueva et al., 2005; Bhowmik y Matsui, 2003; Siomos et al., 2000].

El objetivo principal de las atmósferas modificadas, es disminuir la presión parcial de O_2 dentro del empaque en el que se encuentra el espárrago, así como mantener una alta humedad relativa (90 al 95 % como mínima, ya que la óptima es del 95 – 99%) [Hernández-Rivera et al., 1992; Mckenzie et al., 2004]. Con esto se logra disminuir la velocidad de la respiración del turión debido a la reducción en la concentración de O_2 , el cual es necesario para oxidar las reservas energéticas, además de mantener al espárrago fresco (turgente), respectivamente [Mckenzie et al., 2004].

Para el espárrago, se recomienda una concentración de CO_2 del 10%, y de O_2 del 3 al 5%, con el fin de evitar la activación del metabolismo anaeróbico [Mckenzie et al., 2004; Gariépy et al., 1991].

En tejidos vegetales, cuando la concentración de O_2 disminuye ($< 3\%$) y aumenta la concentración de CO_2 ($> 10\%$), el camino metabólico de la glicólisis anaeróbica se activa, lo cual trae como consecuencia la acumulación de etanol y/o ácido láctico. En el caso de espárrago, se ha reportado que bajo condiciones de anoxia acumula etanol, lo cual es una de las principales desventajas en el uso de esta tecnología postcosecha, ya que este metabolito le confiere olores y sabores desagradables al producto [Kennedy et al., 1992].

2.8.2. Temperaturas de refrigeración.

La respiración es un proceso metabólico que se encuentra estrechamente relacionado con la pérdida de calidad del turión de espárrago, siendo la temperatura el factor ambiental que tiene mayor influencia sobre la tasa de respiración [Yasunaga et al., 2002; Bhowmik et al., 2001; Kader, 1992]. Además, la actividad enzimática y la permeabilidad de las membranas a los iones (procesos intrínsecamente ligados a la respiración) son afectadas directamente por la temperatura [Yasunaga et al., 2002].

Por lo tanto, someter al turión a una temperatura de 0 a 5°C inmediatamente después de la cosecha (para eliminar el calor de campo) es de vital importancia, además esta práctica ayuda a disminuir la pérdida de peso fresco del turión. El uso de temperaturas de refrigeración durante su almacenamiento en un rango de 0 y 2°C permite aumentar la vida de anaquel del producto desde 4 a 5 días a temperatura ambiente hasta 2 a 3 semanas [An et al., 2006; Siomos et al., 2000; Báez-Sañudo et al., 1999; García-Gimeno et al., 1998; Hurst et al., 1998; Lill y Borst, 2001; Gariépy et al., 1991]. Además de lo anterior, Gariépy et al (1991) observaron que a temperaturas de almacenamiento mayores de 4°C, los azúcares y vitaminas del turión disminuyen rápidamente y se promueve el desarrollo de fibra (principalmente en la base del turión).

De manera general, las vías del metabolismo proceden más lentamente a temperaturas de refrigeración, como lo sugiere la alta correlación entre el número de "horas acumuladas a temperaturas de refrigeración" y la pérdida de calidad de los turiones [King et al., 1987; Klieber y Wills, 1992; Bhowmik et al., 2002]. Sin embargo, con el uso de esta tecnología se puede inducir el desorden fisiológico conocido como daño por frío, especialmente a

temperaturas menores de 2°C por un período mayor a los 10 días. El daño por frío en los turiones afecta principalmente a la zona apical que se torna opaca y flácida, ya sea en la totalidad o en una parte de ésta [Báez-Sañudo et al., 1999].

2.8.3. Altas temperaturas (Escaldado).

El uso de altas temperaturas (escaldado), consiste en un calentamiento de las frutas y hortalizas por un tiempo determinado. La optimización del escaldado implica obtener las condiciones ideales de tiempo y temperatura a las cuales se logre minimizar la actividad enzimática responsable del deterioro y sin el detrimento de los atributos de calidad del producto. Las condiciones óptimas de tiempo y temperatura del escaldado dependen de la especie y variedad del producto [Vicente et al., 2006; Lau et al., 2000; Montoya et al., 1999; Paull y Chen, 1999].

Los tratamientos de escaldado en frutas y vegetales (manzana, aguacate, uva, limón, mango, melón, naranja, pimiento y tomate, entre otros), han sido utilizados como una tecnología postcosecha para la desinfección de insectos, controlar el deterioro, retardar la madurez, disminuir la producción de etileno, retardar la degradación de la pared celular, aumentar la capacidad antioxidante e inactivar las enzimas causantes de algunos de los cambios deteriorativos. [Vicente et al., 2006; Siomos et al., 2005; Montoya et al., 1999; Brewer et al., 1995; Williams et al., 1986].

En el espárrago el escaldado se ha utilizado para disminuir el doblado de las puntas del turión, así como para la disminución en la síntesis de antocianinas, las cuales provocan una coloración violeta en las brácteas de los

turiones reduciendo la calidad de los mismos. Además, se ha reportado que el escaldado reduce la fibrosidad del espárrago, lo cual es deseable desde el punto de vista de calidad [Montoya et al., 1999; Sánchez-Pineda et al., 1994].

Específicamente en el espárrago, se ha encontrado que las condiciones óptimas para este tratamiento dependen del diámetro de los turiones, por lo que a mayor diámetro del turión se requiere de un mayor tiempo de escaldado, [Paull y Chen, 1999; Siomos et al., 2005]. Sin embargo, un tratamiento de escaldado no adecuado induce cambios indeseables en la firmeza (flacidez) y en el color (de color verde oscuro a verde olivo). [Vicente et al., 2006; Lau et al., 2000; Montoya et al., 1999; Paull y Chen, 1999].

Mediante la inactivación enzimática por escaldado en el espárrago, se ha logrado estabilizar no solo la firmeza, sino también el color, sabor, olor y la calidad nutrimental. La peroxidasa es la enzima indicadora de esta inactivación para la mayoría de las hortalizas [Montoya et al., 1999; Brewer et al., 1995; Williams et al., 1986]. Sin embargo, estudios realizados por Ganthavorn et al. (1991), encontraron que la enzima lipoxigenasa (LOX) era un mejor indicador con respecto a la peroxidasa para el caso específico del espárrago.

2.8.4. Radiación UV-C.

Actualmente se están utilizando tecnologías no térmicas como: campos de pulsos eléctricos, altas presiones continuas e irradiación con luz ultravioleta (UV), como una alternativa a las tecnologías térmicas utilizadas para mantener la calidad de productos hortofrutícolas. Estas tecnologías alternas pueden ofrecer productos alimenticios con bajas cantidades de microorganismos y enzimas que pueden reducir tanto las características nutrimentales como las

sensoriales de los alimentos. Problemas que frecuentemente presentan las tecnologías térmicas [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004].

La radiación UV se encuentra en una región entre los 100 y 400 nm de longitud de onda del espectro electromagnético, la cual a su vez se subdivide en tres regiones la A, B y C (Figura 4), donde cada una de estas regiones presentan diferentes características y pueden ser clasificadas como se muestra en el cuadro 3 [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004; Stapleton, 1992].

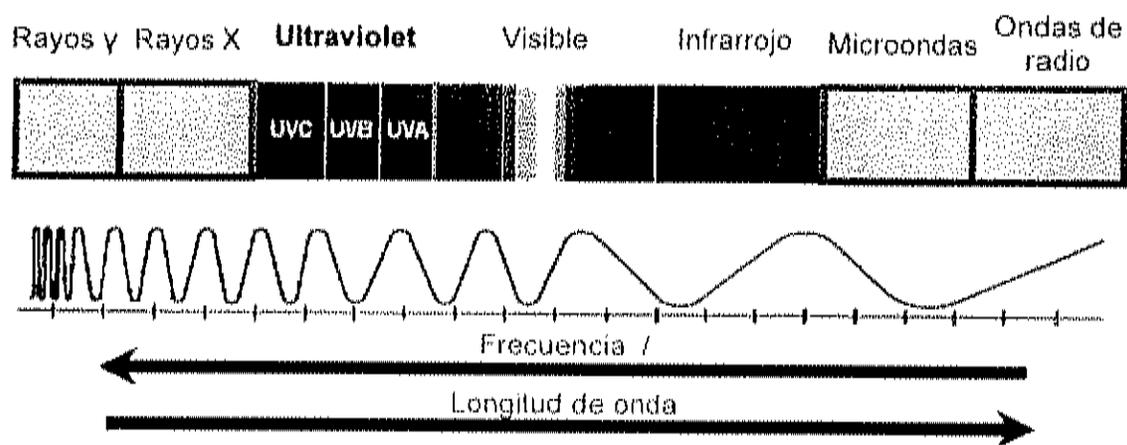


Figura 4. Espectro electromagnético

Cuadro 3. Características de las diferentes regiones de la luz ultravioleta y sus efectos.

| Tipo | Longitud de Onda | Efectos de la Radiación |
|------|------------------|--|
| UV-A | 315-400 nm | Cambios en la piel humana (Taninos) |
| UV-B | 280-315 nm | Quemaduras en piel humana (cáncer) |
| UV-C | 100-280 nm | Quemaduras en piel humana (cáncer) y Propiedad germicida |

La irradiación con luz UV-C (254-260 nm) ha sido utilizada por muchos años por la industria farmacéutica, electrónica, acuícola y más recientemente por la alimenticia, principalmente como un medio de desinfección o inactivación de muchos tipos de microorganismos incluyendo bacterias, virus, protozoos, hongos y levaduras. Se ha reportado que los microorganismos que son expuestos a dicha radiación, sufren alteraciones a nivel del ADN, y como consecuencia, muerte celular [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004].

Se ha observado que los microorganismos suspendidos en el aire son más susceptibles al efecto germicida de la luz UV-C que los microorganismos suspendidos en líquidos como jugos de frutas y vegetales. Esto se debe a las características de penetración de la radiación UV a través de diferentes medios físicos. Debido a esto, solo se utiliza sobre superficies o materiales transparentes como el aire, el agua y el polietileno, etc. [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004].

La inactivación de los microorganismos ocurre cuando el microorganismo ha acumulado suficiente radiación en su organismo para que ocurra la muerte celular. Sin embargo, dosis bajas de irradiación con UV-C pueden infligir daños reparables en el DNA [Shama y Alderson, 2005]. Las lesiones más comunes que se presentan a nivel del DNA por efecto de la absorción de UV-C, especialmente a 260 nm (rango óptimo de absorción del DNA) son: dímeros de pirimidina-ciclobutano, dímeros de pirimidina(6,4)pirimidona, dímeros de timina y de citosina (en la misma cadena), otros fotoproductos de DNA y algunas lesiones indirectas como los entrecruzamientos entre moléculas de DNA y proteínas así como daño por especies reactivas de oxígeno como el oxígeno en singulete [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004; Stapleton, 1992].

Estas lesiones del DNA se pueden reparar por tres diferentes mecanismos: fotorreactivación (exposición a un rango mayor de longitud de onda: 370 a 450 nm), supresión (localización y eliminación de las bases dañadas y polimerización de la región de DNA para completar la cadena), o recombinación (durante la replicación no se considera la zona dañada, por lo que las regiones ausentes en la secuencia son reemplazadas utilizando como molde la cadena complementaria de DNA), este tipo de reparación no ha sido reportada en plantas. La reparación del DNA debe de efectuarse antes de la replicación y transcripción del DNA, en caso contrario, estos procesos no podrán realizarse, comprometiendo las funciones celulares y eventualmente conducirán a la muerte celular [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004; Stapleton, 1992].

En lo que respecta al uso de la radiación ultravioleta en la desinfección de alimentos, ésta ha sido equivocadamente asociada con un detrimento en la calidad de los productos alimenticios así como en la calidad nutricional de los mismos [Gardner y Shama, 2000]. Sin embargo, la radiación UV es del tipo no ionizante, por lo que cuenta con la ventaja de no producir radiación residual, ni residuos químicos o productos alternos que pudieran alterar las características sensoriales (sabor, olor y color) de los productos alimenticios. Debido a esto, el detrimento en la calidad de los productos solo sucede cuando las dosis de exposición a la radiación ultravioleta tipo C son muy elevadas, causando algún daño al producto irradiado [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004; Shama y Alderson, 2005; Lu et al., 1991].

Los daños provocados por la radiación UV-C en los tejidos vegetales se pueden clasificar en dos categorías: daño al DNA (mutaciones heredables) y daño a nivel fisiológico (disminución en la síntesis proteica, mal funcionamiento de los cloroplastos, lignificación de tejidos y producción de especies reactivas

de oxígeno), dando como resultado una rápida senescencia del producto [Costa et al., 2006; Shama et al., 2005; Stapleton, 1992].

Por otro lado, la irradiación con UV-C es un proceso muy simple, seco y frío, que requiere de muy poco mantenimiento y es de bajo costo [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004]. Por todas estas razones, el interés en esta tecnología está creciendo día con día en la industria alimenticia [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004; Lu et al., 1991].

La Administración de Fármacos y Alimentos (FDA, por sus siglas en inglés), ha aprobado el uso de la radiación UV-C en la desinfección de agua y jugos de frutas y vegetales, siempre y cuando sea mediante el uso del programa de sistema de análisis de peligros y control de puntos críticos (Hazard Analysis and Critical Control Point (**HACCP**)) para comercializar productos sanos (los alimentos líquidos deberán presentar una reducción de 5 ciclos logarítmicos de microorganismos) y nutritivos al consumidor. La FDA también estipula que de no alcanzarse el nivel de reducción en la carga microbiana, se deberá presentar en la etiqueta dicha información [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004].

Los efectos benéficos de la radiación UV-C sobre frutas y vegetales, ocurren en los niveles donde no es dañina. La utilización de un agente capaz de inducir un estrés ya sea físico o químico a niveles donde únicamente produce beneficios sin efectos negativos, se conoce como 'hormesis' o efecto hormónico [Shama y Alderson, 2005; Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004]. Las dosis necesarias para obtener los efectos hormónicos van desde 0.5 KJ/m² (fresas) hasta 9.0 KJ/m² (naranjas) [Shama y Alderson, 2005].

El efecto 'hormónico' estimula la producción de la enzima fenilalanina-amonio-liasa, que a su vez induce la síntesis de metabolitos secundarios tales como el ácido clorogénico, alcaloides, compuestos fenólicos (que a su vez inhiben la síntesis de giberelinas y auxinas), fitoalexinas y ligninas; que de manera global le confieren al tejido vegetal resistencia tanto al estrés biótico como al abiótico [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004; Frohnmeyer y Staiger, 2003; Costa et al., 2006; Shama y Alderson 2005]. La síntesis de todas estas moléculas están asociadas a una respuesta local (no sistémica), por lo tanto solo el tejido que se encuentra directamente expuesto a la radiación presenta algún efecto [Mercier et al., 2000].

La radiación UV-C ha sido aplicada a frutas y vegetales frescos antes de su almacenamiento, así como a raíces para cumplir con dos objetivos: en primer término para disminuir la cantidad inicial de los microorganismos presentes sobre la superficie de los productos y en segundo término para mantener la calidad de los mismos [Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004; Costa et al., 2006].

En cuanto al efecto germicida, el tratamiento de productos hortofrutícolas (zanahoria, cítricos, tomate, fresa, manzana, durazno, etc) con bajas dosis de UV-C, se ha observado que genera resistencia a enfermedades y a ataque por microorganismos así como una disminución en el desarrollo de infecciones fúngicas debido a la estimulación o inducción de sustancias antimicrobianas [Shama y Alderson, 2005; Mercier et al., 2000; Baka et al., 1999; Lu et al., 1991]. Por otro lado, Shama y Alderson (2005) y Lu et al, (1991) encontraron que la resistencia de los tejidos vegetales a los microorganismos así como el nivel de respuesta a la irradiación UV-C, están íntimamente relacionados con el grado de madurez del producto. Se ha observado que la

resistencia a las enfermedades y el nivel de respuesta disminuyen considerablemente conforme avanza la madurez del producto.

En cuanto al efecto de la irradiación UV-C sobre la calidad de los productos hortofrutícolas, se ha observado un aumento en la firmeza (manzana, durazno, fresa, tomate y brócoli), en la acidez (manzana, durazno y fresa) y en el ácido ascórbico (manzana y durazno), mientras que el porcentaje de sólidos solubles y el pH disminuyen (manzana y durazno), así como la síntesis de etileno (brócoli). También se ha observado un aumento en la concentración de fitoalexinas (soya), en resveratrol y viniferinas (uva) y en la capacidad antioxidante (brócoli y tomate). Además, la velocidad de senescencia disminuye (manzana, fresa, tomate y brócoli). Se ha observado también que la radiación con UV-C logra disminuir la pérdida de peso fresco en manzanas, así como la pérdida de la integridad celular en fresa y brócoli. [Costa et al., 2006; Shama y Alderson, 2005; Mercier et al., 2000; Baka et al., 1999; Lu et al., 1991].

La aplicación de la radiación UV-C en especies como papa y zanahoria [Sparrow y Christensen, 1954] logró reducir significativamente la brotación de raíces. Por otro lado, en el 2003 se encontró que en el perejil se redujo el crecimiento y la apertura del ápice meristemático debido a daños en los cromosomas. Se ha encontrado que la radiación UV-C inhibe el ciclo celular, además de la biosíntesis de giberelinas y auxinas, con efectos negativos sobre el ciclo celular y la elongación celular, limitando así la división celular [Frohnmeier y Staiger, 2003].

Las tecnologías desarrolladas hasta el momento han logrado mantener la calidad postcosecha de los turiones de espárrago por un periodo máximo de 3 semanas. Sin embargo, estas tecnologías (temperaturas de refrigeración,

aplicación de atmósferas modificadas y procesos de escaldado) presentan algunas desventajas sobre la calidad del espárrago verde, como lo son, el daño por frío, síntesis de metabolitos tóxicos como etanol, así como una pérdida en la firmeza y en el color del turión, respectivamente. Por lo tanto y en base a lo anterior, en el presente estudio se utilizó la radiación UV-C (que es un proceso limpio, seco, frío y aprobado por la FDA) en combinación con temperaturas de refrigeración, como una tecnología alterna para el mantenimiento de la calidad postcosecha del turión de espárrago.

3. HIPÓTESIS

La irradiación UV-C en combinación con diferentes temperaturas de refrigeración disminuirá la actividad metabólica del meristemo apical del espárrago.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Reducir la actividad metabólica del meristemo apical del espárrago mediante la aplicación de radiación UV-C en combinación con diferentes temperaturas.

4.1.2. Objetivos específicos

1) Evaluar el efecto de la irradiación UV-C en combinación con diferentes temperaturas de refrigeración sobre la actividad metabólica del meristemo apical del espárrago.

2) Evaluar el efecto de la irradiación UV-C en combinación con diferentes temperaturas de refrigeración sobre la calidad postcosecha del espárrago.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Material Vegetal.

El experimento se realizó con *Asparagus officinalis L.* de calidad estándar (variedad Brock), cosechado en la región de Caborca, Sonora. Una vez cosechados, los turiones fueron transportados inmediatamente a la empacadora, donde se eliminó el calor de campo de los turiones de espárrago mediante un hidrocenfrado, donde el agua utilizada para tal proceso contenía 200 ppm de cloro, para la desinfección de los mismos. Una vez empacados, fueron transportados enhielados a los laboratorios del CIAD, donde se almacenaron a 2°C por espacio de 12 h para lograr la estabilización del espárrago. Posteriormente se realizó la aplicación de los tratamientos de irradiación con UV-C.

Se llevaron a cabo dos cosechas (con un intervalo de 14 días entre una y otra), una para los turiones de espárrago que fueron almacenados a 2 y 20°C y en otra ocasión para el lote almacenado a 5°C, respectivamente.

5.2. Tratamientos

Se utilizaron 3 temperaturas de almacenamiento: 2, 5 y 20°C; las aplicaciones de irradiación con UV-C fueron de 5 (2.46 kJ/m²) y 10 minutos (4.93 kJ/m²) para cada temperatura. Teniendo un lote control (sin aplicación de UV-C) para cada una de las temperaturas utilizadas. El tiempo de almacenamiento fue de 5 días para el lote a 20°C y de 20 días para los lotes almacenados a 2 y 5°C.

5.3. Actividad metabólica

5.3.1. Tasa de Respiración.

La producción de CO₂ se determinó de acuerdo al método propuesto por Watada y Massié (1981). La medición se realizó diariamente durante los primeros 5 días para todos los lotes. Posterior a este período se realizaron muestreos cada 4 días hasta los 20 días de almacenamiento, para los lotes a 2 y 5°C, descartándose el lote a 20°C debido a que los espárragos se encontraban con una calidad muy baja. Se colocaron dos turiones de espárrago por tratamiento en frascos de plástico de 1 Lt. Los frascos fueron sellados con parafilm alrededor de la tapa para evitar fugas. Para el lote almacenado a 20°C se utilizó un tiempo de incubación de una hora y para los lotes a 2 y 5°C se utilizó un tiempo de tres horas. Cada tratamiento fue evaluado por duplicado.

Una vez transcurrido el tiempo de incubación, se extrajo 1 ml de gas del espacio de cabeza del frasco, utilizando una jeringa hipodérmica, se inyectó en un cromatógrafo de gases Varian Star 3400CX, equipado con dos detectores uno de ionización de flama (FID) y otro de conductividad térmica (TCD). Se utilizó una columna (Supelco) metálica de 2 m de largo y 3.175 mm de diámetro interno, empacada con Hayesep N 80/100.

Las condiciones experimentales del equipo fueron: las temperaturas de inyección y de la columna a 100 y 80°C respectivamente, el detector FID a 120°C y el TCD a 170°C. Se utilizó nitrógeno como gas acarreador con un flujo de 25 ml/min. En cada medición se inyectó un estándar de CO₂ al 5% para realizar los cálculos de concentración de dióxido de carbono. La cuantificación

de CO₂ se realizó mediante la comparación de las áreas bajo la curva de las muestras con respecto al área del estándar de concentración conocida (CO₂ al 5%), de acuerdo a la ecuación 2:

$$\text{ml CO}_2/\text{Kg}\cdot\text{h} = (\text{A})(\text{B})(\text{C}) / (\text{D})(\text{E})(\text{F}) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- A = área de la muestra (UA)
- B = concentración del estándar (%)
- C = Volumen del espacio de cabeza (ml)
- D = área del estándar (UA)
- E = peso de la muestra (Kg)
- F = tiempo de incubación (h)

5.3.2. Calor metabólico.

Se realizó un estudio isotérmico a 25°C para la evaluación del calor metabólico (qmet) del meristemo apical de los turiones de espárrago. Las mediciones se realizaron diariamente durante los primeros cuatro días de almacenamiento y posteriormente a los 6, 8, 12 y 16 días.

El instrumento utilizado fue un calorímetro diferencial de barrido (CDB) CSC 4100 (CSC, Provo Utah) con cuatro celdas metálicas herméticas de 1 cm³ de capacidad volumétrica. Una línea base de ± 1 μW y una capacidad de barrido de temperatura de -30 a 110°C. Con el fin de mantener una temperatura estable de 15°C en el interior del calorímetro, se utilizó un baño circulante refrigerante (PolyScience, Niles, IL). Para prevenir la condensación de humedad dentro del calorímetro se aplicó un flujo constante de N₂ seco a

2.5 lb/plg², de acuerdo a la metodología descrita por Iversen et al (1989) y Gardea et al (1994).

Para llevar a cabo el análisis, se realizó un corte con un bisturí en el extremo apical del turión de espárrago de aproximadamente 1cm. Se removieron las brácteas para eliminar la mayor cantidad de tejido que no correspondiera al meristemo apical. El tejido resultante fue colocado con el corte basal en contacto con el fondo de las celdas calorimétricas, donde previamente se colocaron 40 µL de agua estéril para prevenir su desecación. Se utilizaron dos puntas (conteniendo el meristemo) por celda con el fin de asegurar la producción suficiente de calor para generar una señal confiable (100 µW). Se realizaron 3 repeticiones por tratamiento.

5.4. Criterios de calidad

5.4.1. Firmeza.

La firmeza se evaluó cada 4 días, iniciando con el día cero (inmediatamente después del tratamiento) y hasta los 20 días de almacenamiento para los lotes a 2 y 5°C. La firmeza fue evaluada en la parte media de tres secciones de 6 cm de longitud cada una: basal, media y apical del turión, los resultados se reportan como el promedio de las tres zonas evaluadas. La determinación se realizó mediante un texturómetro Stable Micro Systems Texture Analyser TA-XT2, según la metodología propuesta por Rodríguez-Arcos et al, (2002a) con las siguientes modificaciones: Se utilizó un punzón de punta roma con un diámetro de 1.5 mm a una velocidad de 0.1 mm/seg y una distancia de penetración de 0.5 cm.

La firmeza se expresó como la fuerza (Newtons, Nw) necesaria para penetrar el tejido. Se realizaron 6 repeticiones por tratamiento. Los resultados que se reportan en el presente trabajo corresponden a la media de la determinación en las tres secciones de cada turión.

5.4.2. Crecimiento.

El crecimiento del turión se determinó cada 4 días (iniciando con el día cero) y hasta los 20 días de almacenamiento para los lotes a 2 y 5°C, sobre las mismas unidades experimentales a lo largo del experimento, mediante una regla graduada, según la metodología propuesta por Paul y Chen (1999). Se realizaron 10 repeticiones por tratamiento.

5.4.3. Doblado.

El doblado del turión se midió cada 4 días (iniciando en el día cero) y hasta los 20 días de almacenamiento para los lotes a 2 y 5°C, en las mismas unidades experimentales a lo largo del experimento, mediante un transportador, según la metodología propuesta por Paul y Chen (1999). Se realizaron 10 repeticiones por tratamiento.

5.4.4. Porcentaje de pérdida de peso fresco.

La pérdida de peso fresco se determinó cada 4 días (iniciando el día cero) y hasta los 20 días de almacenamiento para los lotes a 2 y 5°C, en las mismas unidades experimentales a lo largo del experimento, mediante una

balanza analítica (Ohaus Navigator, N1B110). Se realizaron 10 repeticiones por tratamiento. Se calculó el porcentaje de pérdida de peso fresco de los turiones de espárrago según Paull y Chen (1999) utilizando la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Pérdida de peso fresco} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

5.4.5. Carbohidratos solubles.

En la determinación de carbohidratos solubles (glucosa, fructosa y sacarosa) se utilizó la metodología propuesta por López-Hernández et al., (1994) con algunas modificaciones en la proporción de la fase móvil. La determinación de los azúcares se realizó en tres secciones del turión de espárrago, zona basal, media y apical, respectivamente. Para los extractos se pesaron 5 g de muestra congelada de espárrago (de cada zona) y se homogenizaron con 25 mL de una mezcla 1:4 de etanol y agua (25°C). Posteriormente los homogenizados se filtraron con doble tela de organza, los filtrados se centrifugaron a 6000 rpm por 15 min (Eppendorf 5415D). Se tomó el sobrenadante y se filtró con una jeringa para HPLC utilizando filtros acrodisc de 0.2 µm de tamaño de poro. Por último, el filtrado resultante se almacenó a -20°C hasta su análisis.

Se tomaron 10 µL del extracto filtrado y se inyectaron en un equipo de Cromatografía Líquida de Alta Presión Varian ProStar 210 con una bomba isocrática. Se empleó una columna Supelco (Lc-NH₂) de 25 cm de longitud por 4.6 mm de diámetro interno y 5 µm de tamaño de partícula, con un flujo de 1.5 mL por minuto y una fase móvil de acetonitrilo-agua (85:15 v/v), con un tiempo de análisis de 15 minutos. La detección se realizó mediante un detector IR

(índice de refracción) Varian ProStar 350 a 35°C (temperatura de la celda) y a 64×10^{-6} unidades del índice de refracción de la escala completa. Se realizaron 3 repeticiones por tratamiento. Para la cuantificación de los azúcares se utilizó una curva estándar de glucosa, fructosa y sacarosa, con un rango de concentración de 1.25 a 40 mg/mL.

5.4.6. Color.

La determinación del color se determinó en base a los parámetros de color (L^* , a^* y b^*) mediante la metodología descrita por Lau et al (2000). Con algunas modificaciones. Se determinó el color en tres zonas del turión (punta, medio y base) sobre la superficie de los turiones de espárrago, los resultados se reportan como el promedio de las tres zonas. Se utilizó un colorímetro portátil Minolta CR-300, el cual se calibró mediante el uso de la placa blanca de referencia del equipo.

Donde el parámetro L^* indica la luminosidad (con una escala de 0 a 100), representando colores negros u opacos (0) y colores blancos o de máxima brillantez (100). El parámetro a^* indica el cambio de color de verde a rojo (con una escala de -60 a +60), correspondiendo el color rojo al valor máximo de la escala positiva, gris cuando es igual a 0 y verde cuando el valor corresponde al mínimo en la escala negativa. El parámetro b^* indica el cambio del color del amarillo al azul (con una escala de -60 a +60), siendo el color amarillo el máximo valor positivo, gris cuando es igual a 0 y azul cuando el valor corresponde al mínimo en la escala negativa. Se realizaron 10 repeticiones por tratamiento.

Los resultados se expresaron como el ángulo de matiz ($^{\circ}$ Hue) y croma. El ángulo $^{\circ}$ Hue se determina mediante la ecuación 4 (para el caso de valores de $a^* > 0$ y $b^* > 0$) y la ecuación 5 (para el caso de valores de $a^* < 0$ y $b^* > 0$). Cada uno de los ángulos representa un color específico en la esfera de color, de tal forma que un ángulo de 0° corresponde a un color rojo, un ángulo de 90° a un color amarillo, 180° a un color verde y 270° a un color azul.

$$^{\circ}\text{Hue} = \text{arcTan}(b^*/a^*) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$^{\circ}\text{Hue} = 180^{\circ} + \text{arcTan}(b^*/a^*) \quad \text{Ecuación 5}$$

El ángulo croma se calcula mediante la ecuación 6. Este parámetro indica la saturación o pureza del color definido por el ángulo $^{\circ}$ Hue, abarcando un rango de valores entre 0 y 60.

$$\text{Croma} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{Ecuación 6}$$

5.4.7. Estado hídrico.

El cálculo de los potenciales hídrico, osmótico y de turgencia se determinó en las zonas basal y apical (los resultados se reportan como el promedio de las dos zonas) de tres turiones de espárrago para cada tratamiento, utilizando la metodología propuesta por Rangel et al., (2004).

5.4.7.1. Potencial osmótico.

El potencial osmótico se determinó en la zona basal y apical de tres turiones de espárrago por tratamiento con tres repeticiones respectivamente.

Se utilizó un osmómetro de presión de vapor Wescor modelo 5520, de la siguiente manera: la muestra se obtuvo del exudado de las secciones basal y apical de los turiones de espárrago congelados a -20°C y posteriormente descongelados a temperatura ambiente para romper las membranas celulares. En este punto el potencial de turgencia fue igual a cero. A continuación se tomaron $10\ \mu\text{L}$ del exudado del espárrago y se colocaron en un disco de papel filtro de $0.32\ \text{cm}^2$, instalado previamente en la cámara de recepción del equipo en cuestión. El osmómetro fue previamente calibrado con una solución de $290\ \text{mmol/Kg}$ de NaCl. Los resultados de molalidad obtenidos, fueron convertidos a potencial osmótico, utilizando la ecuación 7 (ecuación de Van't Hoff).

$$\Psi_s = -C_iRT \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

C_i = Concentración molar de la solución de sacarosa

R = $0.0083\ \text{Kg MPa} / \text{mol } ^{\circ}\text{K}$ (Constante ideal de los gases)

T = Temperatura en $^{\circ}\text{K}$

5.4.7.2. Potencial de presión.

El potencial de presión se calculó por diferencia entre el potencial hídrico y el osmótico, según la ecuación 8.

$$\Psi_p = \Psi_w + \Psi_s \quad \text{Ecuación 8}$$

5.4.7.3. Potencial hídrico.

Para el potencial hídrico se utilizó el método de volumen constante. Se tomó el peso inicial de un cilindro de 3 cm de longitud de la zona basal y otro de la zona apical con tres repeticiones por zona y por tratamiento. Posteriormente se colocaron en soluciones de sacarosa de distintas molalidades (0.1, 0.05, 0.025 y 0.015 *m*). A estas soluciones se les determinó el valor de su potencial osmótico mediante la ecuación 7.

Tomando en consideración que en las soluciones de sacarosa preparadas, el potencial de presión es igual a 0 (ya que no se encuentra confinada por una membrana), entonces el potencial hídrico (Ψ_w) es igual al potencial osmótico (Ψ_s) [Salisbury y Ross, 1991]. Por lo tanto al obtener los valores del potencial osmótico de las soluciones de sacarosa mediante la ecuación 5, se obtiene también el potencial hídrico de las mismas.

Las muestras se colocaron en las soluciones de sacarosa y se dejaron en reposo por espacio de 2.25 h, tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio entre el tejido vegetal y la solución. Posteriormente, las muestras fueron retiradas de las soluciones, se les eliminó el exceso de agua superficial y se pesaron. Posteriormente, se graficaron los valores del peso obtenido para cada solución *m* utilizada para encontrar la solución donde el tejido vegetal no ganó ni perdió peso. De esta forma, la solución donde la muestra vegetal no ganó ni perdió peso corresponde con el potencial hídrico del tejido vegetal.

6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial de tratamientos de 3x3 para el parámetro de la respiración y de 2X3 para los parámetros de: calor metabólico, firmeza, color, carbohidratos, crecimiento, doblado, pérdida de peso fresco y los potenciales hídrico, osmótico y de presión, donde los factores fueron la temperatura de almacenamiento con tres niveles: 2, 5 y 20°C; y radiación con UV-C con tres niveles: 0, 2.46 y 4.93 KJ/m². Los datos obtenidos se analizaron con el programa estadístico Number Cruncher Statistical Systems (NCSS), versión 2003. Mediante un análisis de covarianza con un nivel de significancia de 0.05, donde la covariable fué el tiempo (días de almacenamiento).

$$Y_{ij} = \mu + t_i + \beta x_{ij} + E_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Observación de la variable de respuesta en el tratamiento i y la unidad experimental j .

μ = Efecto de la media general.

T_i = Efecto del tratamiento.

βx_{ij} = Efecto de la covariable (días de almacenamiento).

E_{ij} = Efecto del error experimental.

La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey-Kramer con un nivel de significancia del 95%. La unidad experimental corresponde a un turión de espárrago.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Actividad Metabólica

7.1.1. Tasa de respiración.

En las figuras 5A, 5B y 5C se presenta la tasa de respiración de los turiones de espárrago almacenados a 2, 5 y 20°C respectivamente.

A las 24 h de almacenamiento se observó una notable disminución en la tasa de respiración para los lotes almacenados a 5 y 20°C, independientemente del tratamiento aplicado. La tasa de respiración de los espárragos de los lotes: 0, 2.46 y 4.93 KJ/m² de irradiación con UV-C disminuyó en 28, 30 y 26% para los turiones almacenados a 5°C, respectivamente, mientras que se registró un 41, 43 y 50% de disminución en la tasa de respiración para los turiones almacenados a 20°C, respectivamente. La disminución de la tasa de respiración observada en el presente experimento, concuerda por lo reportado por Lill et al. (1990) y Brash et al. (1995) ya que ellos reportan un 30 y 50% de disminución en la tasa de respiración después de 24 h postcosecha, respectivamente. Después de este período de almacenamiento, la disminución en la tasa de respiración de los turiones de espárrago fue mínima y se encuentra directamente relacionada con la temperatura de almacenamiento [Hennion y Hartmann, 1990].

En el caso del lote almacenado a 2°C, no se registraron cambios significativos en la tasa de respiración durante el almacenamiento, independientemente de los tratamientos. Un comportamiento similar fue

observado por Brash et al. (1995), donde ellos encontraron una disminución en la tasa de respiración de 2.2 a 1.5 ml de $\text{CO}_2 \cdot \text{h} \cdot \text{kg}$ y de 1.7 a 1.3 ml de $\text{CO}_2 \cdot \text{h} \cdot \text{kg}$ para turiones de espárrago almacenados a 5 y 0°C , respectivamente.

De manera global, no se observó un efecto significativo de la irradiación con UV-C en la tasa de respiración de los tratamientos con respecto al control, en ninguna de las temperaturas de almacenamiento utilizadas ($P > 0.05$).

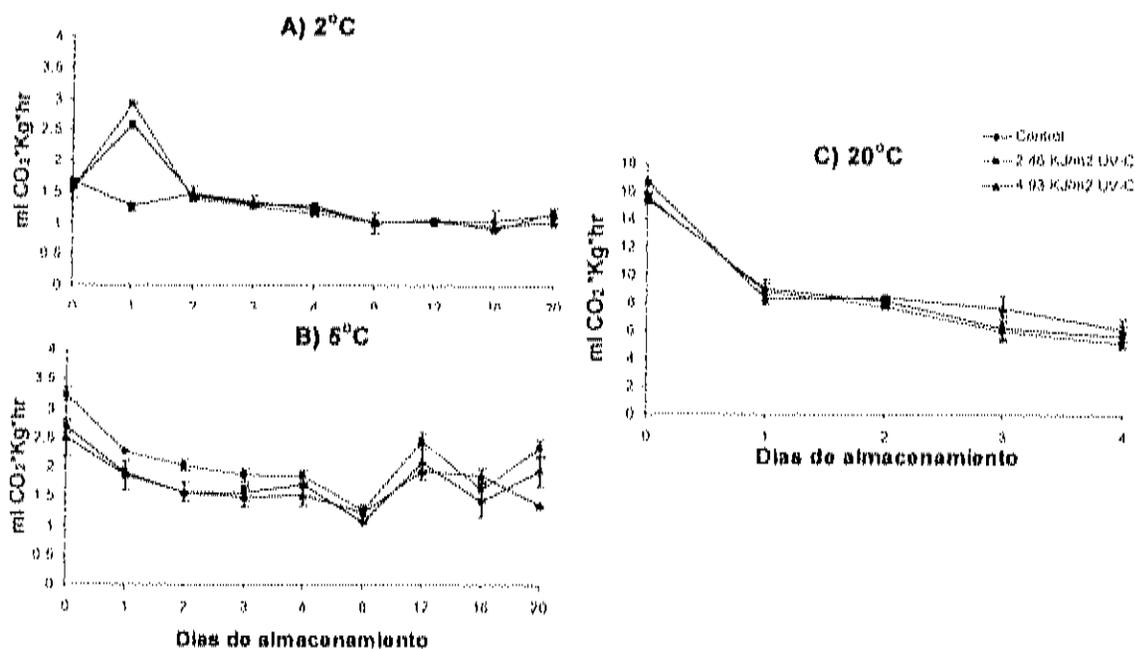


Figura 5. Velocidad de respiración de turiones de espárrago tratados con UV-C (0, 2.46 y 4.93 kJ/m^2) y almacenados a 2 (A), 5 (B) y 20°C (C), respectivamente. Las barras horizontales corresponden a la desviación estándar de 2 repeticiones.

Los datos iniciales de respiración para todas las temperaturas de almacenamiento son similares con lo reportado por Brash et al. (1995), donde ellos encontraron valores de 1.8, 2.5 y 14.5 ml de $\text{CO}_2 \cdot \text{h} \cdot \text{kg}$ para 2, 5 y 20°C , respectivamente. La producción inicial de CO_2 para todas las temperaturas de almacenamiento (independientemente de los tratamientos), varió de manera

directamente proporcional a la temperatura, este mismo fenómeno fue observado por Brash et al. (1995).

7.1.2. Calor metabólico.

En la figura 6A, se presenta el calor metabólico (q_{met}) del meristemo apical de los turiones de espárrago almacenados a 2°C, donde se puede observar que disminuyó de manera gradual con respecto a los días de almacenamiento. Sin embargo, esta disminución no fue estadísticamente significativa ($P>0.05$) entre el tratamiento control y los tratamientos irradiados con UV-C. La actividad metabólica varió desde un valor inicial de 40.27 $\mu W \cdot mg \text{ ps}^{-1}$ a 26.05, 26.16 y 27.67, para el control, y los tratamientos de 2.46 y 4.93 KJ/m^2 , respectivamente (Figura 6A).

Asimismo, los turiones de espárrago almacenados a 5°C, presentaron una disminución del q_{met} similar a los turiones de espárrago almacenados a 2°C. Donde la disminución del q_{met} varió desde desde un valor inicial de 40.27 $\mu W \cdot mg \text{ ps}^{-1}$ a 23.59, 23.20 y 21.36 para el control, y los tratamientos de 2.46 y 4.93 KJ/m^2 , respectivamente (Figura 6B). No se observaron diferencias significativas ($P>0.05$) entre el tratamiento control y los tratamientos irradiados con UV-C. Iversen et al (1989), reportaron un q_{met} de 0.2 $\mu W \cdot mg \text{ ps}^{-1}$ en tejido de piña, esto evidencia la alta actividad metabólica del meristemo apical del espárrago comparado con otros productos hortofrutícolas.

En lo que respecta a la temperatura de almacenamiento, esta no presentó una diferencia significativa ($P>0.05$) entre ambos lotes almacenados a 2 y 5°C, respectivamente. Sin embargo, los turiones de espárrago a 5°C

presentaron de manera general un menor qmet al final del periodo de almacenamiento (Figura 6).

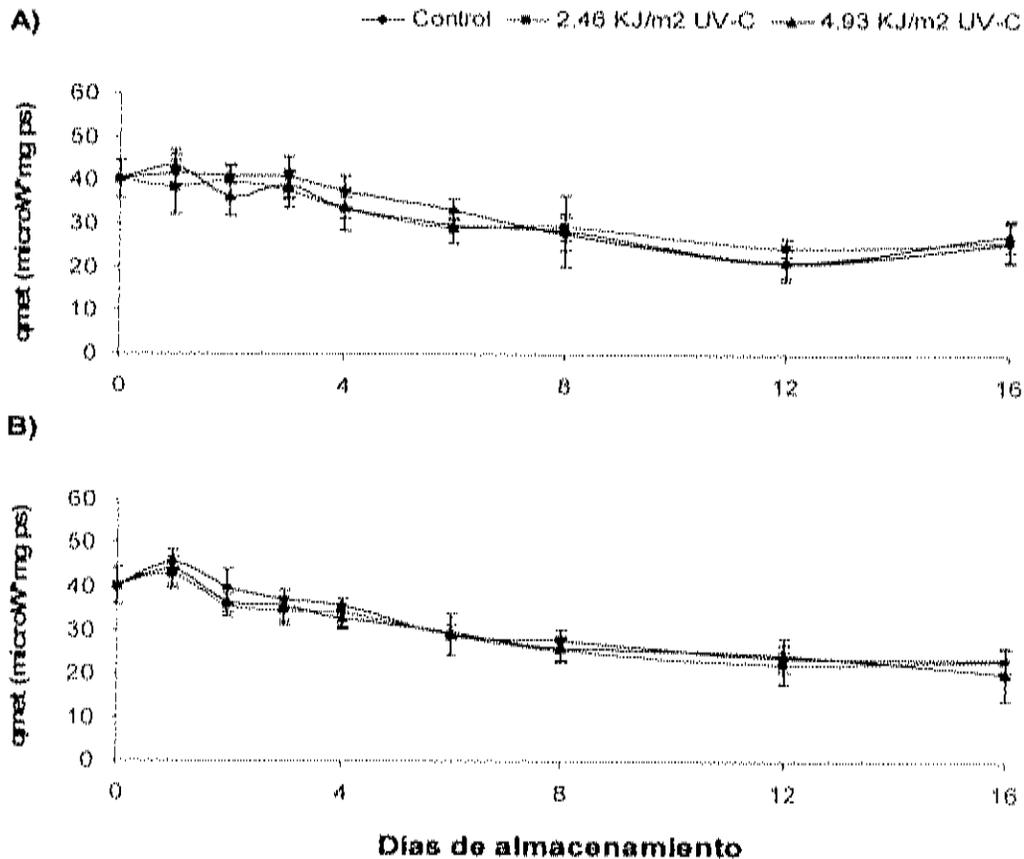


Figura 6. Calor metabólico del meristemo apical de los turiones de espárrago tratados con 0, 2.46 y 4.93 KJ/m² de exposición a la radiación UV-C y almacenados a temperaturas de 2 °C (A) y 5 °C (B). Las barras verticales de cada punto corresponden a la desviación estándar de 6 repeticiones.

El calor metabólico constituye una medida del metabolismo general del tejido en estudio, sin embargo, solo indica la cantidad total de calor que se genera, con lo cual no es posible saber cuales rutas metabólicas son las responsables de la energía que se registra. Sin embargo, la producción de CO₂ se encuentra estrechamente relacionada con la cantidad de energía que se libera debido a la respiración. Es por ello que la determinación del qmet debe ser complementada con la medición del CO₂ producido por el tejido [Salisbury y

Ross, 1991). En la Figura 5A y B se presentaron los resultados de la evaluación de la producción de CO₂. Donde se puede apreciar que el patrón de comportamiento de la producción de CO₂ es muy similar al del qmet. Donde se observa como la velocidad de respiración disminuye en función de los días de almacenamiento, sin cambios significativos (P>0.05) de los tratamientos con respecto al control en ninguna de las temperaturas de almacenamiento.

7.2. Criterios de calidad

7.2.1. Firmeza.

En la figuras 7A y 7B, se muestran el efecto de la irradiación UV-C y las bajas temperaturas sobre la firmeza de los turiones de espárrago. Los tratamientos de irradiación con UV-C de 2.6 y 4.93 KJ/m² no tuvieron un efecto significativo (P>0.05) en la firmeza, con respecto al control, a ninguna de las dos temperaturas de almacenamiento (2 y 5°C) utilizadas en el presente estudio.

Se han reportado valores para la firmeza de espárrago fresco a 21°C de 3 N [Rodríguez-Arcos et al., 2002a], valores que concuerdan con los observados en el lote almacenado a 2°C; 3.95 (control), 3.98 (2.46 KJ/m²) y 3.63 (4.93 KJ/m²) N. Sin embargo, los valores iniciales encontrados en el lote almacenado a 5°C (8.26 N), no concuerdan con los del lote a 2°C (2.86 N). Esto puede ser como consecuencia de que los lotes en cuestión no fueron cosechados el mismo día, por lo que la muestra tiene una variación intrínseca del tiempo de cosecha. Se ha observado que la calidad de los espárragos

cosechados varía conforme avanza la temporada de cosecha [Rodríguez-Arcos et al., 2002b].

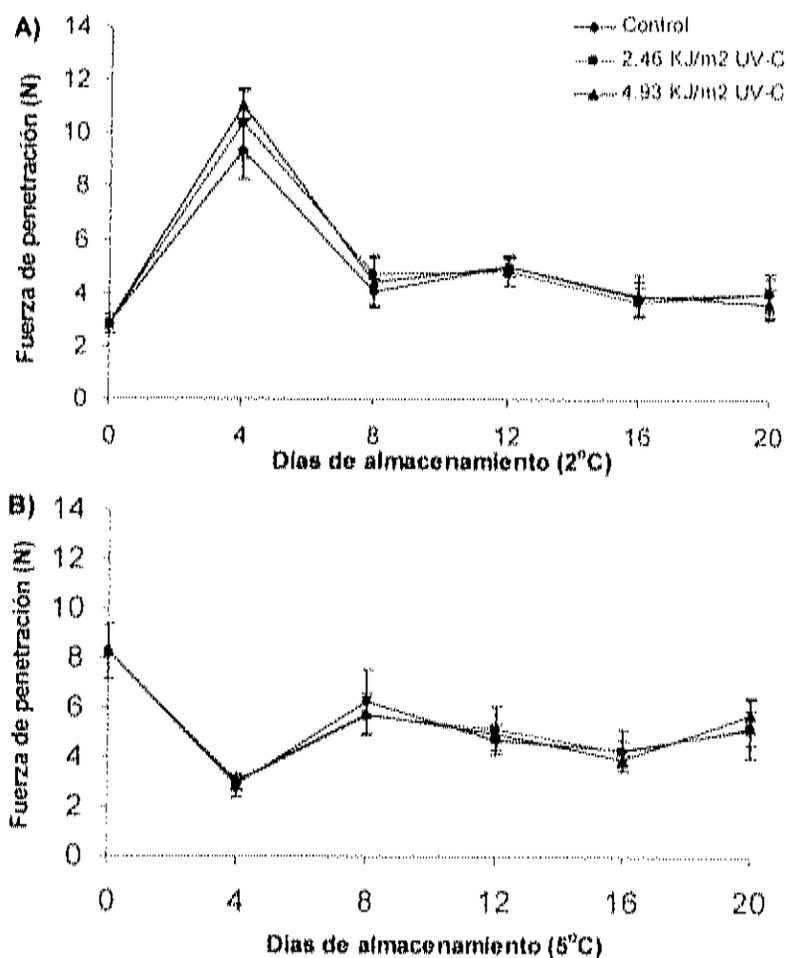


Figura 7. Cambios en la firmeza de turiones de espárrago, tratados con radiación UV-C por 0, 2.46 y 4.93 KJ/m², almacenados a 2 (A) y 5°C (B) por un periodo de 20 días. Las barras verticales de cada punto corresponden a la desviación estándar de 3 repeticiones.

La textura de los turiones de espárrago está estrechamente relacionada con el contenido de fibra y el grado de lignificación de la misma [Lipton, 1990]. Sin embargo, esta propiedad tiene un alto grado de complejidad debido a que se encuentra influenciada por numerosos factores, por lo que es difícil una

medición precisa de la misma [Rodríguez-Arcos et al., 2002a]. Debido a esto, se ha propuesto la determinación de la presión de turgencia como una medida más precisa de los cambios en la firmeza del espárrago blanco (Herppich, et al., 2005).

7.2.2. Crecimiento.

En las figuras 8A y 8B, se presentan los resultados del crecimiento longitudinal de los turiones de espárrago, donde se puede observar un ligero incremento (2.1 mm) en la longitud de los turiones de espárrago almacenados a 2°C, independientemente de los tratamientos. Mientras que los turiones almacenados a 5°C presentaron un ligero decremento en su longitud de 1.8, 1.4 y 0.5 mm para los tratamientos de 0, 2.46 y 4.93 KJ/m² de radiación UV-C, respectivamente. Sin embargo, no se registraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre los tratamientos con respecto al control a ninguna de las temperaturas utilizadas.

Paull y Chen (1999), reportaron un incremento de 4 mm en la longitud de turiones de espárrago almacenados a 2°C después de seis días de almacenamiento, lo cual concuerda con los datos de la figura 8A.

Por otro lado, Ku y Woolley (2006) observaron un crecimiento longitudinal de 15 mm en turiones de espárrago almacenados a 25°C por espacio de 5 días, mientras que Paull y Chen (1999) observaron un crecimiento de 12 mm a una temperatura de almacenamiento de 10°C. En el presente estudio se encontró un crecimiento menor al reportado en la literatura, probablemente debido a la menor temperatura de almacenamiento del turión.

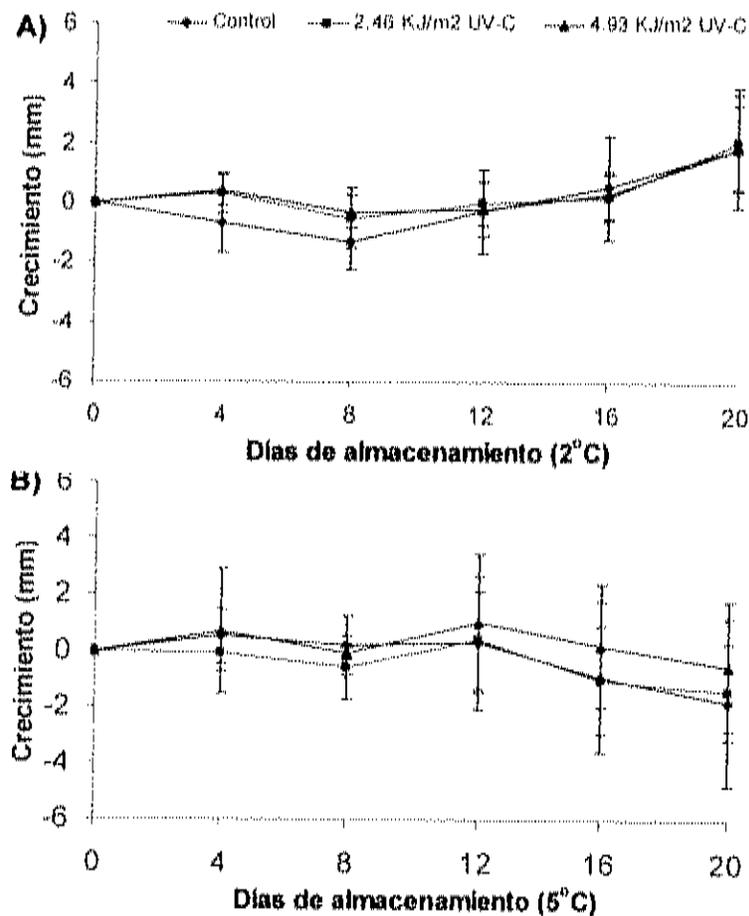


Figura 8. Crecimiento longitudinal del turion de espárrago tratado con radiaciones de UV-C de 0, 2.46 y 4.93 KJ/m², almacenados a 2 (A) y 5°C (B) durante 20 días. Las barras verticales de cada punto corresponden a la desviación estándar de 10 repeticiones.

7.2.3. Doblado.

Los turiones de espárrago irradiados con UV-C por 0 y 2.46 KJ/m², almacenados a 2°C, registraron un ligero cambio (-0.2 ° de ángulo) al final del periodo de almacenamiento, mientras que el lote irradiado por 4.93 KJ/m² con UV-C, presentó un ligero doblado (0.4° de ángulo) de la punta a los 8 días, después de lo cual no se observaron cambios hasta el final del periodo de almacenamiento. No se encontraron diferencias significativas entre los

tratamientos y el control (Figura 9A), lo cual concuerda con lo reportado por Paull y Chen (1999).

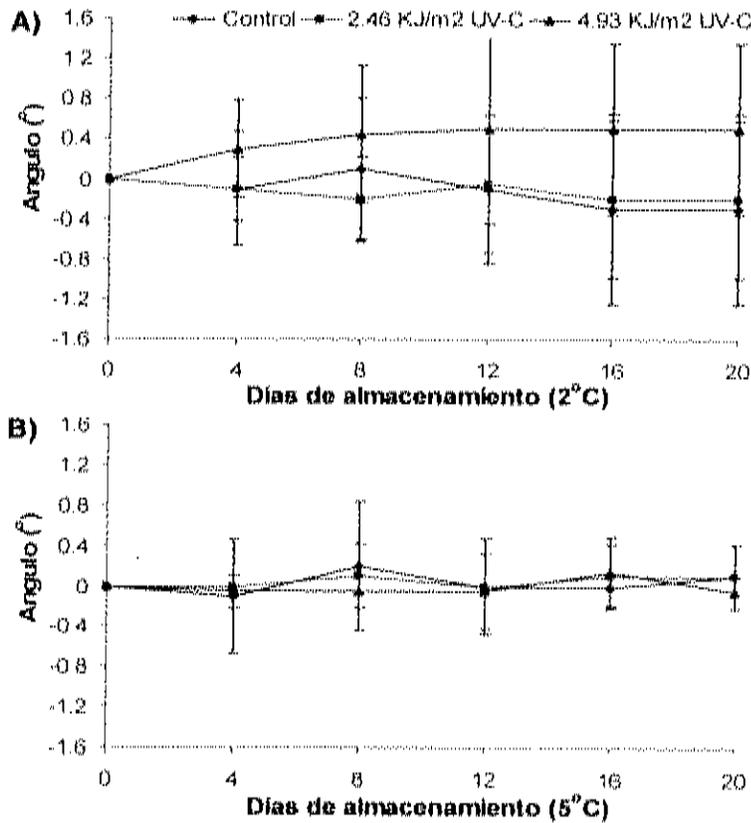


Figura 9. Doblado de la punta del turión de espárrago tratado con radiación UV-C (0, 2.46 y 4.93 KJ/m²), almacenados a 2 (A) y 5°C (B) durante 20 días. Las barras verticales de cada punto corresponden a la desviación estándar de 10 repeticiones.

Por otro lado, los turiones de espárrago almacenados a 5°C, no presentaron cambio alguno a lo largo del periodo de almacenamiento, independientemente del tratamiento, no encontrándose diferencias significativas ($P > 0.05$) de los tratamientos con respecto al control (Figura 9B).

7.2.4. Porcentaje de pérdida de peso fresco.

En el presente estudio, se observó que los turiones de espárrago almacenados a 2°C, no registraron diferencias en el porcentaje de pérdida de peso fresco, con respecto al control (Figura 10A), por lo que no se encontraron diferencias significativas. Por otro lado, los tratamientos de irradiación con UV-C a 2.46 y 4.93 KJ/m², y almacenados a 5°C, presentaron un porcentaje similar de pérdida de peso fresco de 4.97 y 6.12%, respectivamente (sin presentar una diferencia significativa entre ambos tratamientos), mientras que el control registró una pérdida de peso fresco del 12.16% al término del periodo de almacenamiento, siendo ésta, diferente significativamente con respecto a los tratamientos irradiados con UV-C ($P < 0.05$), figura 10B.

Pauli y Chen (1999), encontraron resultados similares a los presentados en las figuras 10A y 10B del presente estudio. Ellos registraron una pérdida en el porcentaje de peso fresco de 0.7 % en turiones de espárrago, almacenados a 2°C durante siete días de almacenamiento. En el caso del presente experimento, se encontraron valores mayores de pérdida de peso, pero el periodo de almacenamiento fue también más prolongado.

De acuerdo a Siomos, (2003), el turión de espárrago tiene un contenido de agua del 92 al 94%, el cual se reduce drásticamente una vez cosechado, debido a la transpiración que presenta esta hortaliza. Una pérdida del peso fresco de los turiones de espárrago del 8% o mayor, representa la pérdida de la calidad comercial del producto. En esta variable, como se puede observar en la figura 9B, los tratamientos no sobrepasan el 8% de pérdida del peso fresco, mientras que el tratamiento control, presenta una deshidratación mucho mayor (>12%), considerándose como no comercializable. Por lo tanto, el efecto de la irradiación con UV-C sobre los turiones de espárrago, es benéfico para el

mantenimiento de uno de los parámetros de calidad postcosecha más importantes del espárrago.

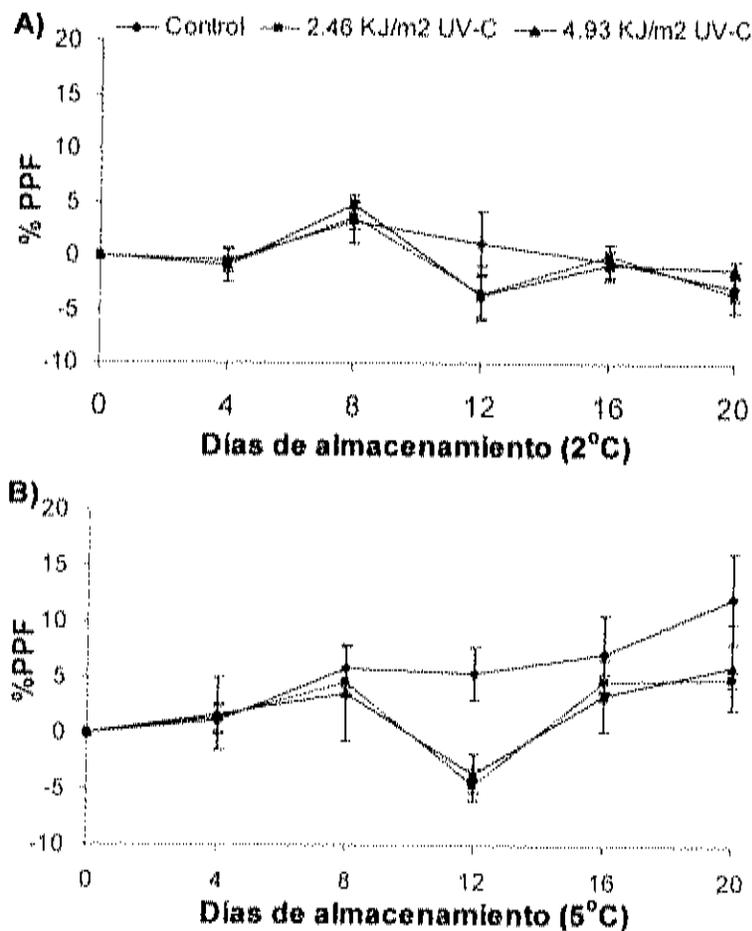


Figura 10. Porcentaje de pérdida de peso fresco de turiones de espárrago tratados con radiación UV-C (0, 2.46 y 4.93 KJ/m²), almacenados a 2 y 5°C por un periodo de 20 días. Las barras verticales de cada punto corresponden a la desviación estándar de 10 repeticiones.

7.2.5. Carbohidratos.

En la figura 11, se presentan los cambios en la concentración de los monosacáridos fructosa y glucosa en las zonas apical, media y basal de turiones de espárrago no tratados o tratados con dos niveles de radiación UV-C

y almacenados a 2 y 5 °C. Como se puede observar en las figuras 11A y C, los turiones de espárrago almacenados a 2 y 5°C respectivamente, no presentaron una disminución significativa ($P>0.05$) de fructosa entre el grupo control y los tratamientos de 5 y 10 min de UV-C al final del periodo de almacenamiento (20 días).

En el caso de los espárragos almacenados a 2°C, se observa que la diferencia entre la concentración inicial de fructosa con respecto a su concentración final en las distintas zonas del turión de espárrago y para cada tratamiento, solo fue significativa ($P<0.05$) en la zona apical (Figura 11A). Bhowmik et al (2002), encontraron resultados similares. Este mismo comportamiento se observó en todos los tratamientos y en las dos temperaturas de almacenamiento utilizadas debido muy probablemente al hecho de que esta zona es la de mayor actividad metabólica, por lo que presenta una alta demanda de carbohidratos solubles [Villanueva et al., 2005; Bhowmik y Matsui, 2003].

En la figura 11A también es posible observar que las concentraciones de fructosa en las distintas zonas (basal, media y apical) son diferentes significativamente ($P<0.05$) entre sí, independientemente del tratamiento. La zona basal presenta una mayor concentración de fructosa, la cual disminuye gradualmente de acuerdo a la distancia con respecto de la base del turión. Este comportamiento también fue observado en los turiones almacenados a 5°C (Figura 11C). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Bhowmik et al., (2002).

A diferencia de los turiones almacenados a 2°C donde se encontraron diferencias entre los valores iniciales y finales únicamente en la zona apical. Los turiones a 5°C presentaron una diferencia significativa ($P<0.05$) entre los

valores iniciales y finales en la concentración de fructosa en todas las zonas del turión: apical, media y basal (Figura 11C). Este comportamiento se debe muy probablemente a que los turiones almacenados a 5°C se encuentran metabólicamente más activos que los almacenados a 2°C [Villanueva et al., 2005; Uchino et al., 2004; Villanueva-Suárez et al., 1999; Gariépy et al., 1991].

En lo que respecta a la cantidad de glucosa, en los turiones almacenados a 2°C se puede observar una diferencia significativa ($P < 0.05$) entre la zona basal del tratamiento control y los tratamientos de 2.46 y 4.93 KJ/m² de UV-C (Figura 11B), donde los tratamientos de 2.46 y 4.93 KJ/m² de UV-C son iguales estadísticamente ($P > 0.05$) entre sí. Por otro lado, en los turiones de espárrago almacenados a 5°C, se presentó una diferencia significativa ($P < 0.05$) entre la zona basal del control y el tratamiento de 4.93 KJ/m² de UV-C, donde el tratamiento de 2.46 KJ/m² de UV-C es igual estadísticamente al control y al tratamiento de 4.93 KJ/m² de UV-C (Figura 11D).

La diferencia significativa ($P < 0.05$) en la concentración de glucosa en la zona basal, entre los turiones almacenados a 2 y a 5°C, difícilmente puede ser atribuido al efecto de la irradiación con UV-C. Debido a que el efecto de la luz ultravioleta sobre los productos hortofrutícolas es de tipo local, no sistemática, por lo que solo los tejidos que se encuentran directamente en exposición a la luz UV-C presentan algún efecto [Mercier et al., 2000]. Además, en la zona basal de los turiones de espárrago tienen lugar otros procesos como la lignificación de los tejidos fibrosos y el desarrollo de celulosa, que son altamente demandantes de energía [An et al., 2005; Rodríguez-Arcos et al., 2002a; Siomos et al., 2000]. De acuerdo a esto, las demandas de energía de los procesos metabólicos que se están llevando a cabo en la zona basal son

los responsables de las diferencias observadas con respecto al tratamiento control.

Por otro lado, en las figuras 11B y D, se observa una diferencia significativa ($P < 0.05$) en las concentraciones de glucosa para las diferentes zonas del turión (basal, media y apical), independientemente del tratamiento aplicado. Donde la zona de mayor concentración es la basal y la de menor concentración es la zona apical. Este comportamiento es similar al observado para la fructosa en las figuras 11A y C. Estos datos concuerdan con los reportados por Bhowmik et al (2002) y por Lill et al (1990).

La diferencia entre los valores iniciales y finales de la concentración de glucosa, es significativa ($P < 0.05$) en todas las zonas, para todos los tratamientos e independientemente de la temperatura de almacenamiento (Figura 11).

De manera global, los turiones de espárrago almacenados a 5°C, presentaron una concentración inicial tanto de fructosa como de glucosa mayor que los turiones almacenados a 2°C, independientemente de los tratamientos y de la zona. Así mismo, los turiones almacenados a 5°C presentaron una mayor disminución en la concentración de los carbohidratos solubles que los almacenados a 2°C (Figura 11) independientemente de los tratamientos y de la zona. Esto sugiere una mayor actividad metabólica de los turiones de espárrago almacenados a 5°C debido al aumento en la temperatura de almacenamiento.

Comparando las fluctuaciones en las concentraciones de los carbohidratos solubles (fructosa y glucosa) con respecto a la temperatura e independientemente de los tratamientos, es posible observar en la figura 11

que el cambio en la zona media para todos los tratamientos en los turiones almacenados a 5°C, es significativamente mayor ($P < 0.05$) con respecto a los turiones almacenados a 2°C. Esto puede ser posible ya que la zona media es la zona con menos demanda energética, sin embargo, las zonas apical y basal, presentan una alta actividad metabólica como consecuencia de la respiración y de la síntesis de celulosa y lignificación de la misma, respectivamente. Debido a esto, los azúcares (glucosa y fructosa) son translocados desde la zona media (de menor demanda) hacia las zonas apical y basal (de mayor demanda) [Bhowmik y Matsui, 2003; Brash et al., 1995; Rodríguez-Arcos et al., 2002a; Báez-Sañudo et al., 1999].

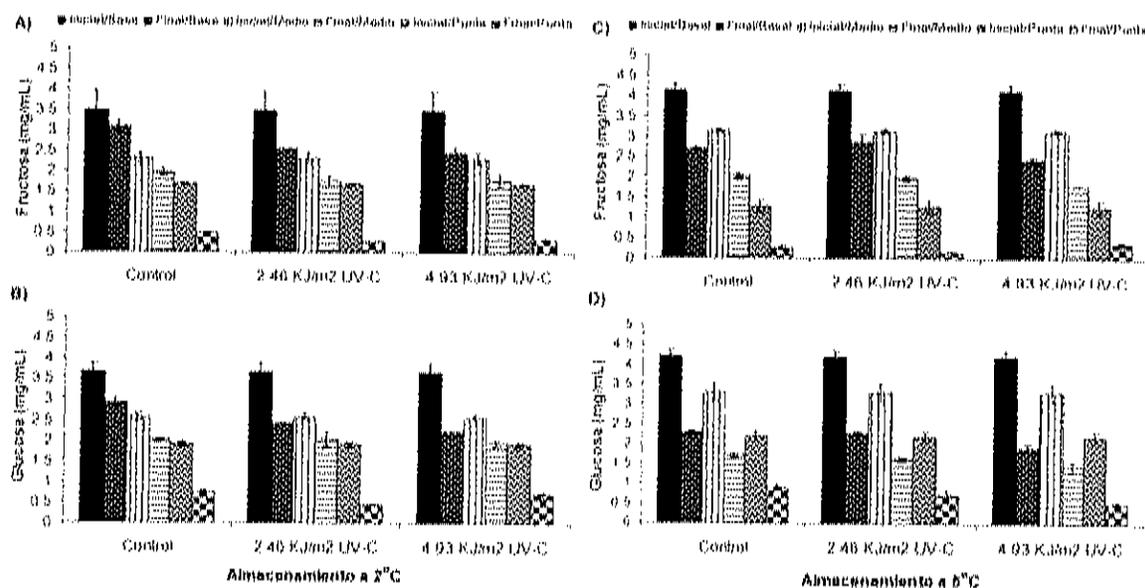


Figura 11. Cambios iniciales (0 días) y finales (20 días) en los carbohidratos fructosa y glucosa en las zonas apical, media y basal de turiones de espárrago tratados con 0, 2.46 y 4.93KJ/m² de radiación UV-C y almacenados a 2 y 5°C. Las barras verticales de cada punto corresponden a la desviación estándar de 3 repeticiones.

Para el caso de la sacarosa, ésta se encontró en concentraciones muy bajas para todos los tratamientos, en todas las zonas y en ambas temperaturas de almacenamiento por lo que no fue posible su cuantificación. Bhowmik et al

(2002) reportan resultados similares. Esto es debido a que la sacarosa es el primer azúcar soluble que se consume (6 - 12 h postcosecha) en los turiones de espárrago [McKenzie et al., 2004; Irving y Hurst, 1993; King et al., 1990].

7.2.6. Color.

La irradiación con UV-C por 0, 2.46 y 4.93 KJ/m², sobre los turiones de espárrago almacenados a 2 o 5°C, respectivamente, no presentó un efecto significativo ($P>0.05$) sobre el parámetro de color L* con respecto al control, a lo largo de los 20 días de almacenamiento (Figuras 12A y 12D, respectivamente). Sin embargo, los turiones de espárrago irradiados con 5 y 10 min de UV-C y almacenados a 5°C, presentaron una disminución en L* de 49.57 a 44.30 y de 49.30 a 44.39, respectivamente. Esta disminución en L*, está asociada con un aumento en la intensidad del amarillo y/o al oscurecimiento del color verde del turión de espárrago [Siomos et al., 2005]. Se ha reportado que el aumento en la intensidad del amarillo y la pérdida del color verde brillante (oscurecimiento) del turión, es consecuencia de la pérdida de clorofila [An et al., 2006; Nindo et al., 2003]. Los valores iniciales de L* se encuentran en el mismo rango (45 – 50) con respecto a los reportados por An et al (2006) en espárrago verde.

El ángulo Hue para los turiones de espárrago almacenados a 2°C, disminuyó de 114.69 a 111.32, de 113.23 a 110.28 y de 116.29 a 111.53 para los tratamientos de 0, 5 y 10 minutos de irradiación con UV-C, respectivamente (Figura 12B). Mientras que los cambios en el ángulo Hue para los turiones de espárrago almacenados a 5°C fueron aún menores (Figura 12E). La reducción en el ángulo Hue, corresponde a una disminución en la intensidad del verde y aumento en la intensidad del amarillo, de acuerdo al espacio de color [Lau et

al., 2000]. Sin embargo, los cambios observados a lo largo de 20 días de almacenamiento en ambas temperaturas, no son significativos ($P > 0.05$) en ningún caso, con respecto al tratamiento control.

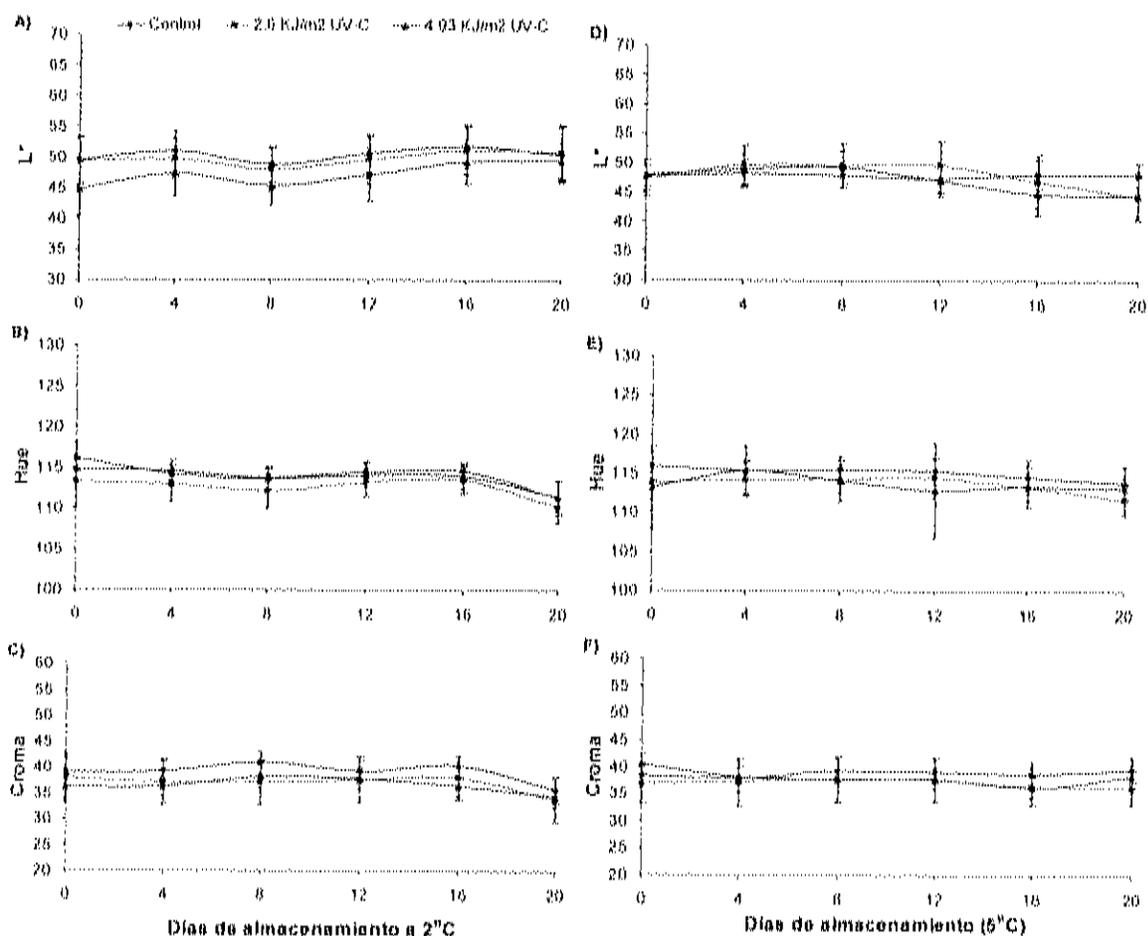


Figura 12. Parámetros de color L^* , Hue y Croma en turiones de espárrago bajo diferentes condiciones de irradiación con UV-C y de temperatura de almacenamiento. Las barras verticales de cada punto corresponden a la desviación estándar de 10 repeticiones.

En la Figura 12C y 12F, se presentan los resultados del cromatismo (hipotenusa del ángulo Hue), para los turiones de espárrago irradiados con 0, 2.6 y 4.93 kJ/m^2 de UV-C. No se observan cambios significativos ($P > 0.05$) en ninguno de los tratamientos con respecto al control. Sin embargo, se observó

una disminución en este parámetro para los turiones de espárrago irradiados con 5 y 10 min de UV-C y almacenados a 2°C. Aún con esta disminución, los valores de croma corresponden a un nivel de saturación donde existe un color definido. [Sun et al., 2005].

7.2.7. Estado hídrico.

7.2.7.1. Potencial osmótico.

En la figura 13 se muestran los resultados de la determinación del potencial osmótico, hídrico y de presión de los turiones de espárrago tratados con 0, 2.46 y 4.93 KJ/m² de radiación de UV-C y almacenados posteriormente a 2° y 5 °C. El potencial osmótico de los turiones de espárrago no presentó cambios significativos ($P>0.05$) entre los tratamientos y los controles para ninguna de las temperaturas utilizadas (Figura 13). Sin embargo, en todos los casos se observó un ligero incremento, no significativo ($P>0.05$), en el potencial osmótico durante el período de almacenamiento, debido al consumo de los azúcares solubles (principalmente), como consecuencia de la actividad metabólica de los turiones de espárrago.

Es conocido que el potencial osmótico es más negativo conforme aumenta la concentración de soluto y para el caso de espárrago, ocurre una disminución importante en la cantidad de azúcares debido al metabolismo. Sin embargo, esta disminución en la concentración de azúcares fue compensada por el efecto de concentración que ocurrió debido a la pérdida de peso fresco (Figura 10) y el resultado final fué un ligero incremento en el potencial osmótico (Figura 13). En contraste, en el caso de frutas climatéricas se ha reportado una disminución en el potencial hídrico como consecuencia de la acumulación de

solutos (azúcares solubles, aminoácidos, ácidos orgánicos y minerales) durante la maduración de los mismos [Mill et al., 1996; Seymour et al., 1990].

7.2.7.2. Potencial de presión.

Los turiones de espárrago almacenados a 2 y 5°C presentaron un cambio en el potencial de presión de un valor positivo 0.617, a -1.225, -0.767 y -0.863 en los turiones almacenados a 2°C y de 0.617 a -0.498, -0.389 y -0.312 en los turiones almacenados a 5°C, para los tratamientos de 0, 2.46 y 4.93 KJ/m² de UV-C respectivamente (Figura 13). Sin embargo, los cambios en el potencial de presión, no son significativamente diferentes ($P > 0.05$) entre los tratamientos y el control.

Por otro lado, en la figura 13, se observa que las diferencias en el potencial de presión entre los turiones de espárrago almacenados a 2°C y los almacenados a 5°C, son significativas ($P < 0.05$) independientemente de los tratamientos. Debido a que se registraron mayores pérdidas de peso fresco en los turiones almacenados a 5°C con respecto a los almacenados a 2°C (Figura 10), no es posible considerar las diferencias encontradas en el potencial de presión como debidas a la pérdida de agua. Por lo tanto, lo más factible es considerar que las diferencias en este potencial se deban a que los turiones almacenados a 2°C (± 1) son más propensos a presentar daño por frío que los almacenados a 5°C (± 1) [Báez-Sañudo et al., 1999]. Además, también se observa que la plasmólisis celular (cuando el potencial de presión es igual a cero o menor) en los turiones de espárrago almacenados a 2°C se presenta en el día 6 de almacenamiento, mientras que en los turiones a 5°C, se presenta entre los días 7 y 8.

7.2.7.3. Potencial hídrico.

Los turiones de espárrago almacenados a 2°C, presentaron una disminución en el potencial hídrico desde un valor inicial de -0.358 a -2.174, -1.673 y -1.850 para los tratamientos de 0, 2.46 y 4.93 de radiación UV-C, respectivamente (Figuras 13A, B y C) hacia el final del almacenamiento. Por otro lado, los cambios en el potencial hídrico para los turiones almacenados a 5°C fueron desde un valor inicial de -0.358 a -1.364, -1.296 y -1.239 para los tratamientos de 0, 2.46 y 4.93 KJ/m², respectivamente (Figuras 13D, E y F) hacia el final de almacenamiento. Sin embargo, no hubo diferencia significativa ($P>0.05$) de los tratamientos con respecto al control para ninguna de las dos temperaturas utilizadas en el presente experimento.

Valores cercanos a cero en el potencial hídrico, indican frescura y turgencia, por lo que la disminución en el potencial hídrico de los turiones de espárrago, representa una pérdida de ambos atributos y con ello la calidad comercial. [Rangel et al., 2004]. Sin embargo, en base a los resultados del potencial de presión, podemos considerar que el espárrago mostró una calidad adecuada en textura cuando los valores eran mayores a cero, lo que significa seis días para espárragos a 2 °C y de 7 a 8 días para espárragos almacenados a 5 °C.

Como se observa en la figura 13, los cambios en el potencial hídrico en los turiones almacenados a 5°C con respecto a los de 2°C, fueron significativamente ($P<0.05$) menores, independientemente de los tratamientos. De acuerdo a los resultados obtenidos de la determinación del potencial osmótico, donde no se observaron cambios con respecto al tiempo, es posible concluir que la disminución en el potencial hídrico se debió a la pérdida de turgencia de la célula.

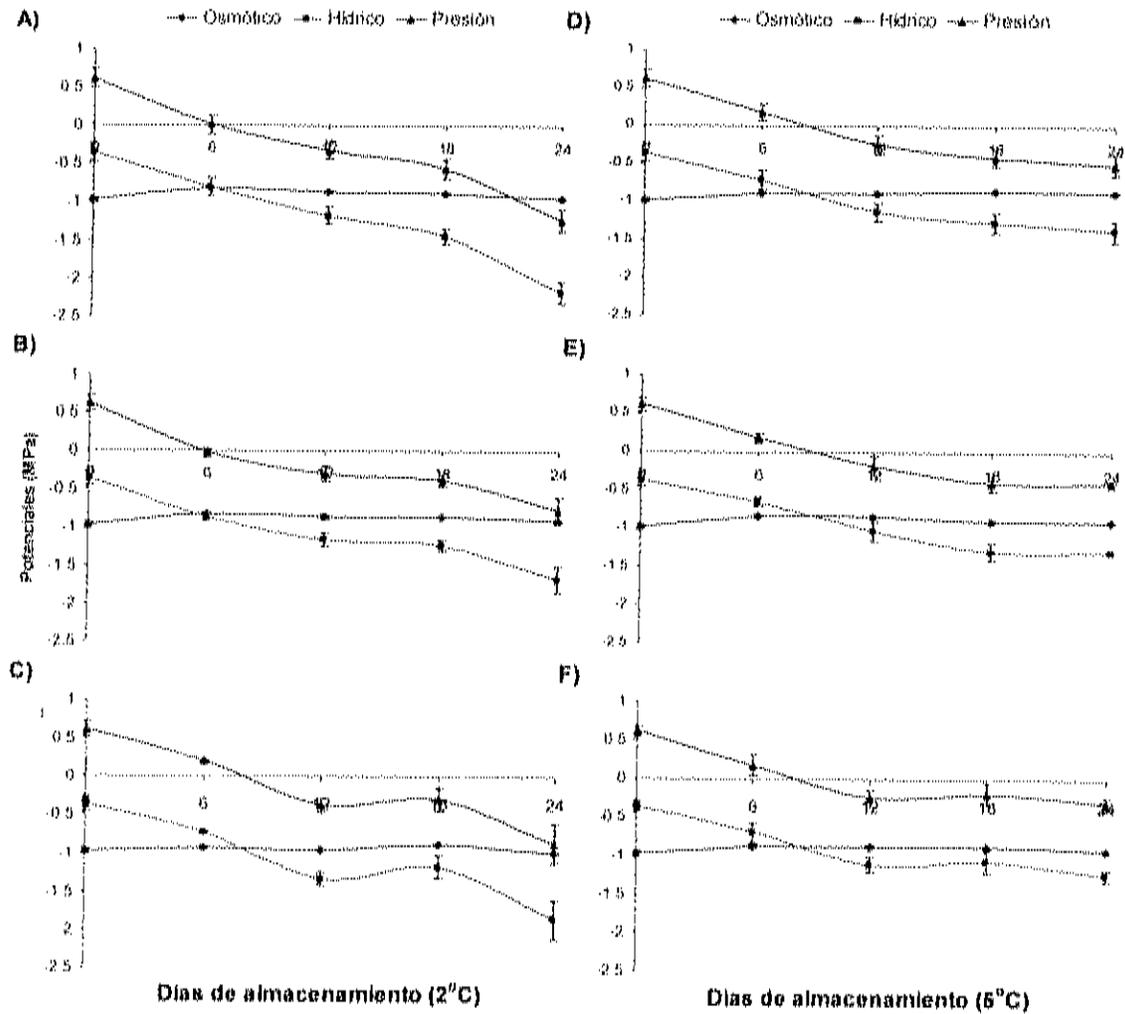


Figura 13. Potenciales osmótico, hídrico y de presión en turiones de espárrago durante el almacenamiento bajo diferentes condiciones. A) Control a 2°C; B) 2.46 KJ/m² de UV-C a 2°C; C) 4.93 KJ/m² de UV-C a 2°C; D) Control a 5°C; E) 2.46 KJ/m² de UV-C a 5°C; F) 4.93 KJ/m² de UV-C a 5°C. Las barras verticales de cada punto corresponden a la desviación estándar de 6 repeticiones

8. CONCLUSIONES

Los tratamientos de UV-C, no mostraron un efecto sobre la actividad metabólica de los turiones de espárrago verde, a los niveles evaluados en el presente experimento. Sin embargo, pueden mantener por más tiempo la calidad del espárrago considerando como variable de criterio el porcentaje de pérdida de peso fresco.

9. RECOMENDACIONES

En vista de que en el presente experimento no se presentaron cambios significativos ($P < 0.05$), se propone en experimentos subsecuentes que se elimine el hidrofriado de los turiones de espárrago, ya que muy posiblemente interfirió con los posibles efectos de la irradiación UV-C sobre la actividad metabólica y como consecuencia en los demás parámetros de calidad. Ya que solo el proceso de hidrofriado disminuye drásticamente el metabolismo.

Por otro lado, el meristemo apical del espárrago se encuentra protegido por las brácteas apicales, por lo que no estuvo expuesto directamente a la irradiación UV-C. Por lo tanto, se propone la remoción de las brácteas para dejar libre el meristemo apical y que de esta manera la irradiación UV-C logre inferir directamente sobre la superficie del meristemo apical de espárrago y no sobre las brácteas como fue el caso del presente experimento.

Otra posibilidad de comprobar si se cumple la hipótesis del presente experimento, sería la exposición del meristemo apical del espárrago a un tipo de irradiación más energética, como sería el caso de la irradiación gamma.

10. REFERENCIAS

- Amaro-López, M. A., Moreno-Rojas, R., Zurera-Cosano, G., Sánchez-Segarra, P. J., 1999. Nutritional Changes in the Essential Trace Elements Content of Asparagus During Industrial Processing. *Food Res. Int.* 32, 479 – 486.
- An, J., Zhang, M., Lu, Q., 2005. Changes in Some Quality Indexes in Fresh-Cut Green Asparagus Pretreated with Aqueous Ozone and Subsequent Modified Atmosphere Packaging. *J. Food Engineering.* 78, 340 – 344.
- An, J., Zhang, M., Lu, Q., Zhang, Z., 2006. Effect of a Prestorage Treatment with 6-benzylaminopurine and Modified Atmosphere Packaging Storage on the Respiration and Quality of Green Asparagus Spears. *J. Food Engineering.* 77, 951 – 957.
- Báez-Sañudo, R., Bringas-Taddei, E., Camarena-Gómez, A. G., Mercado-Ruiz, N. J., Araiza-Sánchez, V., 1999. Espárrago Fresco: Manejo Postcosecha. *Bancomext.* Pag. 9 – 15.
- Baka, M., Mercier, J., Corcuff, R., Castaigne, F., Arul, J., 1999. Photochemical Treatment to Improve Storability of Fresh Strawberries. *J. Food Sci.* 64, 1068 – 1072.
- Bhowmik, K. P., Matsui, T., 2003. Postharvest Physiology, Storage and Keeping Quality of Green Asparagus: A Review. *Asian J. Plant Sci.* 2 (12), 941-943.

Bhowmik, P. K., Matsui, T., Ikeuchi, T., Suzuki, H., 2002. Changes in Storage Quality and Shelf Life of Green Asparagus Over and Extended Harvest Season. *Postharvest. Biol. Technol.* 26, 323 – 328.

Bhowmik, P. K., Matsui, T., Kawada, K., Suzuki, H., 2001. Seasonal Changes of Asparagus Spears in Relation to Enzyme Activities and Carbohydrate Content. *Scientia Hort.* 88, 1 - 9.

Brash, D. W., Charles, C. M., Wright, S., Bycroft, L. B., 1995. Shelf-Life of Stored Asparagus is Strongly Related to Postharvest Respiratory Activity. *Post. Biol. Technol.* 5, 77-81.

Brewer, S. M., Begum, S., Bozeman, A., 1995. Microwave and Conventional Blanching Effects on Chemical, Sensory, and Color Characteristics on Frozen Broccoli. *J. Food Quality.* 18, 479-493.

Costa, L., Vicente, A. R., Civello, P. M., Chaves, A. R., Martinez, G. A., 2006. UV-C Treatment Delays Postharvest Senescence in Broccoli Florets. 39, 204 – 210.

FAO (2005). Producción: Cultivos Primarios. Espárrago. <http://faostat.fao.org/faostat/servlet/XteServlet3?Areas=%3E872&Items=367&Elements=51&Years=2004&Format=Table&Xaxis=Years&Yaxis=Countries&Aggregate=&Calculate=&Domain=SUA&ItemTypes=Production.Crops.Primary&language=ES> Última fecha de acceso: Mayo, 2006.

Frohnmeier, H., Staiger, D., 2003. Ultraviolet-B Radiation-Mediated Responses in Plants. Balancing damage and protection. *Plant Physiol.* 133, 1420-1428.

García-Gimeno, R. M., Castillejo-Rodríguez, A. M., Barco-Alcala, E., Zurera-Cosano, G., 1998. Determination of Packaged Green Asparagus Shelf-Life. *Food Microbiol.* 15, 191 – 198.

Gardner D. W. M., Shama G., 2000. Modeling UV-Induced Inactivation of Microorganisms on Surfaces. *J. Food Protection.* 63 (1), 63-70.

Gariépy, Y., Raghavan, G. S. V., Castaigne, F., Arul, J., Willemot, C., 1991. Precooling and Modified Atmosphere Storage of Green Asparagus. *J. Food Process. Preserv.* 15, 215 – 224.

Ganthavorn, C., Nagel, W., Powers, J. R., 1991. Thermal Inactivation of Asparagus Lipoxigenasa and Peroxidasa. *J. Food Sci.* 56 (1), 47-49.

Guerrero-Beltrán, J. A., Barbosa-Cánovas, G. V., 2004. Review: Advantages and Limitations on Processing Foods by UV Light. *Food Sci. Tech. Int.* 10 (3), 137-147.

Güvenç, A., Koyuncu, M., 2002. Studies on the Anatomical Structure of Cladodes of Asparagus L. Species (Liliaceae) in Turkey. *Isr. J. Plant Sci.* 50, 51 – 65.

Hennion, S., Hartmann, C., 1990. Respiration and Ethylene in Harvested Asparagus Spears during Aging at 20°C. *Sci. Hort.* 43, 189-195.

Hennion, S., Little, C. H. A., Hartman, C., 1992. Activities of Enzymes Involved in Lignification During the Postharvest Storage of Etiolated Asparagus Spears. *Physiol. Plant.* 86, 474 – 478.

Hernández-Rivera, L., Mullen, R., Cantwell, M., 1992. Textural Changes of Asparagus in Relation to Delays in Cooling and Storage Conditions. Hort Tech. 2, 378 – 381.

Herppich, W. B., Huyskens-Keil, S., Kadau, R., 2005. Effects of Short-Term Low-Temperature Storage on Mechanical and Chemical Properties of White Asparagus Cell Walls. J. Applied Botany Food Quality-Angewandte. 79 (2), 63-71.

Hurst, P. L., Boulton, G., Lill, R. E., 1998. Towards a Freshness Test for Asparagus: Spear Tip Asparagine Content is Strongly Related to Post-Harvest Accumulated Heat-Units. Food Chem. 61, 381 – 384.

Hurst, P. L., Irving, D. E., Hannan, I. P., 1994. Postharvest Lipid Loss, Malate Accumulation, and Appearance of Malate Synthase Activity in Asparagus Spear Tips. Post. Biol. Technol. 4, 49 – 56.

Hurst, P. L., King, A. G., Borst, W. M., 1993. Postharvest Inhibition of Glutamine Synthetase Activity with Phosphinothricin Reduces the Shelf-Life of Asparagus. Post. Biol. Technol. 3, 327 – 334.

InfoAgro (2002). Agroalimentación: Espárrago Verde. Cultivo y Manejo. http://www.infoagro.com/hortalizas/esparrago_verde.htm Actualizado 2002. Última fecha de acceso: Octubre, 2006.

Irving, D. E., Hurst, P. L., 1993. Respiration, Soluble Carbohydrates and Enzymes of Carbohydrate Metabolism in Tips of Harvested Asparagus Spears. Plant Sci. 94, 89-97.

Iversen, E., Wilhelmsen, E., Criddle, R. S., 1989. Calorimetric Examination of Cut Fresh Pineapple Metabolism. *J Food Sci.* 54, 1246 – 1249.

Kader, A. A., 1992. Postharvest Biology and Technology: an Overview in: A. A. Kader (Editor), *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Division of Agriculture and Natural Resources, University of California, Publ. 3311, 15-20.

Kennedy, R. A., Rumpho, M. E., Fox, T. C., 1992. Anaerobic Metabolism in Plants. *Plant Physiol.* 100, 1-6.

King, G. A., Davies, K. M., Stewart, R. J., Borst, W. M., 1995. Similarities in Gene Expression During the Postharvest-Induced Senescence of Spears and Natural Folial Senescence of *Asparagus*. *Plant Physiol.* 108, 125 – 128.

King, G. A., Hendeson, K. G., Lill, R. E., 1987. Sensory Analysis of Stored *Asparagus*. *Sci. Hort.* 31, 11 – 16.

King, G. A., Woollard, D. C., Irving, D. E., Borst, W. M., 1990. Physiological Changes in *Asparagus* Spear Tips after Harvest. *Physiol. Plant.* 80, 393 – 400.

Klieber, A., Wills, R. B. H., 1992. Optimization of Storage Conditions for 'UC 157' *Asparagus*. *Australian J. Exp. Agric.* 32, 529-534.

Ku, Y. G., Woolley, D. J., 2006. Effect of Plant Growth Regulators and Spear Bud Scales on Growth of *Asparagus Officinalis* Spears. *Sci. Hort.* 180, 238 – 242.

- Lau, M. H., Tang, J., Swanson, B. G., 2000. Kinetics of Textural and Color Changes in Green Asparagus During Thermal Treatments. *J. Food Engineering*, 45, 231 – 236.
- Lee, D. S., Hagggar, P. E., Lee, J., Yam, K. L., 1991. Model for Fresh Produce Respiration in Modified Atmosphere Based on Principles of Enzyme Kinetics. *J. Food Sci.* 56, 1580-1585.
- Li, W., Zhang, M., 2005. Effect of Three-Stage Hypobaric Storage on Cell Wall Components, Texture and Cell Structure of Green Asparagus. *J. Food Engineering*, 77, 112 – 118.
- Lill, R. E., Borst, W. M., 2001. Spear Height at Harvest Influences Postharvest Quality of Asparagus (*Asparagus officinalis*). *New Zealand J. Crop Hort. Sci.* 29, 187 – 194.
- Lill, R. E., Borst, W. M., Irving, D. E., 1996. Tiprot in Asparagus: Effect of Temperature During Spear Growth. *Post. Biol. Technol.* 8, 37 – 43.
- Lill, R. E., King, G. A., O'Donoghue, E. M., 1990. Physiological Changes in Asparagus Spears Immediately After Harvest. *Sci. Hort.* 44, 191-199.
- Lipton, W. J., 1990. Postharvest Biology of Fresh Asparagus. *Hortic. Rev.* 12, 69-155.
- López, G., Ros, G., Rincón, F., Ortuño, J., Periago, M. J., Martínez, M. C., 1996. Amino Acids and in vitro Protein Digestibility Changes in Green Asparagus (*Asparagus Officinalis*, L.) During Growth and Processing. *Food Research Int.* 29, 617 – 625.

López-Hernández, J., González-Castro, M. J., Vázquez-Blanco, M. E., Vázquez-Oderíz, M. L., Simal-Lozano, J., 1994. HPLC Determination of Sugars and Starch in Green Beans. 59. 1048 – 1049.

Lu, J. Y., Stevens, C., Khan, V. A., Kabwe, M., 1991. The Effect of Ultraviolet Irradiation on Shelf-Life and Rippening of Peaches and Apples. J. Food Qual. 14, 299 – 305.

Mckenzie, J. M., Greer, A. L., Heyes, A. J., Hurst, L. P., 2004. Sugar Metabolism and Compartmentation in Asparagus and Broccoli during Controlled Atmosphere Storage. Postharvest Biol. Technol. 32, 45-56.

Mercier, J., Roussel, D., Charles, M. T., Arul, J., 2000. Systemic and Local Responses Associated with UV- and Pathogen-Induced Resistance to *Botrytis cinerea* in Stored Carrot. Pathol. 90, 981 – 986.

Montoya, B. L. C., Robles, O. L. E., Molina, S. C. M., 1999. Control del Escaldado de Espárrago (*Asparagus officinalis* L.) Mediante Indicadores Enzimáticos. Rev. Iber. Tecnología Postcosecha. 2 (1), 103-108.

Moreno-Rojas, R., Amaro-López, M. A., Zurera-Cosano, G., 1992. Mineral Elements Distribution in Fresh Asparagus. J. Food Comp. Anal. 5, 168 – 171.

Nindo, C. I., Sun, T., Wang, S. W., Tang, J., Powers, J. R., 2003. Evaluation of Drying Technologies for Retention of Physical Quality and Antioxidants in Asparagus (*Asparagus Officinalis*, L.) Lebensm. Wiss. U-Technol. 29, 481 – 488.

Paull, R. E., Chen, N. J., 1999. Heat Treatment Prevents Postharvest Geotropic Curvature of Asparagus Spears (*Asparagus officinalis* L.). *Postharvest Biol. Technol.* 16, 37-41.

Pressman, E., Schaffer, A. A., Compton, D., Zamski, E., 1993. Seasonal Changes in the Carbohydrate Content of Two Cultivars of Asparagus. *Sienta Hortic.* 53, 149 – 155.

Rangel, D. M., Cepeda, J. S., Pérez, J. D., Torres, B. V., 2004. Las Condiciones de Almacenamiento y el Encerado Afectan el Estado Hídrico y la Calidad de Mango. *Rev. Fitotec. Mex.* 27, 201 – 209.

Rigau, A., 1978. Cultivo de Espárragos: Caracteres Botánicos, Elección y Preparación del Terreno, Sistemas de Cultivos y Cuidados Culturales, Recolección Conservación y Embalaje. Los Enemigos del Espárrago. Tercera Edición. Editorial Sintet, S. A. Barcelona, España.

Rodríguez-Arcos, R. C., Smith, A. C., Waldron, K. W., 2002a. Mechanical Properties of Green Asparagus. *J. Sci. Food Agric.* 82, 293 – 300.

Rodríguez-Arcos, R. C., Smith, A. C., Waldron, K. W., 2002b. Effect of Storage on Wall-Bound Phenolics in Green Asparagus. *J. Agric. Food Chem.* 50, 3197-3203.

Rodríguez-Arcos, R. C., Smith, A. C., Waldron, K. W., 2004. Ferulic Acid Crosslinks in Asparagus Cell Walls in Relation to Texture. *J. Agric. Food Chem.* 52, 4740 – 4750.

Rodríguez, R., Jiménez, A., Guillén, R., Heredia, A., Fernández-Bolaños, J., 1999. Turnover of White Asparagus Cell Wall Polysaccharides During Postharvest Storage. *J. Agric. Food Chem.* 47, 4525 – 4531.

SAGARPA (2006). Avance de Siembras y Cosechas Perennes 2006. http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar_comagr2c.html Última fecha de acceso: Mayo, 2006.

Saito, M., Rai, D. R., Masuda, R., 2000. Effect of Modified Atmosphere Packaging on Glutathione and Ascorbic Acid Content of Asparagus Spears. *J. Food Process. Preserv.* 24, 243 – 251.

Salisbury F. B., Ross, C. W., 1991. *Plant Physiology*. Cuarta edición. Wadsworth Publishing Company. Belmont, California, U. S. A.

Sánchez-Pineda, I., Cano-Muñoz, M. T. G., Hermida-Bun, J. R., 1994. Blanching Freezing and Frozen Storage Influence Texture of White Asparagus. *J. Food Sci.* 59 (2), 821-823.

Shama, G., Alderson, P., 2005. UV Hormesis in Fruits: a Concept Ripe for Commercialization. *Food Sci. Tech.* 16, 128 – 136.

Siomos, A. S., 2003. Quality, Handling and Storage of White Asparagus. in: Dris, R., Niskanen, R., Jain, S. M. (Eds.), *Crop Management and Postharvest Handling of Horticultural Products*. Science Publishers, Inc, Enfield (NH), USA, pp. 65-88.

Siomos, A. S., Dogras, C. C., Sfakiotakis, E. M., 2001. Color Development in Harvested White Asparagus Spears in Relation to Carbon Dioxide and Oxygen Concentration. *Post. Biol. Technol.* 23, 209 – 214.

Siomos, A. S., Gerasopoulos, D., Tsouvaltzis, P., 2005. Prestorage Hot Water Treatments Inhibit Postharvest Anthocyanin Synthesis and Retain Overall Quality of White Asparagus Spears. *Post. Biol. Technol.* 38, 160 – 168.

Siomos, A. S., Sfakiotakis, E. M., Dogras, C. C., 2000. Modified Atmosphere Packaging of White Asparagus Spears: Composition, Color and Textural Quality Responses to Temperature and Light. *Sci. Hortic.* 84, 1 – 13.

Sparrow, A. H., Christensen, E., 1954. Improved Storage Quality of Potato Tubers Following Exposure to Gamma Irradiation of Cobalt 60. *Nucleonics.* 12 (3), 16.

Stapleton, A. E., 1992. Ultraviolet Radiation and Plants: Burning Questions. *Plant Cell.* 4, 1353 – 1358.

Sun, T., Tang, J., Powers, J. R., 2005. Antioxidant Activity and Quality of Asparagus Affected by Microwave-Circulated Water Combination and Conventional Sterilization. *Food Chem.* 100, 813 – 819.

Uchino, T., Nei, D., Hu, W., Sorour, H., 2004. Development of a Mathematical Model for Dependence of Respiration Rate of Fresh Produce on Temperature and Time. *Postharvest Biol. Technol.* 34, 285-293.

Vicente, A. R., Martínez, G. A., Chaves, A. R., Civello, P. M., 2006. Effect of Heat Treatment on Strawberry Fruit Damage and Oxidative Metabolism During Storage. *Post. Biol. Technol.* 40, 116 – 122.

Villanueva-Suárez, M. J., Redondo-Cuenca, A., Rodríguez-Sevilla, M. D., Heredia-Moreno, A., 1999. Postharvest Storage of White Asparagus (*Asparagus officinalis*, L.): Changes in Dietary Fiber (Nonstarch Polysaccharides). *J. Agric. Food Chem.* 47, 3832 – 3836.

Villanueva-Suárez, M. J., Tenorio, M. D., Sagardoy, M., Redondo, A., Saco, M. D., 2005. Physical, Chemical, Histological and Microbiological Changes in Fresh Green Asparagus (*Asparagus Officinalis*, L.) Stored in Modified Atmosphere Packaging. *Food Chem.* 91, 609 – 619.

Watada, A. E. y Massie, D. R., 1981. A Compact System for Measuring CO₂ and C₂H₄ Evolution by Harvested Horticultural Crops. *HortScience.* 16, 39-41.

Wien, C. H., 1997. *The Physiology of Vegetable Crops.* Editorial Cab International. New York, NY.

Williams, D. C., Lim, M. H., Pangborn, R. M., Whitaker, J. R., 1986. Blanching Vegetables for Frozen which Indicator Enzyme to Choose. *Food Technology.* 40, 130-140.

Yasunaga, E., Uchino, T., Hu, W., Hamanaka, D., 2002. Re-Examination about the Temperature Dependence of Respiration Rate of Some Vegetables. *J. Fac. Agr.* 46, 391 – 399.

