Comportamiento poscosecha del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.): efecto del 1-metilciclopropeno y de la refrigeración

Helber Enrique Balaguera López

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de posgrados

Bogotá D.C., Colombia

2015

Comportamiento poscosecha del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.): efecto del 1-metilciclopropeno y de la refrigeración

Helber Enrique Balaguera López

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Doctor en Ciencias Agrarias

Director:

Ph.D. Aníbal Herrera Arévalo

Codirector:

Ph.D. Lorenzo Zacarías García

Línea de Investigación:

Fisiología Vegetal

Grupo de Investigación:

Grupo de Horticultura

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de posgrados

Bogotá D.C., Colombia

2015

Dedicatoria

A Dios,

A mi esposa Claudia Andrea,

A mi familia

Y a mí eterno amigo Fredy Salamanca (q.e.p.d.)

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia y su escuela de posgrados de la Facultad de Ciencias Agrarias por haberme dado la oportunidad de recibir la formación académico científica de Doctor en Ciencias Agrarias y por la Beca Exención de Derechos Académicos. A COLCIENCIAS por la financiación parcial de mi investigación doctoral.

Al Profesor Aníbal Herrera Arévalo (PhD), director de tesis, por su valioso acompañamiento académico y científico, su confianza y por todas las oportunidades que me brindó. Al profesor Lorenzo Zacarías (PhD), codirector de tesis, por su asesoría académica y científica y sus valiosos consejos. A Mauricio Espinal (cPhD) por sus valiosos consejos en la parte académica, por la asesoría y ayuda en bioquímica vegetal.

A los Profesores Gerhard Fischer, Jesús Antonio Galvis, Claudia Patricia Pérez, María Soledad Hernández, Víctor Flórez, Diego Miranda Lasprilla, Pedro Almanza, Carolina Sánchez, German Giraldo y José Regulo Cartagena, jurados de la tesis y de los diferentes seminarios doctorales, por sus importantes aportes y sugerencias. A mis profesores del doctorado por el gran conocimiento que me brindaron.

A Mi esposa Claudia Andrea, por su valiosa ayuda, sus consejos, su ejemplo, su emprendimiento y apoyo incondicional para culminar con éxito mis estudios doctorales. A mi familia por todo el apoyo recibido. A mis amigos y compañeros de laboratorio de Poscosecha, Fredy Alexander Salamanca (q.e.p.d), Juan Camilo García, Laura Victoria Ramírez, Liz Patiño, Daniel Cortés, Gustavo Ardila y Rafael Quintana por su gran colaboración y compañía. Y a todas aquellas personas que de una u otra manera aportaron para llevar a buen término esta investigación.

Resumen

La uchuva es la fruta exótica de mayor exportación en Colombia, es bastante apetecida por en los mercados internacionales por su agradable sabor y por el contenido nutricional. El fruto presenta un comportamiento climatérico y una corta vida poscosecha que disminuye las posibilidades de comercialización. El objetivo fue realizar el estudio del comportamiento poscosecha del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.), bajo el efecto del 1-metilciclopropeno (1-MCP) y de la refrigeración. Inicialmente se determinaron los cambios asociados al etileno durante la maduración de los frutos de uchuva, para lo cual, se determinó la emisión de compuestos volátiles durante el desarrollo del fruto, luego se estableció el efecto del estado de madurez y el cáliz sobre el comportamiento poscosecha del fruto, posteriormente se hicieron aplicaciones poscosecha de etileno y 1-MCP para determinar su efecto sobre la emisión de compuestos volátiles y en general sobre el comportamiento poscosecha del fruto. Después se caracterizó el efecto del 1-MCP, por tanto, se evaluaron diferentes dosis y tiempos de exposición, y finalmente se estudió el efecto de la refrigeración sobre la conservación poscosecha del fruto. Los resultados indicaron en estados tempranos de desarrollo del fruto predominaron los compuestos terpenoides, mientras que durante la maduración predominaron los esteres. El estado de madurez en la cosecha afecta el comportamiento poscosecha, los frutos de uchuva en lo posible deben cosecharse en madurez de consumo, una cosecha temprana afecta negativamente la calidad poscosecha. La presencia del cáliz en los frutos de uchuva garantiza un mejor comportamiento poscosecha. La aplicación de 1-MCP se convierte en un retardante de madurez eficiente para la conservación de frutos de uchuva, principalmente en dosis de 3 $\mu L\ L^{-1}$ de 1-MCP durante 24 h. Además, estos resultados plantean evidencias de que el etileno está involucrado en el proceso de maduración de los frutos de uchuva. Durante 35 días de almacenamiento, la refrigeración a 2°C con aplicación de 1-MCP fue la mejor alternativa de conservación de los frutos de uchuva con cáliz y sin cáliz.

Palabras clave: etileno, fruto climatérico, fruto perecedero, maduración

Abstract

The cape gooseberry is the largest export exotic fruit in Colombia, is quite palatable to international markets for its pleasant taste and nutritional content. The fruit has a climacteric behavior and a short postharvest life that decreases the chances of marketing. The objective was to study the postharvest behavior of fruit cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.), under the effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) and refrigeration. Initially the changes associated with ethylene during ripening of the fruits of gooseberry were determined, for which the emission of volatile compounds was measured during fruit development. Then was established the effect of maturity stage and the calyx on postharvest behavior of the fruit, then postharvest applications of ethylene and 1-MCP were made to determine its effect on the emission of volatile compounds and generally on postharvest behavior of fruit. After, the effect of 1-MCP was characterized thus different doses and exposure times were evaluated, and finally the cooling effect of postharvest preservation of fruits was studied. The results indicated that in the early stages of fruit development terpenoid compounds predominated, while during ripening predominated esters. The maturity stage at harvest affects postharvest behavior, cape gooseberry fruits should be harvested when possible consumer maturity, an early harvest adversely affect postharvest quality. Calyx in cape gooseberry fruits ensures better postharvest behavior. The application of 1-MCP becomes efficient maturity retardant to conservation of cape gooseberry fruits, mainly in doses of 3 $\mu L\ L^{-1}$ of 1-MCP for 24 h. Furthermore, these results raise evidence that ethylene is involved in the maturation of the fruits. During 35 days of storage, refrigeration at 2 °C with application of 1-MCP was the best alternative for the conservation of cape gooseberry fruit with calyx and without calyx.

Keywords: ethylene, climacteric fruit, perishable fruit, ripening

Contenido

Pág.

Resumen ..... **VII**

Lista de figuras ..... **XII**

Lista de tablas ..... **XIX**

Introducción **1**

1. Revisión de literatura **5**

1.1 Fisiología y bioquímica del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) durante la maduración y poscosecha 5

1.1.1 Resumen 5
1.1.2 Abstract 6
1.1.3 Introducción 6
1.1.4 Patrón de respiración y producción de etileno 8
1.1.5 Cambios en los carbohidratos 10
1.1.6 Cambios en la firmeza del fruto 13
1.1.7 Los pigmentos y el cambio de color 15
1.1.8 Actividad antioxidante 19
1.1.9 Emisión de compuestos volátiles 20
1.1.10 Conclusiones y recomendaciones 22
1.1.11 Referencias 22

1.2 Etileno y retardantes de la maduración en la poscosecha de productos hortícolas perecederos. Una revisión 29

1.2.1 Resumen 29
1.2.2 Abstract 29
1.2.3 Introducción 30
1.2.4 Biosíntesis de etileno 31
1.2.5 Señalización 31
1.2.6 El 1-Metilciclopropeno (1-MCP) 32
1.2.7 Efecto de la aplicación de 1-MCP 33
1.2.8 Sales de plata 36
1.2.9 Aminoetoxi Vinil Glicina (AVG) 36
1.2.10 Ácido aminooxiacético (AOA) 37
1.2.11 Permanganato de potasio ($KMnO_4$) 38
1.2.12 Conclusiones 39
1.2.13 Referencias bibliográficas 40

1.3 Refrigeración como tecnología poscosecha 49

1.3.1 Efecto de la refrigeración sobre características poscosecha 50

1.3.2 Daños por frío 52
1.3.3 Bibliografía 54

2. Cambios fisiológicos durante la maduración del fruto de uchuva asociados con la producción de etileno 59
2.1 Emisión de compuestos volátiles durante el desarrollo del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) 59
2.1.1 Resumen 59
2.1.2 Abstract 60
2.1.3 Introducción 61
2.1.4 Materiales y métodos 63
2.1.5 Resultados y discusión 66
2.1.6 Conclusiones 74
2.1.7 Bibliografía 74
2.2 El estado de madurez afecta el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) almacenados a temperatura ambiente 78
2.2.1 Resumen 78
2.2.2 Abstract 79
2.2.3 Introducción 79
2.2.4 Materiales y métodos 82
2.2.5 Resultados y discusión 85
2.2.6 Conclusiones 93
2.2.7 Bibliografía 94
2.3 Papel del cáliz en el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo Colombia 98
2.3.1 Resumen 98
2.3.2 Abstract 99
2.3.3 Introducción 99
2.3.4 Materiales y métodos 101
2.3.5 Resultados y discusión 103
2.3.6 Conclusiones 110
2.3.7 Bibliografía 111
2.4 Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno en la emisión de compuestos volátiles durante la poscosecha de frutos de uchuva 114
2.4.1 Resumen 114
2.4.2 Abstract 115
2.4.3 Introducción 116
2.4.4 Material y métodos 118
2.4.5 Resultados y discusión 119
2.4.6 Conclusiones 122
2.4.7 Bibliografía 123
2.5 Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) 126
2.5.1 Resumen 126
2.5.2 Abstract 127
2.5.3 Introducción 127
2.5.4 Material y métodos 129
2.5.5 Resultados y Discusión 132
2.5.6 Conclusiones 141
2.5.7 Bibliografía 142

2.6 Regulación de respuestas fisiológicas del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) bajo la aplicación poscosecha de etileno y 1-metilciclopropeno 147
2.6.1 Resumen..... 147
2.6.2 Abstract..... 148
2.6.3 Introducción..... 150
2.6.4 Materiales y métodos 153
2.6.5 Resultados y discusión 158
2.6.6 Conclusiones..... 167
2.6.7 Referencias 168

3. Caracterizar el efecto del 1-metilciclopropeno como inhibidor de la acción del etileno en el comportamiento poscosecha del fruto de uchuva 173
3.1 Comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (Physalis peruviana L.): Efecto de diferentes dosis y tiempos de exposición al 1-metilciclopropeno..... 173
3.1.1 Resumen..... 173
3.1.2 Abstract..... 174
3.1.3 Introducción..... 175
3.1.4 Materiales y métodos 177
3.1.5 Resultados y discusión 179
3.1.6 Conclusiones..... 193
3.1.7 Bibliografía..... 193

4. Efecto de la refrigeración en el comportamiento poscosecha del fruto de uchuva 197
4.1 La refrigeración afecta el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) tratados con 1-metilciclopropeno 197
4.1.1 Resumen..... 197
4.1.2 Abstract..... 198
4.1.3 Introducción..... 199
4.1.4 Material y métodos 201
4.1.5 Resultados y Discusión..... 203
4.1.6 Conclusiones..... 236
4.1.7 Bibliografía..... 237

5. Conclusiones y recomendaciones..... 243
5.1 Conclusiones 243
5.2 Recomendaciones..... 246

A. Anexo: Resumen de ponencia 1 realizada en congreso internacional..... 247

B. Anexo: Resumen de ponencia 2 realizada en congreso internacional..... 248

C. Anexo: Resumen de ponencia 3 realizada en congreso internacional..... 249

D. Anexo: Resumen de ponencia 4 realizada en congreso internacional..... 250

E. Anexo: Resumen de capítulo de libro publicado 251

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1: Estados de desarrollo del fruto de uchuva con base en el color de la epidermis. Fuente: Autores 16

Figura 2-1: A. Índice de color (IC), B. Carotenoides totales y C. Masa fresca de frutos de uchuva en 6 estados de desarrollo. Promedios seguidos de letras distintas presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey (P≤0,05). 67

Figura 2-2: A. Firmeza y B. Intensidad respiratoria de frutos de uchuva en 6 estados de desarrollo. Promedios seguidos de letras distintas presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey (P≤0,05). 69

Figura 2-3: A. Sólidos solubles totales (SST), B. Acidez total titulable (ATT) y C. Relación de madurez (RM) de frutos de uchuva en 6 estados de desarrollo. Promedios seguidos de letras distintas presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey (P≤0,05). 70

Figura 2-4: Producción de etileno durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%). 85

Figura 2-5: Comportamiento de la pérdida de peso durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%)..... 86

Figura 2-6: Comportamiento de la firmeza durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos

de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%). 88
Figura 2-7: Comportamiento del Índice de Color durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%). 89
Figura 2-8: Comportamiento de los sólidos solubles totales durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%). 91
Figura 2-9: Comportamiento de la acidez total titulable durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%). 92
Figura 2-10: Comportamiento de la relación de madurez durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%). 93
Figura 2-11: Efecto de la presencia del cáliz sobre la producción de etileno de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas. 103
Figura 2-12: Efecto de la presencia del cáliz sobre la pérdida de peso de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas. 105
Figura 2-13: Efecto de la presencia del cáliz sobre la firmeza de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas. 106
Figura 2-14: Efecto de la presencia del cáliz sobre el índice de color (IC) de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). A. Cáliz B. Fruto. ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas. Barras verticales indican el error estándar (n=4).....107
Figura 2-15: Efecto de la presencia del cáliz sobre los sólidos solubles totales (SST) de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas. 108

Figura 2-16: Efecto de la presencia del cáliz sobre la acidez total titulable (ATT) de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas. 109
Figura 2-17: Efecto de la presencia del cáliz sobre la relación de madurez (RM) de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas. 110
Figura 2-18: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre el índice de color de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%). 120
Figura 2-19: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre A. Producción de etileno, B. Tasa respiratoria de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%). 133
Figura 2-20: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre A). El índice de color y B). Carotenoides de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%). 135
Figura 2-21: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre A). La firmeza, B. Los sólidos solubles totales y C). La acidez total titulable de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%). 138
Figura 2-22: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre compuestos volátiles mayoritarios A). Octanoato de etilo, B). Butanoato de etilo, C). Decanoato de etilo y D). Decanoato de hexilo de frutos de uchuva durante el almacenamiento. La cuantificación se hizo con base en limoneno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%). 141
Figura 2-23: Efecto del etileno (a) y del 1-MCP (b) en la activación de la expresión de los genes de respuesta al etileno. En presencia de etileno (a) la HK está activa, produciendo la inactivación de la actividad quinasa de CTR1. La ausencia de la fosforilación de EIN2 resulta en la ruptura del extremo c-terminal de EIN2 y su posterior localización en el núcleo, donde puede activar la cascada transcripcional corriente abajo promovida por los factores de transcripción TFEIN3 y TFEIL1. En presencia de 1-MCP (b) la HK está inactiva, produciendo la activación de la actividad quinasa de CTR1, la cual fosforila el extremo c-terminal de EIN2 marcándolo para la degradación por parte del proteosoma 26S (proteínas F-box ETP1/2) y evitando así su localización nuclear. De esta manera, los factores de transcripción TFEIN3 y TFEIL1 son también marcados para la degradación por parte del proteosoma 26S (proteínas F-box EBF1/2) inhibiendo la expresión de los genes de respuesta al etileno. 152
Figura 2-24: Perfil HS-SPME-GC-MS de los volátiles obtenidos del fruto de uchuva (a). Espectro de masas del butanoato de etilo (b), butanoato de butilo (c) octanoato de etilo (d) y decanoato de etilo (e). 159
Figura 2-25: Efecto del etileno y del 1-MCP sobre la emisión de los volátiles butanoato de etilo (a), butanoato de butilo (b) octanoato de etilo (c) y decanoato de etilo (d), sobre el color (a) y la

firmeza (b) del fruto de uchuva durante la maduración. Las barras verticales indican el error estándar (n=4). 160
Figura 2-26: Efecto de la aplicación de etileno y 1-MCP en la actividad de las enzimas HK y ACC oxidasa extraídas del fruto de uchuva (*Physalis peruviana*). Las unidades de actividad enzimática son μmol HisP min^{-1} mg^{-1} proteína para HK y μmol C_2H_4 min^{-1} mg^{-1} proteína para ACC oxidasa. Asteriscos diferentes indican diferencias significativas, establecidas con la prueba de diferencias mínimas significativas de Fisher LSD ($p<0.05$).....162
Figura 2-27: Experimentos *in vitro* para la determinación del efecto cinético de la concentración del 1-MCP sobre la actividad de las enzimas ACC oxidasa (a y b) y HK (c y d). Efecto de la concentración de 1-MCP sobre la V_{maxapp} y K_m de la ACC oxidasa (e) y HK (f). Se observa que el 1-MCP se comporta como un inhibidor competitivo de la ACC oxidasa y como un inhibidor no competitivo de la HK. Las concentraciones de 1-MCP empleadas fueron 0 (●), 20 (○), 40 (▲), 60 (△), 80 (■), y 100 μM (□). 164
Figura 2-28: Energía libre de la unión del etileno y del 1-MCP al receptor ETR1 y del 1-ACC y el 1MCP a la ACC oxidasa. 166
Figura 2-29: Esquema de la unión entre el receptor ETR1 y etileno (a), receptor ETR1 y 1-MCP (b), ACO y 1-ACC (c) y ACO y 1-MCP. 166
Figura 3-1: Efecto de diferentes dosis (μL L^{-1}) de 1-MCP sobre: A. Producción de etileno y B. concentración interna de etileno (CIE) de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ($P\leq0,05$).....180
Figura 3-2: Efecto de diferentes dosis (0,3; 1 y 3 μL L^{-1}) y tiempos de aplicación (2, 12 y 24 h) de 1-metilciclopropeno sobre el cambio en: A. El índice de color, B. La pérdida de peso y C. La firmeza de frutos de uchuva durante el almacenamiento. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias. 182
Figura 3-3: Efecto del factor dosis (μL L^{-1}) de 1-MCP sobre el cambio en: A. El índice de color, B. La pérdida de peso y C. La firmeza de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ($P\leq0,05$).....184
Figura 3-4: Efecto del factor tiempo de aplicación (h) de 1-MCP sobre el cambio en: A. El índice de color, B. La pérdida de peso y C. La firmeza de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ($P\leq0,05$). 186
Figura 3-5: Efecto de diferentes dosis (0,3; 1 y 3 μL L^{-1}) y tiempos de aplicación (2, 12 y 24 h) de 1-metilciclopropeno sobre el cambio en: A. Sólidos solubles totales (SST), B. Acidez total titulable (ATT) y C. La relación de madurez (RM) de frutos de uchuva durante el almacenamiento. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias. 188

Figura 3-6: Efecto del factor dosis (µL L^{-1}) de 1-MCP sobre el cambio en: A. Sólidos solubles totales (SST), B. Acidez total titulable (ATT) y C. La relación de madurez (RM) de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 190
Figura 3-7: Efecto del factor tiempo de aplicación (h) de 1-MCP sobre el cambio en: A. Sólidos solubles totales (SST), B. Acidez total titulable (ATT) y C. La relación de madurez (RM) de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 192
Figura 4-1: Tasa respiratoria de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. ** Diferencias estadísticas al 1%, *Diferencias estadísticas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza. 205
Figura 4-2: Índice de color de A. Cáliz, B. Frutos con cáliz y C. Frutos sin cáliz almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias. 207
Figura 4-3: Pérdida de peso de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias. 209
Figura 4-4: Carotenoides totales de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. Promedios seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (≤0,05)..... 211
Figura 4-5: Frmeza de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias. 213
Figura 4-6: Sólidos solubles totales de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias..... 215
Figura 4-7: Acidez total titulable de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin

cáliz. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias. 217
Figura 4-8: Cambio en la tasa respiratoria de frutos de uchuva con cáliz durante el tiempo de "shelf-life", después de ser almacenados durante 20 (A) y 35 (B) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 219
Figura 4-9: Cambio en la tasa respiratoria de frutos de uchuva sin cáliz durante el tiempo de "shelf-life", después de ser almacenados durante 20 (A) y 35 (B) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 220
Figura 4-10: Cambio en la pérdida de peso de frutos de uchuva con cáliz durante el tiempo de "shelf-life", después de ser almacenados durante 20 (A) y 35 (B) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 221
Figura 4-11: Cambio en la pérdida de peso de frutos de uchuva sin cáliz durante el tiempo de "shelf-life", después de ser almacenados durante 20 (A) y 35 (B) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 222
Figura 4-12: Cambio en: A y B. Índice de color del cáliz, C y D. Índice de color del fruto, E y F. Carotenoides totales de frutos de uchuva con cáliz al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 224
Figura 4-13: Cambio en la firmeza de frutos de uchuva con cáliz al final del "shelf-life", después de ser almacenados durante 20 (A) y 35 (B) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 226
Figura 4-14: Cambio en: A y B. Índice de color del fruto, C y D. Carotenoides totales, E y F. Firmeza de frutos de uchuva sin cáliz al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 227
Figura 4-15: Cambio en: A y B. Sólidos solubles totales (SST), C y D. Acidez total titulable (ATT), E y F. Relación de madurez (RM) de frutos de uchuva con cáliz al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios

seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05)..... 229
Figura 4-16: Cambio en: A y B. Sólidos solubles totales (SST), C y D. Acidez total titulable (ATT), E y F. Relación de madurez (RM) de frutos de uchuva sin cáliz al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05)..... 230
Figura 4-17: Incidencia de patógenos en A y B. Frutos con cáliz, C y D. Frutos sin cáliz, al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 233
Figura 4-18: Liberación de electrolitos en A y B. Frutos con cáliz, C y D. Frutos sin cáliz, al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05). 236

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1: Color de la epidermis y carotenoides totales en frutos de uchuva en seis estados de madurez 17

Tabla 2-1: Concentración relativa (%) de compuestos volátiles emitidos por frutos de uchuva en seis estados de desarrollo. nd: no se detectó. 73

Tabla 2-2: Descripción de los frutos de uchuva cosechados en diferentes grados sucesivos de madurez con base en el color de la epidermis 83

Tabla 2-3: Frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez y almacenados durante 15 días a temperatura ambiente (18°C, 75%HR). E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café..... 87

Tabla 2-4: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre la emisión de ésteres volátiles (unidades de área/µL) emitidos por frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%).....122

Introducción

La producción de frutas en Colombia tiene un alto impacto social, lo cual se debe a que esta actividad es realizada en su mayoría por pequeños productores, además las frutas son un importante apoyo nutricional para la población del país, en su mayoría urbana. El cultivo de uchuva (*Physalis peruviana* L.), es una alternativa de producción para la economía de muchos países, debido a que presenta buenas perspectivas e interés en los mercados internacionales, lo cual se deriva de las características nutricionales y propiedades medicinales que posee el fruto (Gastelum, 2012). Y que además le han permitido ser incluida en la lista de los "Superfrutos" (Superfruit, 2011; Fischer et al., 2011). Colombia es el mayor productor de uchuva a nivel mundial (Novoa et al., 2006), para el año 2013 presentó una producción de 12.873 t, en una área de 880 ha, con un rendimiento de 14,6 t ha^{-1} (Agronet, 2014). El ecotipo colombiano ha sobresalido en el mercado mundial por su dulce sabor, aroma y color brillante característico (Galvis et al., 2005), que son comercializados en mercados nacionales y también exportados a Norte América y Europa (Fischer et al., 2011; García *et al*., 2008). Asimismo, la gran aceptación comercial y el éxito adaptativo que ha exhibido esta especie ha contribuido a su amplia distribución en diferentes condiciones agroecológicas andinas (Ligarreto et al., 2005), situación que la convierte en uno de los frutales más promisorios para el desarrollo del altiplano colombiano. Por lo anterior, cualquier aporte que se realice a este sistema de producción tendrá gran impacto en la economía de productores, comercializadores y consumidores.

Con esta investigación se busca en primer lugar, determinar qué cambios, de aquellos que se presentan durante la maduración, están regulados por etileno, esto puede traer dos grandes ventajas, la primera estaría relacionada con el uso de etileno exógeno para una maduración más rápida y uniforme, además de mejorar ciertas características

organolépticas y de calidad que hacen al fruto más atractivo para el consumidor. La otra ventaja hace referencia a la utilización de diferentes tecnologías (refrigeración, atmósferas controladas, retardantes químicos, etc) para evitar la síntesis de etileno, eliminarlo del ambiente o inhibir su acción, lo cual permite alargar la vida poscosecha de los frutos de uchuva y mantener las características de calidad por más tiempo, o por lo menos las que son dependientes de etileno.

El 1-metilciclopropeno (1-MCP) es considerado como uno de los retardantes de madurez más eficientes, pues ocupa los receptores celulares que el etileno requiere para inducir las diferentes respuestas durante la maduración y senescencia (Serek et al., 2006; Watkins, 2006; Huber, 2008), con el 1-MCP se busca retardar significativamente la maduración de los frutos de uchuva sin afectar negativamente las características de calidad, sin embargo, de forma similar que en otras frutas tropicales, se desconocen las condiciones más apropiadas de aplicación, por lo cual, es necesario evaluar dosis y tiempos de aplicación. Por último, en esta investigación se pretendió estudiar el efecto de la refrigeración sobre la conservación poscosecha del fruto de uchuva. La conservación refrigerada bajo condiciones óptimas permite reducir las pérdidas cualitativas y cuantitativas debidas a desórdenes fisiológicos y enfermedades, retrasar la maduración y senescencia y prolongar la vida comercial de los productos hortofrutícolas en general, con calidad idónea para consumo en fresco o industrial (Paull, 1999; Martínez-Jávega, 1997).

Por lo anteriormente citado, se considera necesaria la investigación en tecnologías de tratamientos poscosecha asequibles, tanto a los pequeños productores como a las grandes plataformas de producción y comercialización que permitan un incremento en la vida útil de los frutos de uchuva.

La uchuva es un fruto perecedero con limitada vida útil, que junto con una manipulación inadecuada en el momento de la cosecha y el almacenamiento, generan considerables pérdidas poscosecha que disminuyen la rentabilidad de este cultivo. La alta perecibilidad del fruto de uchuva puede estar asociada con el alto contenido de agua, la tasa respiratoria y la producción de etileno, entre otros, este último es la hormona encargada de acelerar un

gran número de procesos durante la maduración y senescencia de los frutos, pero se desconoce qué cambios durante la maduración de la uchuva están asociados con el etileno, lo cual permitirá generar tecnología poscosecha que disminuyan la síntesis, la acción el etileno del ambiente, con el fin de retrasar la maduración. Así mismo, el 1-metilciclopropeno, es uno de los inhibidores de la acción del etileno más importante del mundo, que puede mantener la calidad de los frutos de uchuva por más tiempo, a pesar de esto, en frutos de uchuva no se ha evaluado su potencial, por tanto, se desconocen todas las condiciones de aplicación que permitan obtener resultados favorables en esta especie.

De acuerdo con lo anterior se formulan las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuáles son los cambios durante la maduración asociados con el etileno en frutos de uchuva?, ¿Qué efecto presenta el 1-metilciclopropeno sobre la calidad poscosecha del fruto de uchuva?, ¿Cuál es el efecto de la refrigeración sobre el comportamiento poscosecha del fruto de uchuva?

En esta investigación fue necesario cumplir con los siguientes objetivos:

Objetivo general

Realizar el estudio del comportamiento poscosecha del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.), bajo el efecto del 1-metilciclopropeno (1-MCP) y de la refrigeración.

Objetivos específicos

- Estudiar los diferentes cambios fisiológicos durante la maduración del fruto de uchuva con el propósito de determinar aquellos que pueden estar asociados con la producción de etileno.
- Caracterizar el efecto del 1-metilciclopropeno como inhibidor de la acción de etileno en el comportamiento poscosecha del fruto de uchuva.
- Evaluar el efecto de la refrigeración sobre el comportamiento poscosecha del fruto de uchuva.

1. Revisión de literatura

1.1 Fisiología y bioquímica del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) durante la maduración y poscosecha[1]

Helber Enrique Balaguera-López, Laura Victoria Ramírez Sanabria, Aníbal Herrera Arévalo

1.1.1 Resumen

El fruto de uchuva es muy apetecido por su sabor y por sus propiedades funcionales y medicinales. Es considerado como un superfruto por su alto contenido de vitaminas, minerales y fibra. Es un fruto altamente perecedero con comportamiento climatérico que durante la maduración cambia de color verde a naranja, incrementa el contenido de azúcares solubles, principalmente sacarosa, su actividad antioxidante aumenta y se manifiesta el aroma característico del fruto compuesto principalmente por hidroxiésteres. Por el contrario, características como la firmeza y la acidez disminuyen, al igual que la concentración de almidón. Estos cambios conllevan a que el fruto de uchuva adquiera los atributos sensoriales y de calidad necesarios para garantizar su consumo. Considerando que la uchuva es un fruto altamente perecedero, es necesario conocer su comportamiento fisiológico y bioquímico durante la poscosecha, con la finalidad de emplearlo para la selección de las tecnologías de conservación más apropiadas. El objetivo de esta revisión fue presentar y discutir los principales resultados obtenidos de investigaciones realizadas, sobre los cambios fisiológicos, tales como patrón de respiración y producción de etileno y cambios bioquímicos relacionados con la reducción de firmeza, modificación de

---

[1]Capítulo de libro publicado en: Carvalho, C.P. y D.A. Moreno (eds.). *Physalis peruviana*: fruta andina para el mundo. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo-CYTED, Limencop SL, Alicante, España. 2014. pp. 113-131.

carbohidratos, modificación de pigmentos, actividad antioxidante y emisión de compuestos volátiles que experimenta el fruto de uchuva durante la poscosecha.

Palabras clave: Cambios fisicoquímicos, cambios fisiológicos, comportamiento climatérico, producción de etileno.

1.1.2 Abstract

Cape gooseberry is a very appealing fruit because of its delicious taste and functional and medicinal properties. It is considered a super fruit due to its high content of vitamins, minerals and fiber. It is a highly perishable fruit with climacteric behavior. During ripening it turns from green to orange, increases the content of soluble sugars, particularly sucrose as well as antioxidant activity and expresses the characteristic aroma of the fruit, which is mainly composed of hydroxyesters. Conversely, properties such as firmness, acidity and starch concentration decrease. These changes make possible for cape gooseberries to acquire the necessary sensory attributes and quality to ensure their consumption. However, since cape gooseberry is a highly perishable fruit, it is necessary to know about its physiological and biochemical behavior during post-harvest in order to select the most suitable preservation technologies. The objective of this review was to present and discuss the main research results on the physiological changes, such as respiration pattern, ethylene production and biochemical changes related to firmness reduction, modification of carbohydrates and pigments, antioxidant activity and emission of volatile compounds, which cape gooseberries undergo during postharvest.

Keywords: physicochemical changes, physiological changes, climacteric behavior, ethylene production.

1.1.3 Introducción

La uchuva (*Physalis peruviana* L.), es un fruto redondo de 1,25 a 2,50 cm de diámetro y de 4 a 10 g de peso, en cuyo interior se encuentran entre 150 y 300 semillas. Se forma y permanece dentro de un cáliz durante todo su desarrollo; y para su maduración necesita

entre 60 y 80 días. Este fruto se destaca por su alto contenido en antioxidantes (ácido ascórbico y provitamina A), fósforo, hierro, proteína y fibra (Fischer et al., 2011). Recientemente se le ha incluido en la lista de los “Superfrutos” por su alto contenido de vitaminas, minerales y fibra (Superfruit, 2011).

El fruto de uchuva es muy apetecido por su sabor y también por sus propiedades funcionales y medicinales. Puente et al. (2011) mencionan que este fruto tiene propiedades antiespasmódicas, diuréticas, antisépticas, analgésicas y sedativas, ayuda a fortalecer el nervio óptico, alivia los problemas de garganta, favorece la eliminación de los parásitos intestinales y amebas. También se ha reportado que el consumo diario de frutos puede contribuir a la disminución de problemas de diabetes, y hasta el momento no existen reportes que indiquen efectos adversos (Rodríguez y Rodríguez, 2007).

Los frutos durante la maduración y/o poscosecha presentan varios cambios metabólicos. Algunos frutos presentan producción autocatalítica de etileno, lo cual ocurre junto con el incremento en la tasa respiratoria, estos frutos son clasificados como frutos climatéricos. El etileno es la hormona encargada de regular la mayoría de los procesos físicos, bioquímicos y fisiológicos que se presentan durante la maduración de los frutos, cambios como desarrollo del color, sabor, aroma, ablandamiento, entre otros, son deseables para garantizar el consumo de los frutos, sin embargo, estos procesos se siguen llevando a cabo de forma acelerada en condiciones naturales y dan paso al estado de senescencia de los tejidos, por esta razón, se reduce la calidad y la vida útil de los frutos, considerando por tanto, a los frutos como perecederos (Paliyath et al., 2008; Kays, 2004; Kader, 2002). Para retardar el proceso de maduración, mantener la calidad de los frutos por más tiempo y disminuir las pérdidas en poscosecha se han implementado varias tecnologías, tales como, el preenfriamiento, la refrigeración, el uso de atmósferas controladas y modificadas, diferentes tipos de empaques, la utilización de retardantes químicos de maduración como 1-metilciclopropeno (1-MCP), permanganato de potasio, aminoetoxivinilglicina, ácido aminooxiacético, manipulación genética, entre otros. El éxito de estas tecnologías depende en gran medida del comportamiento metabólico de cada individuo. Por tanto, es indispensable conocer el comportamiento bioquímico y fisiológico de cada fruto.

Durante la maduración, el fruto de uchuva cambia de color verde a naranja debido a la degradación de clorofilas y acumulación de carotenoides, principalmente β-caroteno, paralelo a este proceso, el fruto pierde firmeza (Trinchero et al., 1999; Gutiérrez et al., 2008; Fischer y Martínez, 1999). A medida que el fruto madura, disminuye los contenidos de almidón y aumenta la concentración de azúcares solubles, en especial sacarosa, mientras que disminuye la concentración de ácidos orgánicos, siendo el predominante el ácido cítrico (Fischer et al., 2000; Novoa et al., 2006), además incrementa su actividad antioxidante (Valdenegro et al., 2012) y aumenta la emisión de compuestos volátiles, principalmente hidroxiésteres, muchos de los cuales son responsables del aroma característico durante la maduración (Gutiérrez et al., 2010; Duque et al., 2005). De acuerdo con su tasa respiratoria, la uchuva es considerada como fruto climatérico que presenta además un claro incremento de la producción de etileno durante la etapa de maduración (Trinchero et al., 1999; Majumder y Mazumdar, 2002; Gutiérrez et al., 2008). Al respecto, Lanchero et al. (2007) mencionan que uno de los limitantes que se presentan en el período de poscosecha de la uchuva, que no se ha estudiado suficientemente, son los diferentes cambios que involucra el proceso de maduración. Su conocimiento puede contribuir a un manejo adecuado durante las diferentes operaciones de poscosecha, para mantener la calidad y prolongar la vida útil del fruto (Galvis et al., 2005).

El objetivo de esta revisión fue presentar y discutir los principales resultados obtenidos de investigaciones realizadas, sobre los cambios fisiológicos, tales como patrón de respiración, producción de etileno y cambios bioquímicos relacionados con la reducción de firmeza, modificación de carbohidratos, modificación de pigmentos, actividad antioxidante y emisión de compuestos volátiles que experimenta el fruto de uchuva durante la poscosecha.

1.1.4 Patrón de respiración y producción de etileno

Los frutos de uchuva son considerados frutos climatéricos, esto debido a que después de la madurez fisiológica presentan un incremento en la tasa respiratoria, tal como es reportado

por varios autores (Gutiérrez et al., 2008; Novoa et al., 2006; Alvarado et al., 2004). Castañeda y Paredes (2003) cuantificaron la tasa respiratoria de frutos intactos de uchuva bajo condiciones de campo en el municipio de Silvania (Cundinamarca-Colombia, 2100 metros sobre el nivel del mar (msnm)), los autores encontraron que en los primeros 21 días de desarrollo de los frutos, estos presentaron alta tasa respiratoria, la cual coincide con la elevada demanda energética que ocurre en la etapa de división celular. A partir de este día se presentó un descenso acelerado hasta el día 56, cuando el fruto alcanza la madurez fisiológica, mientras que el pico climatérico se obtuvo a los 64 días después de antesis. La tasa respiratoria en este punto alcanzó aproximadamente 15 mg de CO_2 kg^{-1} h^{-1}, sin embargo, estos valores son inferiores a los reportados por Valdenegro et al. (2012) para un ecotipo chileno proveniente de semillas de un cultivar colombiano cuyos valores fueron superiores a 300 mg de CO_2 kg^{-1} h^{-1}.

Son varios los factores que pueden afectar la intensidad respiratoria en frutos de uchuva, entre ellos se destacan el estado de desarrollo, la temperatura de almacenamiento, la presencia o ausencia de cáliz y los tratamientos que se realizan en la poscosecha. Alvarado et al. (2004) mencionan que frutos sin cáliz y desinfectados con hipoclorito de sodio presentaron mayor intensidad respiratoria, al parecer esta práctica puede retirar la cera natural de los frutos y causar cierto estrés.

Por su parte, Novoa et al. (2006) reportan que el máximo climaterio para frutos de uchuva con cáliz almacenados a 12 °C se alcanzó en el día 12 de almacenamiento. En este mismo estudio se encontró que frutos cosechados en grado de madurez 5 de acuerdo con la norma 4580 del Icontec (Icontec, 1999) y secados a 24 ºC mostraron la menor intensidad respiratoria, indicando que el gasto de reservas energéticas del fruto en este tratamiento es menor y se conserva la calidad nutricional de la uchuva.

Se ha encontrado que el pico climatérico de los frutos de uchuva está acompañado por el aumento en la síntesis de etileno (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008; Majumder y Mazumdar, 2002). Trinchero et al. (1999) encontraron que el etileno aumenta 45 veces su concentración inicial, y hasta 70 veces cuando el fruto entra en estado de

sobremadurez. Gallo (1996) la clasifica como un fruto con producción de etileno alta. No obstante, Trinchero et al. (1999) mencionan que en la medida que aumenta la temperatura durante la maduración del fruto en la planta, se intensifica la evolución del etileno. Gutiérrez et al. (2008) reportan concentraciones de etileno en frutos de uchuva de hasta 600 ng kg^{-1} s^{-1}. Estos mismos autores afirman que el etileno durante la maduración de uchuva es autocatalítico, y, depende del estado de madurez en la cosecha, siendo mayor la producción en frutos cosechados con mayor madurez. También se reporta que la aplicación de 1-MCP disminuye notablemente la producción de etileno y la tasa respiratoria (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008).

Diferentes estudios indican que el etileno puede estar asociado a distintos procesos durante la maduración de los frutos de uchuva, como por ejemplo, el ablandamiento, la actividad antioxidante, el cambio de color, entre otros (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008; Majumder y Mazumdar, 2002; Trinchero et al., 1999), sin embargo, es necesario el desarrollo de más investigaciones para establecer con certeza el papel del etileno en la maduración del fruto de uchuva.

A pesar de que todos los reportes mencionados indican que el fruto de uchuva tiene un comportamiento climatérico, Lanchero et al. (2007) afirman que este comportamiento puede ser cuestionable, debido a que la máxima intensidad respiratoria, las mejores características sensoriales y la mejor relación de madurez (sólidos solubles totales/acidez total titulable) no ocurren de manera paralela. Esto conllevó a que inicialmente la uchuva se clasificara como un fruto intermedio entre comportamiento climatérico y no climatérico (Galvis et al., 2005). Asimismo, el climaterio puede ser causado por el estrés de la separación del fruto de la planta o los tratamientos usados en poscosecha (Rodríguez, 2003). Por lo anterior, se deben realizar estudios de genómica, transcriptómica y metabolómica que permitan verificar el comportamiento climatérico del fruto de uchuva.

1.1.5 Cambios en los carbohidratos

La concentración y comportamiento de los carbohidratos en el fruto de uchuva dependen de muchos factores, entre ellos, el estado de madurez en la cosecha, la utilización de

retardantes de madurez, el secado del cáliz y las condiciones de almacenamiento, entre otros (Gutiérrez et al., 2008; Novoa et al., 2006; Alvarado et al., 2004; Lanchero et al., 2007).

Los carbohidratos están entre los principales compuestos que determinan el sabor de los frutos, son un indicativo del estado de desarrollo y son los principales sustratos respiratorios del fruto. En general, el contenido de carbohidratos totales se incrementa durante el desarrollo del fruto. La uchuva en estados inmaduros presenta altos niveles de almidón (Fischer, 1995), el cual aumenta desde el cuajado del fruto y alcanza su máximo nivel 20 días después, para posteriormente hidrolizarse durante la maduración. La primera consecuencia de la hidrólisis del almidón es el aumento de los azúcares solubles, siendo la sacarosa el azúcar más abundante en la cosecha con cerca del 25% en masa seca del total de los carbohidratos, la glucosa y fructosa alcanzan un nivel más bajo que la sacarosa y ambos azúcares muestran un comportamiento muy similar en el fruto. En la cosecha estos dos azúcares corresponden a un poco más del 20% en masa seca del total de los carbohidratos del fruto (Fischer y Ludders, 1997).

Al parecer, el cáliz está implicado en la producción y en la translocación de carbohidratos, principalmente de la sacarosa. Con su eliminación, el desarrollo del fruto es más lento, lo cual se aprecia por los contenidos mayores de almidón. Así, el cáliz tiene, no solamente, una función protectora, sino que también, es una fuente importante para los asimilados, especialmente en la etapa temprana del crecimiento del fruto. Por su parte, la disminución en el contenido de sacarosa en las hojas a partir de la mitad del desarrollo del fruto podría ser debida a una mayor translocación desde la hoja hacia el fruto (Fischer y Ludders, 1997).

Cuando se almacenaron frutos de uchuva a 12 °C, su contenido de sacarosa presentó un aumento durante los primeros 6 días y después mostró un descenso constante hasta el día 24, presentando un ligero incremento al final del almacenamiento. Paralelamente, el contenido de glucosa y fructosa también aumentó durante el almacenamiento, sin embargo la fructosa alcanzó una menor concentración (Novoa et al., 2006). El aumento de estos

azúcares representa el incremento típico de los sólidos solubles totales (SST) durante la maduración. Según Fischer y Lüdders, (1997), ésta es una característica notable en las uchuvas del ecotipo Colombia. El incremento de los SST durante la poscosecha también ha sido mencionado por Gutiérrez et al. (2008), se indica que pueden alcanzar una concentración entre 10 y 17 °Brix (Amézquita, 2009; Novoa et al., 2006; Fischer y Martínez, 1999). En estado de sobremaduración, el fruto de uchuva puede presentar una disminución en los SST, debido posiblemente a que gran parte de los azúcares se utilizan para el proceso de respiración (Fischer y Martínez, 1999).

Los principales ácidos orgánicos en el fruto de uchuva en orden descendente son cítrico, málico ascórbico, tartárico y oxálico (Novoa et al., 2006). El ácido cítrico es el ácido predominante del fruto de uchuva, puede ser hasta 5,3 veces más alto que el ácido málico y 7,9 veces mayor que el ácido oxálico (Fischer et al., 2000). Sin embargo, estos valores pueden ser superiores. En frutos almacenados a 12° Novoa et al. (2006) encontraron el ácido cítrico incrementó en los primeros días de almacenamiento, coincidiendo con el pico climatérico, después disminuyó drásticamente y al final del almacenamiento nuevamente aumentó cuando la tasa respiratoria aparentemente era muy baja, por lo cual éste ácido podría considerarse como un sustrato respiratorio (Wills et al., 1998).

Un comportamiento similar al del ácido cítrico se encontró para el ácido málico. El ácido oxálico, a pesar de estar en bajas concentraciones respecto a los demás ácidos, presentó una tendencia a aumentar durante el almacenamiento, es decir, este ácido se sintetiza durante el metabolismo del fruto a medida que avanza el almacenamiento (Novoa et al., 2006). Esta misma tendencia fue reportada por Castañeda y Paredes (2003) en frutos unidos a la planta, donde la concentración del ácido oxálico aumentó desde el día 70 hasta el día 84 del fruto. En cuanto al ácido tartárico su concentración aumenta, especialmente durante los primeros días de almacenamiento, en su evaluación final, su concentración fue el doble de la inicial (Novoa et al., 2006).

El contenido de ácido ascórbico (vitamina C) en la uchuva es alto, y al parecer no se ve afectado por los ecotipos ni por la altitud de donde provienen los frutos (Fischer y

Martínez, 1999), pero se puede ver afectado por las condiciones de almacenamiento. Novoa et al. (2006) afirman que el ácido ascórbico tiene un comportamiento muy particular, pues al inicio del almacenamiento presenta valores de 3,07 a 5,03 mg 100 g^{-1} de pulpa, pero desaparece después de 12 días de almacenamiento a 12°C, lo que coincide con el pico climatérico, por tanto, es posible que el ácido ascórbico sea oxidado totalmente durante la respiración del fruto. Sin embargo, en uchuvas almacenadas a 20°C durante 14 días, se observó una disminución de éste ácido, pero no hasta niveles nulos. A su vez, esta disminución fue menor cuando los frutos fueron tratados con 1-MCP (Valdenegro et al, 2012). La concentración de las vitaminas en los frutos usualmente decrece después de la cosecha; durante la manipulación de los frutos y en el transporte, debido a una mayor actividad de enzimas oxidasas sobre las vitaminas, resultando en una pérdida acelerada de las mismas (Mozafar, 1994).

La acidez total titulable (ATT), como medida general de la presencia de ácidos en el fruto, presenta un comportamiento típico de disminución durante la maduración del fruto de uchuva. Este fruto se caracteriza por presentar alta ATT que puede oscilar entre 1,5% y 4% (Amézquita, 2009; Novoa et al., 2006; Fischer y Martínez, 1999). La disminución de la ATT es atribuida principalmente a la utilización de los ácidos orgánicos como sustratos respiratorios y a la conversión de éstos en azúcares.

1.1.6 Cambios en la firmeza del fruto

La firmeza es considerada como uno de los principales atributos de calidad y con frecuencia limita la vida útil en poscosecha (Morais et al., 2008). La firmeza está relacionada con la fuerza necesaria para que un producto alcance una deformación dada, esto refleja las trasformaciones en la estructura celular, en la cohesión de las células y algunos cambios bioquímicos (Chitarra y Chitarra et al., 2005). Durante la poscosecha de los frutos de uchuva se ha observado disminución continua de la firmeza (Ciro et al., 2007; Ciro y Osorio, 2008), sin embargo, frutos pintones en el momento de la cosecha conservan mayores valores de firmeza durante el almacenamiento que frutos recolectados con mayor grado de madurez (Ciro et al., 2007; Ciro y Osorio, 2008; Gutiérrez et al., 2008).

Después de ocho días de almacenamiento a 20°C, la firmeza de los frutos de uchuva puede alcanzar alrededor de 3 o 4 N. Se ha encontrado que la aplicación de 1-metilciclopropeno reduce la pérdida de firmeza en frutos de uchuva (Gutiérrez et al., 2008). Márquez et al. (2009) evaluaron 10 accesiones de uchuva provenientes del Banco de Germoplasma de Colombia, ubicado en el Centro de Investigación "La Selva" (Rionegro, Antioquia) que es administrado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), encontrando que la firmeza de los frutos en el momento de la cosecha no presentó diferencias estadísticamente significativa entre genotipos, lo que según ellos indica que posiblemente existe una actividad enzimática similar sobre los polímeros de la pared celular de los frutos.

La hidrolisis de la lamela media y de la pared celular es el principal proceso responsable de la pérdida de firmeza en los frutos (Morais et al., 2008). Brummell y Harpster (2001) mencionan que una disminución en la firmeza de los frutos coincide con la disolución de la lamela media, que resulta en una reducción en la adhesión intercelular, despolimerización, y solubilización de polisacáridos hemicelulósicos y pécticos de la pared celular. Además, se incrementa la expresión de varias enzimas que degradan la pared celular (Brummell, 2006). Alteraciones en la turgencia de la célula y la degradación de las reservas de almidón también conducen a la pérdida de firmeza de los frutos (Kays, 2004).En un estudio realizado para evaluar la variación de sustancias pécticas en frutos de uchuva, se encontró que las pectinas solubles en agua y las pectinas solubles en oxalato (las más solubles) aumentaron con el ablandamiento de la pared celular, mientras que las pectinas solubles en ácido y en álcali disminuyeron conforme se redujo la resistencia de la pared celular (Majumder y Mazumdar, 2002).

Durante el proceso de maduración de la uchuva se encontró que la pectinmetilesterasa (PME) y la α- y la β-galactosidasa muestran alta actividad, aunque solo PME y α-galactosidasa aumentan con la madurez del fruto (Trinchero et al, 1999). Las enzimas α-arabinofuranosidasa (PG) y β-glucosidasa mostraron baja actividad, mientras que la actividad de la poligalacturonasa y la α-glucosidasa fueron apenas perceptibles. Por lo

tanto, estos autores concluyen que las glicosidasas son responsables de la solubilización de la pared celular del fruto de uchuva. Por su parte, Majumder y Mazumdar (2002) encontraron alta actividad de la PG a partir del estado 3 de madurez (30 días después de antesis) con un continuo aumento durante el proceso de maduración, esto coincidió con la síntesis de etileno y la alta tasa respiratoria, al parecer PG desempeña una función importante en la solubilización de las sustancias pécticas que conducen al ablandamiento gradual en la maduración de los frutos de uchuva. Majumder y Mazumdar (2002), también reportan que la enzima PME disminuye su actividad a partir del estado 3 y presenta baja correlación con la solubilización de pectinas, no obstante esta enzima causa una demetilación parcial de la pectina para facilitar luego la actividad de la PG.

1.1.7 Los pigmentos y el cambio de color

Según Galvis et al. (2005), el color de la epidermis del fruto de uchuva puede ser usado como un índice de madurez. La cosecha se puede realizar cuando el cáliz comienza a adquirir una tonalidad amarilla (Bernal, 1991), la cual también se presenta en el fruto y de acuerdo con Fischer et al. (2011) el cambio de color del cáliz y el fruto presentan sincronía, proceso que se evidencia en la figura 1-1. El color es considerado una propiedad física fundamental de los productos agrícolas, pues ha sido ampliamente demostrado que se correlaciona bien con otros indicadores físicos, químicos y sensoriales de la calidad de los productos (Mendoza et al., 2006).

En la figura 1-1, se observan los cambios visuales de la coloración de la epidermis de frutos de uchuva en seis estados de desarrollo y en la Tabla 1-1, se presentan las respectivas coordenadas colorimétricas y contenido de carotenoides de frutos de uchuva en distintos estados de madurez. Frutos inmaduros (E1) se caracterizan por presentar una coloración verde intensa, representado por valores negativos de la coordenada colorimétrica a*, del espacio de color CIELab, esta coloración va disminuyendo para dar paso a tonalidades naranjas propias de la maduración del fruto. Por esta razón, los valores de a* se tornan positivos y los b* aumentan a valores alrededor de 55,79 en el estado E6, que, corresponde con la madurez de consumo. En este proceso el valor de L*, que indica la luminosidad, se incrementa en función del estado de madurez (Figura 1-1). Una manera

más sencilla de expresar matemáticamente el cambio de coloración de los frutos es mediante el uso del índice de color (IC), como se muestra en la tabla 1-1. El IC se incrementa a medida que el fruto de uchuva madura, es así que en el estado E1 presenta un valor de -9,07 y en el estado E6 de 4,17. Valores negativos son un indicativo de que se conservan tonalidades verdes, mientras que valores superiores a cero en el caso del fruto de uchuva se correlacionan con la coloración naranja.

Figura 1-1: Estados de desarrollo del fruto de uchuva con base en el color de la epidermis. Fuente: Autores

Al representar el color de la epidermis mediante ángulo de tono (Hue), se ha encontrado que este ángulo disminuye durante la poscosecha de los frutos de uchuva (Gutiérrez et al. 2008), esto indica que los frutos adquieren cada vez un color naranja más intenso. El cambio de color durante la poscosecha del fruto de uchuva depende entre otros factores, del estado de madurez en la cosecha. Al observar el comportamiento del ángulo de tono (Hue) de frutos almacenados durante 8 días a 20°C, se encuentra que frutos cosechados en estado pintón presentan un mayor cambio en la coloración, comparados con frutos cosechados más maduros o más verdes, dichos frutos presentan al inicio del almacenamiento un ángulo de aproximadamente 102° y a los 8 días el Hue es cercano a 78° (Gutiérrez et al., 2008).

Tabla 1-1: Color de la epidermis y carotenoides totales en frutos de uchuva en seis estados de madurez

Estados de madurez	L*	a*	b*	IC	Carotenoides totales (µg de β-caroteno /g PF)
E1	58,28 d	-22,57 e	43,23 c	-9,07 a	88,73 c
E2	62,71 c	-20,67 e	43,27 c	-7,68 b	100,58 c
E3	65,72 bc	-16,64 d	45,69 c	-5,56 c	113,31 c
E4	70,13 ab	-9,24 c	49,12 b	-2,73 d	169,37 b
E5	71,14 a	11,07 b	55,12 a	2,83 e	170,45 b
E6	68,69 a	15,95 a	55,79 a	4,17 f	222,06 a

Valores promedios seguidos de letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$). PF: peso fresco. Índice de Color: (IC=100xa*/L*xb*). Fuente: Autores.

Los cambios en la coloración de los frutos, en general, se deben a la degradación de la clorofila (Valpuesta et al., 1996) y a la aparición de otros pigmentos (Kays, 1997). La degradación de la clorofila comienza con la disociación del residuo de fitol y del anillo de porfirina de la molécula de clorofila, reacción que es catalizada por la enzima clorofilasa (Kariola et al., 2005). La degradación de la clorofila permite también que se desenmascaren pigmentos típicos de la coloración de los frutos, como es el caso de los carotenoides y otros pigmentos que se han formado durante el desarrollo del fruto (Ferrer et al., 2005).

De otra parte, la coloración de los frutos depende de la composición de los pigmentos presentes en los tejidos. En frutos de uchuva se ha reportado la presencia de clorofilas y carotenoides como pigmentos principales, la concentración de estos pigmentos varía de acuerdo con el estado de madurez de los frutos. Al respecto, Trinchero et al. (1999) afirman que los cambios de color del fruto de uchuva se deben a la degradación de la clorofila y a la acumulación de carotenoides en plástidos. La clorofila disminuye rápidamente con el desarrollo del fruto, pasando de valores superiores a 150 µg/g en estados inmaduros a valores casi nulos en estados avanzados de maduración (Trinchero et al. 1999).

El contenido de carotenoides en el fruto de uchuva varia ampliamente y depende de varios factores como el estado de madurez, condiciones climáticas, el ecotipo, presencia de fisiopatías, prácticas de poscosecha, entre otros (Fischer y Martínez, 1999; Fischer et al., 2000; Gutiérrez et al., 2008; Castro et al., 2008; Álvarez-Herrera et al., 2012). Los carotenoides incrementan continuamente durante la maduración del fruto, alcanzando concentraciones superiores a 200 µg de β-caroteno por gramo de peso fresco en frutos del ecotipo Colombia, cosechados en el municipio de Ventaquemada Boyacá, en madurez de consumo (Tabla 1-1). Estudios realizados por Fischer y Martínez (1999), indican que el β-caroteno se incrementó en los frutos de uchuva hasta que el fruto adquirió la coloración naranja, para descender después y aumentar otra vez en el estado de sobremaduración. Este último incremento es explicado por los autores como un efecto de concentración, debido a que el fruto disminuye su tamaño en este estado. Además del β-caroteno, en frutos de uchuva se reporta la presencia de α-caroteno y β-criptoxantina, no obstante, el β-caroteno como pigmento predominante (235,8 µg 100 g^{-1} PF) fue 147 veces más abundante que α-caroteno y 20 veces mayor que β-criptoxantina (Fischer et al., 2000).

Frutos de uchuva de los ecotipos Colombia, Kenia y Sur África presentaron mayor contenido de β-caroteno cuando las plantas fueron sembradas a 2300 msnm comparados con aquellos que fueron cultivadas a 2690 msnm, indicando probablemente que los frutos sintetizan mayor cantidad de β-caroteno cuando la temperatura ambiental es mayor. Por otra parte, el α-caroteno y la β-criptoxantina no se vieron afectados por las condiciones ambientales mencionadas. Entre los ecotipos analizados, los autores reportaron que la mayor concentración de carotenoides fue obtenida en los frutos del ecotipo Sudáfrica, seguido de Kenia y de ecotipo Colombia, respectivamente. (Fischer et al, 2000).

Álvarez-Herrera et al. (2014) reportan que frutos rajados acumularon significativamente menor cantidad de carotenoides totales (0,55 mg 100 g^{-1}) que los frutos sanos (0,7 mg 100 g^{-1}), también mencionan la importancia de disminuir el porcentaje de frutos rajados con el fin de asegurar un adecuado contenido nutricional, tanto para el consumo en fresco como en forma procesada.

Fischer y Martínez (1999) mencionan que la uchuva pertenece a la categoría de los frutos carotenogénicos debido a que presenta altos contenidos de vitamina A que varían entre 1000 y 5000 UI (Rehm y Espig, 1991). Debido al alto contenido de β-caroteno, se indica que la aplicación de gotas del jugo de uchuva en los ojos diariamente podría fortalecer el nervio óptico y prevenir las cataratas (Durán, 2007). Además, se ha determinado que este carotenoide tiene un potencial efecto anticancerígeno (Steinmetz y Potter, 1996). Varios autores coinciden en afirmar que existe una correlación positiva entre la ingestión de vegetales y frutas que contienen carotenoides y la prevención de varias enfermedades crónicas degenerativas (Coyne et al., 2005; Fraser et al., 2005).

1.1.8 Actividad antioxidante

Algunas de las propiedades medicinales del fruto de uchuva están asociadas con la capacidad antioxidantes de polifenoles presentes en él (Puente et al., 2011). Restrepo (2008) reporta que la pulpa del fruto de uchuva presenta una capacidad antioxidante de 210±9,45 μmol Trolox/100g peso fresco determinado por el método DPPH y de 56,53±1,38 mg de ácido ascórbico/100 g peso fresco según el método FRAP, mientras que el contenido total de fenoles fue de 40,45±0,93 mg acido gálico/100 g de peso fresco, resultados similares fueron reportados por Botero (2008). Por su parte Rop et al. (2012) mencionan que el contenido de flavonoides varía entre 4,05 ± 0,20 y 5,26 ± 0,18 g kg^{-1} de peso fresco, y que dicha variación depende en gran medida del cultivar. De acuerdo con Valdenegro et al. (2012), el fruto de uchuva es una buena fuente de compuestos bioactivos y su uso como un alimento funcional merece más estudio.

Valdenegro et al. (2012) encontraron un alto nivel de antioxidantes en frutos inmaduros de uchuva, que incrementó durante la maduración del fruto alcanzando valores máximos en el estado de madurez de consumo. Sin embargo, después de la cosecha la capacidad antioxidante se redujo rápidamente durante el período de vida en anaquel (20 °C) y la aplicación de etileno aumentó esta reducción. La aplicación de 1-MCP (0,2 μL L^{-1}) disminuyó la degradación del fruto conservando la vitamina C y los compuestos antioxidantes fenólicos en un nivel elevado durante períodos más largos

1.1.9 Emisión de compuestos volátiles

Los compuestos volátiles en plantas son moléculas lipofílicas con presiones de vapor suficientemente altas en condiciones normales para ser vaporizados en la atmósfera (Dicke y Loreto, 2010), tienen varias funciones ecológicas que incluyen defensa contra insectos, atracción de polinizadores, comunicación planta-planta, interacciones planta patógeno, remoción de especies reactivas de oxígeno, termotolerancia, adaptación a condiciones de estrés (Spinelli et al., 2011) y son determinantes del aroma, este último aspecto es un indicador muy importante de la calidad de los frutos y vegetales porque junto con el sabor determinan el flavor, el cual a su vez tiene gran influencia en la aceptación por parte de los consumidores (Song y Forney, 2008).

Al respecto, Duque et al. (2005) mencionan que a pesar de la importancia económica del fruto de uchuva, y de su apetecido y agradable aroma frutal, floral y delicado, son muy pocos los estudios que se han realizado sobre el aroma y en general sobre la emisión de compuestos volátiles. Las investigaciones existentes se han enfocado en la identificación de compuestos volátiles que aportan al aroma del fruto maduro o que contiene su pulpa.

Inicialmente, Mayorga et al. (2002) estudiaron la generación de aroma a partir de precursores glicosídicos, y como resultado aislaron y caracterizaron tres disacáridos de hidroxiésteres: el 3-O-β-D-glucopiranosil-(1→6)-β-D-glucopiranósido del 3-hidroxioctanoato de etilo y los diasteroisómeros 3-O-α-L-arabinopiranosil-(1→6)- β-D-glucopiranósidos de (3R) y (3S)-3-hidroxibutanoato de butilo. Posteriormente, Duque et al. (2005) reportaron 63 compuestos volátiles libres y 21 compuestos volátiles (agliconas) liberados por hidrólisis enzimática del extracto glicosídico del fruto. Estos autores señalan que los compuestos volátiles libres encontrados en mayor proporción fueron (E)-2-hexenal, butanoato de etilo, alcohol bencílico, butanol, hexanol, butanoato de metilo, 2-metilbutanol seguidos por el 3-hidroxibutanoato de butilo y el p-menten-4(8)-en-1,2-diol. Mientras que a nivel de compuestos volátiles enlazados se destacan por su abundancia los compuestos de estructura aromática (34,5%), ácidos (31,5%), alcoholes alifáticos (19%) y por su variedad están los hidroxiésteres (6,5%) y algunos terpenos (3,2%), también se destacan los hidroxiésteres por su potencial contribución al aroma del fruto.

Por su parte, Gutiérrez et al. (2010) por primera vez reportan los compuestos activos olfativamente en el aroma de la uchuva, confirmando que los hidroxiésteres tienen una función importante en el aroma de este fruto, estos autores mencionan que los compuestos que presentan mayor contribución al aroma total del fruto de uchuva fueron hexanal, 3-hidroxi-2-butanona, 2-metilpropanol, 2-hidroxibutanoato de etilo, octanoato de etilo y 3-hidroxibutaoato de butilo. Dichos autores consideran que el 3-hidroxibutanoato de butilo puede ser considerado como uno de los compuestos con actividad olfativa más importantes, no solo por su factor de dilución de aroma igual a 128, sino porque presenta una nota olfativa característica del fruto.

Tal como mencionan Gutiérrez et al. (2010), solo un número muy limitado de los volátiles son los responsables del aroma característico de los frutos, los cuales se conocen con el nombre de compuestos impacto o key aroma compounds. Esto pone en evidencia el desconocimiento total de la función que desempeña la mayoría de compuestos volátiles presentes en el fruto de uchuva.

De otra parte, son muchos los factores que pueden determinar la abundancia de los compuestos volátiles en los frutos (Song y Forney, 2008), estos incluyen el cultivar, las prácticas de cultivo, estado de madurez y manejo poscosecha (Fellman et al. 2000; Dixon y Hewett 2000; Forney et al., 2000; Lester 2006), además de los diferentes factores que causan estrés y el ataque de plagas. De estos factores, el estado de madurez tiene una importante función en el desarrollo de los volátiles del fruto. Lo más favorable sería cosechar el fruto en madurez de consumo para optimizar el contenido de volátiles que aportan al flavor (Song y Forney, 2008). Sin embargo, con frecuencia se cosechan frutos inmaduros para incrementar la vida en almacenamiento y comercialización, y para disminuir la presencia de daños físicos y fisiológicos (Kader, 2004), por lo que durante la maduración de estos frutos se puede afectar negativamente la emisión de compuestos volátiles. No obstante, estos son aspectos importantes que se desconocen totalmente en el fruto de uchuva y que deben ser estudiados.

1.1.10 Conclusiones y recomendaciones

La importancia económica y nutricional del fruto de uchuva ha motivado la realización de diferentes investigaciones, estas incluyen estudios del comportamiento bioquímico y fisiológico del fruto durante la maduración y/o poscosecha. Varios reportes indican que la uchuva es un fruto con patrón de respiración climatérico y alta producción de etileno, a pesar de esto, hay indicios de que el ecotipo Colombia puede presentar comportamiento intermedio entre climatérico y no climatérico, por tanto, dilucidar los mecanismos moleculares del comportamiento respiratorio y de la emisión de etileno del fruto de uchuva durante la maduración se convierte en una de las prioridades para entender los principales aspectos del comportamiento del fruto en esta etapa. El color naranja del fruto está determinado por la acumulación de β-caroteno y la degradación de clorofilas, la alta concentración de este carotenoide junto con los altos contenidos de ácido ascórbico hacen de la uchuva una especie nutricionalmente muy apetecida y junto con el balance entre azúcares/ácidos y la presencia de compuestos volátiles como hidroxiésteres determinan el flavor característico del fruto durante la madurez de consumo. Además, durante la maduración, el fruto pierde rápidamente la firmeza, aumenta su actividad antioxidante pero su vida poscosecha es limitada por ser altamente perecedero.

A pesar del conocimiento existente del fruto de uchuva durante la maduración, son varios los estudios que se deben proponer para explicar el comportamiento de cambios bioquímicos y fisiológicos que aún se desconocen, como por ejemplo el comportamiento climatérico del fruto, los cambios durante la maduración regulados por etileno, las causas de la alta pérdida de firmeza, la composición y comportamiento de los pigmentos y compuestos volátiles durante la maduración entre otros, resultados que finalmente conduzcan a mantener la calidad y prolongar la vida útil del fruto.

1.1.11 Referencias

ALVARADO, P.; BERDUGO, C. A. y FISCHER, G. Efecto de un tratamiento de frío (a 1,5° C) y la humedad relativa sobre las características físico-químicas de frutos de

uchuva Physalis peruviana L. durante el posterior transporte y almacenamiento Agronomía Colombiana, 2004. Vol. 22, No. 2, p. 147-159.

ÁLVAREZ-HERRERA, J., G. FISCHER, L. P. RESTREPO y M. QUICAZÁN. El contenido de carotenoides totales y ácido ascórbico en frutos sanos y rajados de uchuva (*Physalis peruviana* L.), Acta Horticulturae, 2014. Vol. 1016, p.77-81.

AMÉZQUITA, N. Efecto de las giberelinas y el calcio en la producción, calidad y rajado del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Trabajo de grado. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Ingeniería Agronómica. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. 2009. 69p.

BERNAL, J.A. Agronomic aspects of the cultivation of the uchuva, *Physalis peruviana*, on the high plateau of the Colombian departments of Cundinamarca and Boyacá, en HAWKES, J.G.; LESTER, R.N.; NEE, M. and ESTRADA, N. (eds), Solanaceae III: Taxonomy, Chemistry, Evolution, Royal Botanic Gardens Kew and Linnean Society of London, 1991, 459 – 460.

BOTERO, A. Aplicación de la Ingeniería de Matrices en el desarrollo da la uchuva mínimamente procesada fortificada con calcio y vitaminas C y E. Facultad de química farmacéutica, vol. Magíster en ciencias farmacéuticas énfasis en alimentos (pp. 185). Medellín: Universidad de Antioquía. 2008.

BRUMMELL, D.A. 2006. Cell wall disassembly in ripening fruit. Funct Plant Biol Vol. 33, 103-119

BRUMMELL, D.A. y HARPSTER. M.HCell wall metabolism in fruit softening and quality and its manipulation in transgenic plants. Plant Mol Biol. 2001. Vol. 47, 311–340.

CASTAÑEDA, G. y PAREDES, R. Estudio del proceso respiratorio, principales ácidos orgánicos, azucares y algunos cambios fisicoquímicos en el desarrollo del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Trabajo de Grado. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2003. 92 p.

CASTRO, A.; RODRÍGUEZ, L. y VARGAS, E. Secado de uchuva (*Physalis peruviana* L.) por aire caliente con pretratamiento de osmodeshidratación. Vitae, 2008. Vol. 15, No. 2, 226-231.

CHITARRA, M.I.F.; y CHITARRA, A.B. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. Lavras: ESAL-FAEPE, 2005. 785 p.

CIRO, H. y OSORIO, J. Avance experimental de la ingeniería de postcosecha de frutas colombianas: resistencia mecánica para frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.), Dyna, 2008. Vol. 75, No. 154, 39-46.

CIRO, H.; BUITRAGO, O. y PÉREZ, S. Estudio preliminar de la resistencia mecánica a la fractura y fuerza de firmeza para fruta de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Revista Facultad Nacional de Agronomía, 2007. Vol. 60, No. 1, 3785−3796.

COYNE, T.; IBIEBELE, T.I.; BAADR, P.D.; DOBSON, A.; MCCLINTOCK, C.; DUNN, S.; LEONARD D. y SHAW J. Diabetes mellitus and serum carotenoids: Findings of a population-based study in Queensland, Australia. Am J Clin Nutr. 2005. Vol. 82, No. 3, 685-93.

DICKE, M. y LORETO, F. Induced plant volatiles: from genes to climate change. Trends in Plant Sciences, 2010. Vol. 15, No. 3, 115-117.

DIXON, J. y HEWETT, E.W. Factors affecting apple aroma/flavour volatile concentration: a review. NZ J. Crop Hortic. Sci. 2000. Vol. 28, 155-173.

DUQUE, C.; MAYORGA, H.; KNAPP, H. y WINTERHALTER, P. Estudios sobre el delicado aroma de uchuva (*Physalis peruviana*) y algunos de sus precursores de tipo glicosídico. En: Duque, C.; Morales, A. L., Eds. El aroma frutal de Colombia. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. 2005. pp. 43-73.

DURÁN F. 'Manual curativo con frutas y plantas medicinales', Bogotá, Grupo Latino Ltda. 2007. 212-213.

FELLMAN, J.K.; MILLER, T.W.; MATTINSON, D.S. y MATTHEIS, J.P. Factors that influence biosynthesis of volatile flavor compound in apple fruits. HortScience, 2000. Vol. 35, 1026-1033.

FERRER, A.; REMÓN, S.; NEGUERUELA, A. y ORIA, R. Changes during ripening of the very late season Spanish pech cultivar Calanda Feasibility of using CIELAB coordinates as maturity indices. Sci. Hort. 2005. Vol. 105, 435-446.

FISCHER, G. Effect of root zone temperature and tropical altitude on the growth, development and fruit quality of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) Tesis de doctorado, Universidad de Humbolt, Berlín. 1995.

FISCHER, G. y LÜDDERS, P. Developmental changes of carbohydrates in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits in relation to the calyx and the leaves, Agron Colomb, 1997. Vol. 14, 95-107.

FISCHER, G.; EBERT, G. y LÜDDERS P. Provitamin A carotenoids, organic acids and ascorbic acid content of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) ecotypes grown at two tropical altitudes, Acta Hort , 2000. Vol. 531, 263-267.

FISCHER, G. y MARTÍNEZ, O. Calidad y madurez de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en relación con la coloración del fruto, Agron Colomb, 1999. Vol. 16, No. 1-3, 35-37.

FISCHER, G.; HERRERA, A. y ALMANZA, P.J. Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) pp. 374-396. En: Yahia, E.M. (ed.) Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits. 2011. Vol. 2. Acai to citrus. Woodhead Publishing, Oxford, U.K.

FORNEY, C.F.; KALT, W. y JORDAN, M.A. The composition of strawberry aroma is influenced by cultivar, maturity and storage. HortScience, 2000. Vol. 35, 1022-1026.

FRASER, M.L.; LEE, A.H. y BINNS, C.W. Lycopene and prostate cancer: Emerging evidence. Expert Review of Anticancer Therapy, 2005. Vol. 5, 847−854.

GALLO, F. Manual de fisiología, patología poscosecha y control de calidad de frutas y hortalizas. Convenio SENA-Reino Unido, Armenia. 1996.

GALVIS J.A.; FISCHER G. y GORDILLO O. Cosecha y poscosecha de la uchuva, en Fischer G. , Miranda D. , Piedrahíta W. y Romero J. , Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en Colombia, Bogotá, Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia, 2005. 165-190.

GUTIÉRREZ, D.; SINUCO, D. y OSORIO. C. Caracterización de los compuestos volátiles activos olfativamente en uchuva (*Physalis peruviana* L.). Revista Colombiana de Química, 2010. Vol. 39, No. 3, 389-399.

GUTIÉRREZ, M.S.; TRINCHERO, G.D.; CERRI, A.M.; VILELLA, F. y SOZZI, G.O. Different responses of goldenberry fruit treated at four maturity stages with the ethylene antagonist 1-methylcyclopropene. Postharvest Biol. Technol., 2008. Vol. 48, 199–205.

KADER, A.A. A perspective on postharvest horticulture (1978-2003). HortScience, 2004. Vol. 38, 1004-1008.

KADER, A.A. Postharvest technology of horticultural crops, University of California (System). Division of Agriculture and Natural Resources. Third edition. ANR Publications, 2002. 535 p.

KARIOLA, T.; BRADER, G.; Li, J. y PALVA. T. Chlorophyllase 1, a damage control enzyme, affects the balance between defense pathways in Plants. Plant Cell, 2005. Vol. 17, 282-294.

KAYS, S. Postharvest physiology of perishable plant products.1st edition. Exon Press, Athens, GA. 1997. pp. 263-278.

KAYS, S. Postharvest biology. Exon Press (Athens, Georgia). 2004. 568 p.

LANCHERO, O.; VELANDIA, G.; FISCHER, G.; VARELA, N.C. y GARCÍA. H. Comportamiento de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en poscosecha bajo condiciones de atmósfera modificada activa, Revista Corpoica – Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 2007. Vol. 8, No. 1, 61-68.

LESTER, G. Consumer preference quality attributes of melon fruit. Acta Hortic. 2006. Vol. 712, 175-181.

MAJUMDER, K. y MAZUMDAR. B. Changes of pectic substances in developing fruits of cape-gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in relation to the enzyme activity and evolution of ethylene. Scientia Horticulturae, 2002. Vol. 96, 91–101.

MÁRQUEZ, C.; TRILLOS, O.; CARTAGENA J. y COTES. J. Evaluación físico-química y sensorial de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.), Vitae, 2009. Vol. 16, No. 1, 42-48.

MAYORGA, H.; DUQUE, C.; KNAPP, H.; WINTERHALTER, P. Hydroxyester disaccharides from fruits of cape gooseberry (*Physalis peruviana*). Phytochemistry. 2002. Vol. 59, 439-445.

MENDOZA, F.; DEJMEK, P. y AGUILERA. J.M. Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis, Postharvest Biology and Technology, 2006. Vol. 41, 285–295

MORAIS, P.L.D.; MIRANDA, M.R.A.; LIMA, L.C.O.; ALVES, J.D.; ALVES, R.E. y SILVA. J.D. Cell wall biochemistry of sapodilla (*Manilkara zapota*) submitted to 1-methylcyclopropene, Braz. J. Plant Physiol., 2008. Vol. 20, No. 2, 85-94.

MOZAFAR, A. Plant vitamins: agronomic, physiological and nutritional aspects. CRC Press, 1994. Florida. pp. 9-11.

NOVOA, R.H.; BOJACÁ, M.; GALVIS, J.A. y FISCHER, G. La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12 °C (*Physalis peruviana* L.), Agronomía Colombiana, 2006. Vol. 24, No. 1, 77-86.

PALIYATH, G.; MURR, D.P.; HANDA, A.K. y LURIE, S. Postharvest Biology and Technology of Fruits, Vegetables, and Flowers, Wiley-Blackwell Publishing. New Delhi, India. 1 edition, 2008. 496 p.

PUENTE, L.; PINTO-MUÑOZ, C.; CASTRO, E. y CORTÉS, M. *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. Food Research International, 2011. Vol. 44, 1733–1740.

RAMADAN, M. Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. Food Research International, 2011. Vol. 44, 1830–1836.

REHM, S. y ESPIG, G. The Cultivated Plants of the Tropics and Subtropics, Weihersheim, Germany, Verlag Margraf. 1991.

RESTREPO, A. Nuevas perspectivas de consumo de frutas: Uchuva (*Physalis peruviana* L.) y Fresa (*Fragaria vesca* L.) mínimamente procesadas fortificadas con vitamina E. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Magíster en ciencia y tecnología de alimentos (pp. 107). Medellín: Universidad Nacional de Colombia. 2008.

RODRÍGUEZ, M. Estudio de la conservación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) utilizando los métodos de atmósfera modificada, refrigeración y encerado. Trabajo de grado. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 2003. 123 p.

RODRÍGUEZ, S. y RODRÍGUEZ, E. Efecto de la ingesta de Physalis peruviana (aguaymanto) sobre la glicemia postprandial en adultos jóvenes. Revista Médica Vallejiana, 2007. Vol. 4, No. 1, 43−52.

ROP, O.; MLCEK, J.; JURIKOVA, T. y VALSIKOVA, M. Bioactive content and antioxidant capacity of Cape gooseberry fruit. Cent. Eur. J. Biol. 2012. Vol. 7, No. 4, 672-679.

SONG, J. y FORNEY, C.F. Flavour volatile production and regulation in fruit. Can. J. Plant Sci. 2008. Vol. 88, 537-550.

SPINELLI, F.; CELLINI, A.; MARCHETTI, L.; NAGESH, K.M. y PIOVENE, C. Emission and Function of Volatile Organic Compounds in Response to Abiotic Stress. En: Shanker, A. (ed.). "Abiotic Stress in Plants - Mechanisms and Adaptations. Prof. Arun Shanker (Ed.), 2011.

STEINMETZ, K.A. y POTTER, J.D. 'Vegetables, fruit, and cancer prevention: A review', J Amer Diet Assoc, 1996. Vol. 96, No. 10, 1,027-1,039.

SUPERFRUIT. Uchuva- the superfruit. 2011. En: http://www.uchuvasuperfruit.com; consulta: 13 de agosto de 2011.

TRINCHERO, G.; SOZZI, G.; CERRI, A.M.; VILELLA, F. y FRASCHINA, A. Ripening-related changes in ethylene production, respiration rate and cell-wall enzyme activity in goldenberry (*Physalis peruviana* L.), a solanaceous species. Postharvest Biol. Technol. 1999. Vol. 16, 139–145.

VALDENEGRO, M.; FUENTES, L.; HERRERA, R. y MOYA-LEÓN, M.A. Changes in antioxidant capacity during development and ripening of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit and in response to 1-methylcyclopropene treatment. Postharvest Biology and Technology, 2012. Vol. 67, 110–117.

VALPUESTA, V.; QUESADA, M.A. y REID, M.S. Senescencia y abscisión. pp. 479-492. En: Azcón-Bieto, J. y M. Talón (eds.). Fisiología y bioquímica vegetal. Interamericana McGraw-Hill, 1996. Bogotá.

WILLS, R.; MCGLASSON, B.; GRAHAM, D. y JOYCE, D. Postharvest - an introduction to the physiology and handling of fruit, vegetables and ornamentals. CAB International, New York. 1998. 262 p.

1.2 Etileno y retardantes de la maduración en la poscosecha de productos hortícolas perecederos. Una revisión[2]

Ethylene and chemical retardants of ripening on postharvest of perishable horticultural products. A review

Helber E. Balaguera-López, Fredy Alexander Salamanca Gutiérrez, Juan Camilo García y Aníbal Herrera Arévalo

1.2.1 Resumen

El etileno es la hormona vegetal responsable de regular diferentes procesos durante la maduración de productos agrícolas, llevando a procesos de senescencia y finalmente, pérdida de valor nutricional y comercial. A través del tiempo se han desarrollado diversos retardantes químicos de la maduración para disminuir los efectos negativos del etileno en la poscosecha, los cuales actúan en las etapas de biosíntesis (Aminoetoxi-vinil-glicina (AVG) y ácido aminooxiacético (AOA)), acción/señalización (1-metilciclopropeno (1-MCP) y sales de plata como nitrato y tiosulfato de plata (STS)) y compuestos que oxidan al etileno de la atmósfera (permanganato de potasio ($KMnO_4$)). En ésta revisión se describen las características principales de cada uno de los retardantes de madurez mencionados, además, se analiza con estudios científicos, el efecto que tienen estos retardantes sobre los cambios moleculares, fisiológicos, químicos y físicos durante la poscosecha de frutos, hortalizas y especies ornamentales.

Palabras clave adicionales: aminoetoxi-vinil-glicina, ácido aminooxiacético, 1-metilciclopropeno, tiosulfato de plata, permanganato de potasio.

1.2.2 Abstract

Ethylene is the plant hormone responsible for regulating various processes during ripening of agricultural products, leading to senescence process and finally, to loss of nutritional

[2]Artículo publicado en la Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas.

and commercial value. Over time, different chemical retardants of ripening have been developed to decrease the negative effects of ethylene, which act on the stages of biosynthesis (Aminoethoxy-vinyl-glycine (AVG) and aminooxyacetic acid (AOA)), action/signaling (1-methylcyclopropene (1-MCP) and silver salts, such as nitrate and silver thiosulfate (STS)) and compounds that oxidize the ethylene of the atmosphere (potassium permanganate (KMnO4)). In this review, is mentioned the main characteristics of each chemical retardant, also is discussed with scientific studies the effect of these retardants, in molecular, physiological, chemical and physical changes during postharvest of fruits, vegetables and ornamental species.

Additional keywords: Aminoethoxy-vinyl glycine aminooxyacetic acid, 1-methylcyclopropene, silver thiosulfate, potassium permanganate.

1.2.3 Introducción

El etileno regula la maduración y senescencia de productos agrícolas a nivel molecular, bioquímico y fisiológico (Kesari *et al.*, 2007), debido a que estimula la expresión de genes que codifican para las enzimas relacionadas con los cambios durante la maduración y/o senescencia (Jiang y Fu, 2000). El etileno tiene un papel doble en la poscosecha, por un lado, ocasiona que los frutos adquieran características organolépticas óptimas para su consumo, pero también es responsable de la senescencia de los tejidos, generando efectos desfavorables en la calidad (Bapat *et al*., 2010).

El conocimiento del mecanismo de acción del etileno ha permitido generar diferentes tecnologías y procedimientos para disminuir sus efectos negativos, donde se incluye la refrigeración, uso de atmósferas modificadas y controladas, aplicación de calcio, entre otros, sin embargo, los retardantes químicos de madurez han mostrado mayor eficiencia en el control de la madurez y senescencia de frutos, hortalizas y flores (Arora *et al*., 2008).

Los retardantes químicos de la maduración se pueden clasificar en inhibidores de la síntesis del etileno, donde se incluyen productos como Aminoetoxi Vinil Glicina (AVG) y ácido aminooxiacético (AOA); inhibidores de la señalización (acción) del etileno, como 1-

metilciclopropeno (1-MCP) y sales de plata (nitrato y tiosulfato de plata) (Serek *et al*., 2006), entre otros. Otro grupo son los oxidantes de etileno, siendo el permanganato de potasio $KMnO_4$ el producto más importante (Wills y Warton, 2004). El objetivo de ésta revisión es realizar el estado del arte del etileno y el uso de estos retardantes de madurez en productos hortícolas perecederos como frutos, hortalizas y flores, destacando algunas generalidades, modo de acción, utilidades, desventajas, dosis, productos comerciales y algunas restricciones que pueden presentar.

1.2.4 Biosíntesis de etileno

El etileno se sintetiza a partir del aminoácido metionina, primero se da la conversión de metionina a S-adenosil-L-metionina (SAM) catalizada por la enzima SAM sintetasa, luego se presenta la formación de 1-aminociclopropano-1-ácido carboxílico (ACC) a partir de SAM mediante la enzima ACC sintasa (ACS) y finalmente la conversión de ACC a etileno, catalizada por la ACC oxidasa (ACO) (Bapat *et al.*, 2010). La metionina es reciclada en el ciclo de "Yang" lo que conlleva a tener altas tasas de producción de etileno sin necesidad de altos niveles de metionina intracelular (Barry y Giovannoni, 2007).

1.2.5 Señalización

La señalización inicia con la unión del etileno a un grupo de receptores proteicos presentes en la membrana del retículo endoplasmático (Chen *et al*., 2005), los cuales son codificados por una familia multigénica que produce proteínas estructuralmente diferentes pero con una función redundante (Chen *et al*., 2005; Bouzayen *et al*., 2010). La unión etileno-receptor ocurre en el dominio N-terminal del receptor y requiere iones de Cu (I) para formar un dímero de receptor (Binder, 2008). Los genes que codifican para los receptores se expresan diferencialmente dependiendo del órgano, tejido, etapa de desarrollo y en respuesta a estímulos exógenos (Bouzayen *et al.*, 2010). El número de receptores varía entre especies, por ejemplo, en *Arabidopsis* se han reportado 5 receptores (ETR1 y 2 (ETHYLENE-RESPONSE); ERS1 y 2 (ETHYLENE-SENSOR) y EIN4 (ETHYLENE-INSENSITIVE) (Klee y Giovannoni, 2011); en tomate 7 (ETR1 al 7, donde ETR3 se

conoce como NR (NEVER-RIPE)) (Barry y Giovannoni, 2007) y en manzana 5 (ETR1-2-5 y ERS1-2) (Yang *et al.*, 2013).

El siguiente componente en la vía de señalización es CTR1 (CONSTITUTIVE-TRIPLE-RESPONSE1), la cual es una proteína quinasa Raf-like ser/thr con similitud en su dominio C-terminal a la proteína MAPKKK (*mitogen-activated-protein kinase-kinase-kinase*) encontrada en mamíferos (Chen *et al.*, 2005; Czarny *et al.*, 2006). Ésta proteína interactúa con el dominio quinasa de los receptores y en presencia de etileno desencadena una cascada de fosforilaciones MAP-quinasa (Adams-Phillips *et al*., 2004) que afectan el estado de fosforilación de otras proteínas corriente abajo, incluyendo factores de transcripción (Stepanova y Alonso, 2009).

Corriente abajo de CTR1, se encuentra EIN2 (ETHYLENE INSENSITIVE2), la cual es una proteína de membrana transportadora de metales, con similitud a transportadores tipo NRAMP (*NATURAL-RESISTANCE ASSOCIATED-MACROPHAGE-PROTEIN*) (Czarny *et al.*, 2006). La función de EIN2 es regular la disponibilidad del factor de transcripción EIN3 mediante un mecanismo hasta el momento desconocido (Sang-Dong *et al.*, 2009). En respuesta al etileno, EIN3 y EIL1 (EIN3-LIKE1) se unen a un motivo (*motif*) conocido como elemento primario de respuesta al etileno (PERE), que está presente en los promotores de ERF1 (ETHYLENE-RESPONSE-FACTOR1), EBF2 (EIN3-BINDING-SITES) y varios genes relacionados con la senescencia y maduración de frutos (Barry y Giovannoni, 2007). Lo anterior lleva al incremento de la expresión de genes relacionados con la maduración, como, *ACS2*, *ACS4* en tomate (Klee y Giovannoni, 2011); *ACS2* en brócoli (Gang *et al.*, 2009); *ACO* y *EIN2* en manzana (Yang *et al.*, 2013); *ACO* en durazno (Zhang *et al.*, 2012) *XET* y *EXP* (xiloglucano-endotrans-glicosilasa y expansinas) en chirimoya (Li *et al.*, 2009), entre otros.

1.2.6 El 1-Metilciclopropeno (1-MCP)

1-MCP (C_4H_6) es una olefina cíclica, a temperatura y presión estándar, es un gas con un peso molecular de 54 (Blankenship y Dole, 2003). El 1-MCP ocupa los receptores del etileno de manera irreversible, bloqueando la cascada de transducción de señales que

conllevan a la expresión de genes relacionados con la respuesta al etileno (In et al., 2013). La afinidad del 1-MCP por los receptores es 10 veces mayor a la del etileno y actúa a más bajas concentraciones, también regula la biosíntesis de etileno a través de la inhibición del proceso autocatalítico (Blankenship y Dole, 2003). El compuesto no es tóxico, es inodoro, estable a temperatura ambiente, además, es de fácil aplicación y altamente eficaz para proteger a muchas especies agrícolas de la acción del etileno, incluyendo, frutos, vegetales, flores cortadas y plantas en maceta (Serek *et al*., 2006; Watkings, 2006; Huber, 2008). A pesar de que la unión del 1-MCP es irreversible, se ha reportado que los tejidos pueden recuperar la sensibilidad al etileno, debido a la capacidad de síntesis de nuevos receptores (Cameron y Reid, 2001), lo cual depende de la especie, tejido, estado de desarrollo y ambiente (Varanasi *et al*., 2013).

La concentración de 1-MCP necesaria para bloquear la acción del etileno varía de acuerdo con la especie, cultivar, estado de maduración, capacidad de producción de nuevos receptores, tiempo y temperatura de exposición (Watkins, 2006). Las dosis óptimas varían entre especies, pero Blankenship y Dole (2003) reportan diferentes concentraciones y temperaturas para la aplicación de 1-MCP, las cuales se encuentran entre 0,1 µL L^{-1} a 100 µL L^{-1} a 20-25 °C por 6 a 24 h. Sin embargo, la concentración recomendada para productos de uso comercial (EthylBloc® y ™SmartFresh) está entre 100 a 500 µL L^{-1}, alrededor de 1.000 veces mayor, probablemente debido a una alta posibilidad de pérdidas del 1-MCP (Serek *et al*., 2006).

1.2.7 Efecto de la aplicación de 1-MCP

El 1-MCP ha mostrado un efecto significativo en la disminución de la maduración y senescencia de diversos productos agrícolas, como frutos, hortalizas y especies ornamentales (Serek *et al*., 2006; Watkins, 2006). Los mejores resultados se han observado en frutos climatéricos (Blankenship y Dole, 2003; Hubert, 2008) aunque, en frutos no climatéricos también se han encontrado resultados favorables (Dou *et al*., 2005).

El 1-MCP disminuye la producción de etileno (Ma *et al*., 2009; Cerqueira *et al*., 2009; Choi *et al*., 2008; Zhang *et al*., 2012), debido a que afecta su síntesis autocatalítica al

disminuir la expresión de genes que codifican para las enzimas ACS y ACO. Por ejemplo, el 1-MCP disminuye la expresión de los genes *ACS1*, *ACO1* y *ACO2* en manzano (Yang *et al.*, 2013), banano (Golding *et al.*, 1999), tomate (Klee y Giovannoni, 2011), durazno (Zhang *et al.*, 2012) y brócoli (Gang *et al.*, 2009). A su vez, el 1-MCP también afecta la señalización del etileno, debido a que disminuye la expresión de genes que codifican para receptores de etileno, como *BoERS*; *BoETR1*; *BoETR2* en brócoli (Gang *et al.*, 2009); *PaERS1* en aguacate (Owino *et al.*, 2002), *ETR1*, *ETR2*, *ETR5*, *ERSs*, además de *CTR1*, *EIN2A*, *EIL4* y *ERFs* en manzana (Yang *et al.*, 2013).

El 1-MCP afecta la biosíntesis, señalización, y por tanto, los procesos que dependen de etileno durante la maduración. El 1-MCP disminuye la pérdida de firmeza en frutos de pera (Villalobos *et al*., 2011), ciruela (Khan y Singh, 2007), tomate (Choi *et al.*, 2008), guayaba (Cequeira *et al*., 2009), banano (Lohani *et al*., 2004), kiwi (Boquete *et al*., 2004), aguacate (Jeong y Hubert, 2004), fresa (Balogh *et al*., 2005), entre otros. Lo anterior se debe a que el 1-MCP disminuye la actividad de enzimas que degradan pared celular, como pectin-metilesterasa (PME), poligalacturonasa (PG), endo-β-1,4-glucanasa (EGasa) y pectato liasa (PL) (Lohani *et al*., 2004; Khan y Singh, 2007), además de expansinas (EXP), β-galactosidasa, α-arabinofuranosidasa y β-xilosidasa (Boquete *et al*., 2004). A su vez, la disminución de la actividad de dichas enzimas está relacionada con la disminución de la expresión de genes *AcXET1* (xyloglucano endotransglicosilasas), *AcEXP*, *AcEXP3* en chirimoya (Li *et al.*, 2009), *MaEXP1* en banano (Trivedi y Nath, 2004) y *EGasa* y *plB* (pectato liasa B) en fresa (Balogh *et al*., 2005).

Estudios recientes muestran que el 1-MCP disminuye la actividad de enzimas clorofilasas, manteniendo el color verde en el brócoli (Yuan *et al*., 2010) y col china (Sun *et al*., 2012). La disminución de la degradación de clorofilas puede atribuirse a la inhibición de la expresión de los genes *PAO* (feoforbida oxigenasa), *NYC* (“non-yellow colorrriiing”), *NOL* (“NYC1-like”) y *SGR1* (“stay green 1”), los cuales están estrechamente relacionados con la vía catabólica de las clorofilas (Cheng *et al.*, 2012). Además, el 1-MCP disminuye la acumulación de licopeno en tomate (Zhang *et al*., 2009), y retrasa el desarrollo de color

en frutos como pepino (Nilsson, 2005), pera (Villalobos *et al*., 2011) y tomate (Zhang *et al*., 2009).

También se ha reportado que el 1-MCP disminuye el contenido de azúcares y degradación de ácidos orgánicos en frutos de guayaba (Singh y Pal, 2008), tomate (Zhang *et al*., 2009), pitahaya amarilla (Deaquiz *et al*., 2014), granadilla (Dussan *et al.*, 2011), entre otros. Con lo anterior, se puede afirmar que el 1-MCP afecta el metabolismo de carbohidratos y ácidos orgánicos, Mainardi *et al.* (2006) reportan que el 1-MCP disminuye la actividad de enzimas fosforilasas de almidón (α-1,4-Glucano-fosforilasa), la expresión de genes *PpAIV1* (invertasa ácida soluble) y *PpSPS1* (sacarosa fosfato sintasa), con lo cual, la pérdida de sacarosa y acumulación de hexosas en frutos de pera se reduce (Itai y Tanahashi, 2008).

El contenido total de volátiles disminuye con la aplicación de 1-MCP, pero los volátiles individuales son afectados diferencialmente (Kondo *et al*., 2005). En frutos de manzana, la producción de ésteres, alcoholes y aldehídos fue inhibida por el 1-MCP (Mattheis *et al*., 2005). En frutos de melón el 1-MCP suprime la expresión de cuatro genes de alcohol-acil-transferasa y disminuye la actividad de ésta enzima (El-Sharkawy *et al*., 2005), no obstante, la enzima alcohol deshidrogenasa (ADH) no es afectada por el 1-MCP en manzana (Defilippi *et al*., 2005).

El efecto del 1-MCP sobre la calidad nutricional de los productos agrícolas no ha sido estudiado a profundidad. Se ha encontrado que el 1-MCP puede disminuir la pérdida de vitamina C en frutos de jujube chino (Jiang *et al*., 2004), pero no en frutos de guayaba (Cerqueira *et al*., 2009). Además, el 1-MCP incrementa el contenido de antioxidantes solubles en agua, pero no altera los compuestos fenólicos en frutos de manzana (Defilippi *et al*., 2005). A su vez, el 1-MCP disminuye la concentración de antocianinas y compuestos fenólicos en col china (Sun *et al*., 2012) y brócoli (Yuan *et al*., 2010). Estos reportes indican que la respuesta del 1-MCP sobre la calidad nutricional de los productos agrícolas es muy variable, poniendo en evidencia que está influenciada por diversos factores (Watkins, 2006).

1.2.8 Sales de plata

El ion plata (Ag^{2+}) es un fuerte inhibidor de la acción del etileno (Taiz y Zeiger, 2006). El ion Ag^{2+} remplaza al Cu presente en los receptores de etileno (Serek *et al*., 2006), en consecuencia se afecta la señalización inducida por etileno y se disminuyen los procesos de maduración y senescencia (Knee, 1995). Los primeros estudios se realizaron en flores de corte con nitrato de plata ($AgNO_3$) (Kofranek y Paul, 1975), sin embargo, se encontró que éste compuesto es tóxico en aplicaciones al follaje y su translocación en tallos es lenta (Staby *et al*., 1993). El tiosulfato de plata (STS; $Ag(S_2O_3)_2^{3-}$) es más eficiente, debido a que no es fitotóxico y su movilidad en los tejidos de la planta es mayor (Veen, 1983).

El STS se ha utilizado ampliamente en la poscosecha de flores de corte en la Sabana de Bogotá (Colombia) y en varias especies de orquídeas, debido a su eficacia para disminuir la senescencia y prolongar la vida en florero (López *et al.*, 2008). El tratamiento con STS se realiza por medio de soluciones de hidratación "tratamiento de carga" a dosis de 1 μmol de Ag^{2+} por tallo (Newman *et al*., 1998), utilizando compuestos a base de STS, como *Chrysal AVB, Floríssima 125 y Florissant* 100 (López *et al*., 2008). Es importante tener en cuenta que la eficiencia de los tratamientos a base de STS varía en función de la sensibilidad de las distintas especies al etileno exógeno y en un buen número de ellas, el tratamiento de carga no se justifica (Armitage y Laushman, 2003). La utilización de STS se ha restringido en algunos países para plantas en macetas, debido a los efectos tóxicos en el ambiente y contaminación de aguas subterráneas (Serek y Reid, 1993), además en productos alimenticios, el STS es totalmente prohibido (Chen *et al*., 2008).

1.2.9 Aminoetoxi Vinil Glicina (AVG)

El AVG es un compuesto análogo *etoxi* de rizobitoxina que inhibe la biosíntesis de etileno, debido a que bloquea la acción de la enzima ACC sintasa, mediante la unión al sustrato (fosfato de piridoxal: PLP) (Johnson y Colgan, 2003). La aplicación de AVG ha mostrado resultados favorables en la disminución de la caída de frutos y retraso de la maduración (Schupp *et al*., 2004) en frutales como manzano (Salas *et al*., 2011), durazno (Hayama *et*

al., 2008), nectarines (McGlasson *et al*., 2005) y peral (D'Aquino *et al.,* 2010), con efectos diferenciales dependiendo del cultivar (Belding y Lokaj, 2002).

La aplicación de AVG puede realizarse en precosecha (foliar y *drench*) y poscosecha (inmersión de los frutos). Las dosis para aplicaciones foliares se encuentran alrededor de 124 g ha^{-1}; 5-20 µM para aplicación en *drench* y 1 g L^{-1} para inmersión de tejidos (Saltveit, 2005). A pesar de su eficacia, éste compuesto es ineficiente cuando los productos agrícolas tienen contacto con el etileno del ambiente (Newman *et al*., 1998).

Los tratamientos precosecha y poscosecha con AVG disminuyen la producción de etileno, la respiración, el ablandamiento, la degradación de clorofilas, la pérdida de peso, en general retrasan el proceso de maduración en frutos climatéricos (Hayama *et al*., 2008) y flores de corte (Seo *et al*., 2009). Algunos estudios muestran que el AVG no afecta negativamente las características organolépticas de los frutos, sin embargo, puede alterar del desarrollo de aroma, debido a la disminución del contenido de volátiles (Salas *et al*., 2011; Romani *et al*., 1983). Además, el AVG puede disminuir algunos desórdenes fisiológicos en los frutos, como el pardeamiento enzimático en pera (D'Aquino *et al*., 2010), no obstante, otros reportes mencionan que el AVG puede agravar otros desordenes fisiológicos en frutos de manzana, como "*Core flush*" y "*Breakdown*" (Johnson y Colgan, 2003).

1.2.10 Ácido aminooxiacético (AOA)

El AOA es un compuesto inhibidor no especifico de todas las enzimas que requieren fosfato de piridoxal como coenzima, incluyendo ACC sintasa, por lo cual, disminuye la síntesis de etileno endógeno (Taiz y Zeiger, 2006), pero no impide el efecto del etileno exógeno (López *et al*., 2008). Debido a que es un inhibidor no específico, puede interferir en numerosas reacciones enzimáticas, pudiendo afectar otros procesos fisiológicos (Staby *et al*., 1993). El AOA no es tóxico para el medio ambiente, por lo cual se considera como una alternativa viable ecológicamente en la poscosecha de productos agrícolas (Cubillos *et al*., 2001).

Los efectos de la aplicación de AOA en la poscosecha de flores son dependientes de la especie (López *et al*., 2008). Shinozaki *et al*. (2011) confirmaron la inhibición de la producción de etileno mediante tratamientos con 5 mM de AOA en pétalos de Violeta. La inmersión de tallos de alstroemeria cultivar Diamond en una solución de AOA durante 3 horas estimuló mayor apertura floral (Hernández *et al*., 2006), pero Shimamura *et al*. (1997) no encontraron efecto favorable en la disminución de la senescencia de *Limonium*, incluso el AOA causó pardeamiento de los tallos e inhibió la apertura de los floretes. El AOA puede generar resultados controversiales a bajas concentraciones, sin embargo se ha reportado que el AOA es 1.000 veces menos efectivo que el AVG (Nissen, 1994).

Otro factor que afecta la eficacia del AOA es el pH de la solución de tratamiento, el cual debe estar alrededor de 3 para evitar crecimiento microbiano, además, la combinación de AOA y glucosa tienen un efecto sinérgico, aumentando la vida en florero en *Dendrobium* (Rattanawisalanon *et al*., 2003). Resultados similares fueron reportados previamente en clavel (Yakimova *et al*., 1997). En Colombia, Cubillos *et al*. (2001) concluyeron que la aplicación del producto *Florissima* 135 (ingrediente activo AOA), con un tiempo de exposición de 4 h, es la mejor alternativa para remplazar los tratamientos a base de plata. Resultados similares fueron encontrados con 10 mg L^{-1} de SR-AOA en clavel (López *et al*., 2008).

1.2.11 Permanganato de potasio ($KMnO_4$)

El $KMnO_4$ es un agente oxidante fuerte en muchas reacciones redox, cuando éste compuesto entra en contacto con el etileno, lo oxida, produciendo H_2O, CO_2, MnO_2 y KOH (Wills y Warton, 2004), lo cual disminuye los niveles de etileno en la atmósfera y por tanto afecta los procesos dependientes de etileno durante la maduración (Sammi y Masud, 2007). Se han realizado estudios con resultados favorables en frutos climatéricos, como banano (Chauhan *et al*., 2006), mango y aguacate (Illeperuma y Jayasuriya, 2002), tomate (Salamanca *et al*., 2014), manzana (Brackmann *et al*., 2006), bananito (García *et al*., 2012), papaya (Silva *et al*., 2009) y en frutos no climatéricos, como fresa (Wills y Kim, 1995).

Para que el $KMnO_4$ sea efectivo, debe ser adsorbido a un vehículo (*carrier*) para formar un absorbente sólido que aumente el área de contacto, debido a que las únicas fuerzas que actúan para que ocurra el contacto absorbente-etileno son la difusión y convección natural del aire en la atmósfera (Wills y Warton, 2004). Algunos de los *carriers* más utilizados son la zeolita, vermiculita, alúmina, perlita (Esguerra *et al*., 1978; Wills y Warton, 2004), entre otros. Los *carriers* de menor densidad y mayor área superficial presentan mayor capacidad para absorber el $KMnO_4$ y en consecuencia, mayor eficiencia en la reducción de los niveles de etileno (Kavanagh y Wade, 1987).

Existen numerosos estudios publicados sobre el uso de $KMnO_4$ en la poscosecha, no obstante, la información con respecto a la dosis y la cantidad de etileno que puede oxidar el $KMnO_4$ no es clara (Wills y Warton, 2004). Los resultados en la poscosecha con el uso de $KMnO_4$ dependen de la especie, *carrier*, empaque del producto y de las condiciones de almacenamiento (humedad relativa y temperatura) (Bal y Celik, 2010).

El $KMnO_4$ disminuye la tasa respiratoria, pérdida de peso y producción etileno en frutos de zapote (Bhutia *et al*., 2011), tomate (Sammi y Masud, 2007), papaya (Silva *et al*., 2009), sin embargo, muchas veces la tasa de emisión de etileno es superior a la tasa de oxidación (Amarante y Steffens, 2009a). Por otro lado, el $KMnO_4$ disminuye el ablandamiento e incrementa la vida poscosecha en manzana (Amarante y Steffens, 2009a), kiwi (Bal y Celik, 2010), mango (Illeperuma y Jayasuriya, 2002) y papaya (Corrêa *et al*., 2005). También se ha encontrado que el $KMnO_4$ en banano mantiene la acidez total titulable (ATT) y disminuye la tasa de incremento de los sólidos solubles totales (SST), debido a la disminución de la actividad de la enzima sacarosa fosfato sintasa (Choudhury *et al*., 2009). Además, el $KMnO_4$ disminuye la relación de madurez (SST/ATT) en manzana (Amarante y Steffens, 2009b), bananito (García *et al*., 2012), entre otros.

1.2.12 Conclusiones

Con base en el conocimiento que se tiene en la fisiología del etileno en la poscosecha, se han desarrollado una serie de métodos para prevenir el deterioro de los productos agrícolas. Lo anterior se ha logrado mediante la inhibición de la biosíntesis, acción

(percepción y señalización) y eliminación del etileno del ambiente. Los compuestos AVG y AOA inhiben la enzima ACC sintasa y disminuye la producción de etileno, sin embargo, no pueden prevenir el efecto del etileno presente en el ambiente. Las sales de plata afectan la acción del etileno por unirse a los receptores, no obstante, presentan serias limitaciones debido a su toxicidad para el ambiente. El 1-MCP también se une a los receptores, siendo uno de los inhibidores de la acción de etileno más estudiados y con mayor potencial en la poscosecha, debido a su alta eficacia en disminuir la maduración y senescencia. El permanganato de potasio es un oxidante del etileno, con resultados favorables para mejorar la poscosecha de productos agrícolas.

Agradecimientos

Los autores expresamos nuestros más sinceros agradecimientos al Ing. Agr., M.Sc. Fredy Alexander Salamanca Gutiérrez (qepd), quién en vida contribuyó significativamente al manejo poscosecha de productos agrícolas en Colombia. Fredy paz en tu tumba, permanecerás por siempre en nuestra memoria.

1.2.13 Referencias bibliográficas

Adams-Phillips, L., C. Barry y J. Giovannoni. 2004. Signal transduction systems regulating fruit ripening. Trends Plant. Sci. 9(7), 331-338.

Amarante, C y C. Steffens. 2009a. O tratamento pré-colheita com AVG, aliado à absorção do etileno durante oarmazenamento refrigerado, preserva a qualidade de maçãs ‘gala, Rev. Bras. Frutic. 31(2), 334-342.

Amarante, C. V. y C.A. Steffens. 2009b. Sachês absorvedores de etileno na pós-colheita de maçãs 'Royal Gala'. Rev. Bras. Frutic. 31(1), 71-77.

Armitage, A. y J. Laushman. 2003. Specialty cut flowers. Timber Press, Portland, OR.

Arora, A. 2008. Biochemistry of flower senescence. pp. 51-85. En: Paliyath, G., D. Murr., A. Handa y S. Lurie (eds.). Postharvest biology and technology of fruits, vegetables, and flowers. Wiley-Blackwell Publishing, New Delhi, India.

Bal, E. y S. Celik. 2010. The effects of postharvest treatments of salicylic acid and potassium permanganate on the storage of kiwifruit. Bulg. J. Agric. Sci. 16(5), 576-584.

Balogh, A., T. Koncz, V. Tisza, E. Kiss y L. Heszky. 2005. The effect of 1-MCP on the expression of several ripening-related genes in strawberries. HortScience 40(20), 88-90.

Bapat, V. A., P.K. Trivedi, A. Ghosh, V. A. Sane, T. R. Ganapathi y P. Nath. 2010. Ripening of fleshy fruit: Molecular insight and the role of ethylene. Biotechnol. Adv. 28, 94-107.

Barry, C y J. Giovannoni. 2007. Ethylene and fruit ripening. J. Plant. Growth. Regul. 26, 143-159.

Belding, R. y G. Lokaj. 2002. Aminoethoxyvinylglycine treatment of peach fruit reduces ethylene production and softening. HortScience 37, 1065-1068.

Bhutia, W., R. Pal, S. Sen y S. Jha. 2011. Response of different maturity stages of sapota (*Manilkara achras*) cv. Kallipatti to in-package ethylene absorbent. J. Food Sci. Technol, 48(6), 763-768.

Binder, B. 2008. The ethylene receptors: complex perception for a simple gas. Plant Sci. 175, 8-17.

Blankenship, S. y J. Dole. 2003. 1-Methylcyclopropene: a review. Postharv. Biol. Technol. 28, 1-25.

Boquete, E., G. Trinchero, A. Fraschina, F. Vilella y G. Sozzli. 2004. Ripening of ‘Hayward’ kiwifruit treated with 1-methylcyclopropene after cold storage. Postharv. Biol Technol. 32, 57-65.

Bouzayen, M., A. Latché. P. Nath y J. Pech. 2010. Mechanism of Fruit Ripening. pp. 319-339. En: Pua, E. y M. Davey (eds.). Plant developmental biology–biotechnological perspectives. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Alemania.

Brackmann, A., R. Giehl, S. Freitas, A. Eisermann y A. Mello. 2006. Uso de filmes de polietileno e absorção de etileno para o transporte refrigerado de maçã ‘Gala’. Semina: Ciências Agrárias 27(3), 423-428.

Cameron, A. y M. Reid. 2001. 1-MCP blocks ethylene-induced petal abscission of *Pelargonium peltatum* but the effect is transient. Postharv. Biol. Technol. 22, 169-177.

Cerqueira, T., A. Jacomino, F. Sasaki y L. Amorim. 2009. Controle do amadurecimento de goiabas 'kumagai' tratadas com 1-metilciclopropeno. Rev. Bras. Frutic. 31(3), 687-692.

Chauhan, O., P. Raju, D. Dasgupta y A. Bawa. 2006. Modified atmosphere packaging of banana (cv. Pachbale) with ethylene, carbon dioxide and moisture scrubbers and effect on its ripening behaviour. Amer. J. Food Technol. 1(2), 179-189.

Chen, Y., L. Chen y J. Shaw. 2008. Senescence-associated genes in harvest broccoli florets. Plant Sci. 175,137-144.

Chen, Y., N. Etheridge y E. Schaler. 2005. Ethylene signal transduction. Ann. Bot. 95, 901–915.

Cheng, Y., Y. Dong, H. Yan, W. Ge, C. Shen, J. Guan, L. Liu y Y. Zhang. 2012. Effects of 1-MCP on chlorophyll degradation pathway-associated genes expression and chloroplast ultrastructure during the peel yellowing of Chinese pear fruits in storage. Food Chem. 135(2), 415-422.

Choi, S., P. Tsouvaltzis, C. Lim y D.J. Hubert. 2008. Suppression of ripening and induction of asynchronous ripening in tomato and avocado fruits subjected to complete or partial exposure to aqueous solutions of 1-methylcyclopropene. Postharv. Biol. Technol. 48, 206-214.

Choudhury, S., S. Roy y D. Sengupta. 2009. A comparative study of cultivar differences in sucrose phosphate synthase gene expression and sucrose formation during banana fruit ripening. Postharv. Biol. Technol. 54, 15-24.

Corrêa, S., M. Filho, M. Silva. J, Oliveira. E, Aroucha. R, Silva. M, Pereira y H, Vargas. 2005. Effect of the potassium permanganate during papaya fruit ripening: Ethylene production. J. Phys. IV France 125,869-871.

Cubillos, E., V. Molina, V.J. Flórez y G. Fischer. 2001. Efecto inhibidor de etileno en la longevidad floral del clavel (*Dianthus caryophyllus*) como probables sustitutos del tiosulfato de plata (STS). Agron. Colomb. 18, 7-13.

Czarny, J., V. Grichko y B. Glick. 2006. Genetic modulation of ethylene biosynthesis and signaling in plants. Biotechnol. Adv. 24, 410-419.

D'Aquino, S., M. Schirra, M. Molinu, M. Tedde y A. Palma. 2010. Preharvest aminoethoxyvinylglycine treatments reduce internal browning and prolong the shelf-life of early ripening pears. Sci. Hortic. 125, 353-360.

Deaquiz, Y., J. Álvarez-Herrera y G. Fischer. 2014. Ethylene and 1-MCP affect the postharvest behavior of yellow pitahaya fruits (*Selenicereus megalanthus* Haw.). Agron. Colomb. 32(1), 44-51.

Defilippi, B, A. Kader y A. Dandekar. 2005. Apple aroma: alcohol acyltransferase, a rate limiting step for ester biosynthesis, is regulated by ethylene. Plant Sci. 168,199-210.

Dou H, S. Jones y M. Ritenour. 2005. Influence of 1-MCP application and concentration on post-harvest peel disorders and incidence of decay in citrus fruit. J Horti. Sci. 80(7), 86-92.

Dussan, S., L. Serna y A. Perenguez. 2011. Efecto de la aplicación de 1-Metilciclopropeno sobre algunas propiedades físico-químicas y organolépticas del fruto de la granadilla. Acta Agron. 60(3), 237-244.

El-Sharkawy, I., D. Manriquez, F. Flores, F. Regad, M. Bouzayen y A. Latche. 2005. Functional characterization of a melon alcohol acyl-transferase gene family involved in the biosynthesis of ester volatiles. Identification of the crucial role of a threonine residue for enzyme activity. Plant. Mol. Biol. 59, 345-62.

Esguerra, E., D. Mendoza y E. Pantastico. 1978. Regulation of fruit ripening. II. Use of perlite-$KMnO_4$ as an ethylene absorbent. Phillipine J. Sci. 107, 23-31.

Gang, M., W. Ran., W. Cheng-Rong, K. Masaya, Y. Kazuki, Q. Fei-fei y X. Hui-Lian. 2009. Effect of 1-methylcyclopropene on expression of genes for ethylene biosynthesis enzymes and ethylene receptors in post-harvest broccoli. Plant. Growth. Regul. 57, 223-232.

García, J., H. Balaguera-López y A. Herrera. 2012. Conservación del fruto de banano bocadillo (*Musa* AA Simmonds) con la aplicación de permanganato de potasio ($KMnO_4$). Rev. Colomb. Cienc. Hortic. 6(2), 161-171.

Golding, J., D. Shearer. S. Wyllie y W. McGlasson. 1999. Application of 1-MCP and propylene to identify ethylene-dependent ripening processes in mature banana fruit. Postharv. Biol. Technol. 14, 87-98.

Hayama, H., M. Tatsuki y Y. Nakamura. 2008. Combined treatment of aminoethoxyvinylglycine (AVG) and 1-methylcyclopropene (1-MCP) reduces melting-flesh peach fruit softening. Postharv. Biol. Technol. 50, 228-230.

Hernández, A.D., J.M. Pinedo, M.T. Colinas, J. Meza y S. Juárez. 2006. Conservación de flores de alstroemeria (*Alstroemeria* spp.) mediante soluciones preservativas en poscosecha, Revista Chapingo. Serie horticultura, 12(1), 19-25.

Hubert, D. 2008. Suppression of ethylene responses through application of 1-methylcyclopropene: a powerful tool for elucidating ripening and senescence mechanisms in climacteric and nonclimacteric fruits and vegetables. HortScience 43(1), 106-111.

Illeperuma, C. y P. Jayasuriya. 2002. Prolonged storage of 'Karuthacolomban' mango by modified atmosphere packaging at low temperature. J. Hort. Sci. Biotechnol. 77(2), 153-157.

In, B.C., J. Strablea, B.M. Binder, T.G. Falbel y S.E. Patterson. 2013. Morphological and molecular characterization of ethylene binding inhibition in carnations. Postharv. Biol. Technol. 86, 272–279.

Itai, A. y T. Tanahashi. 2008. Inhibition of sucrose loss during cold storage in Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai) by 1-MCP. Postharv. Biol. Technol. 48, 355-363.

Jeong, J. y D. Hubert. 2004. Suppression of avocado (*Persea Americana* Mill.) fruit softening and changes in cell wall matrix polysaccharides and enzyme activities: differential responses to 1-MCP and delayed ethylene application. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 129,752-759.

Jiang, Y. y J. Fu. 2000. Ethylene regulation of fruit ripening: Molecular aspects. Plant. Growth. Regul. 30,193-200.

Jiang,W.B., Q. Sheng, Y.M. Jiang y X.J. Zhou. 2004. Effects of 1-methylcyclopropene and gibberellic acid on ripening of Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* M.) in relation to quality. J. Sci. Food Agric. 84, 31–5.

Johnson, D. y R. Colgan. 2003. Low ethylene controlled atmosphere induces adverse effects on the quality of 'Cox's Orange Pippin' apples treated with aminoethoxyvinylglycine during fruit development. Postharv. Biol. Technol. 27, 59-68.

Kavanagh, E. y N. Wade. 1987. Role of the carrier in the removal of ethylene by permanganate from storage atmospheres. ASEAN Food J. 3, 128-134.

Kesari, R., P. Trivedi y P. Nath. 2007. Ethylene-induced ripening in banana evokes expression of defense and stress related genes in fruit tissue. Postharv. Biol. Technol. 46, 136-143.

Khan, A. y Z. Singh. 2007. 1-MCP regulates ethylene biosynthesis and fruit softening during ripening of "Tegan Blue" plum. Postharv. Biol. Technol. 43, 298-306.

Klee, H y J. Giovannoni. 2011. Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes. Annu. Rev. Genet. 45, 41-59.

Knee M. 1995. Copper reverses silver inhibition of flower senescence in Petunia hybrida. Postharv. Biol. Technol. 6,121-8.

Kofranek, A. y J. Paul. 1975. The value of impregnating cut stems with high concentrations of silver nitrate. Acta Hort. 41,199-206.

Kondo, S., S. Setha, D. Rudell, D. Buchanan y J. Mattheis. 2005. Aroma volatile biosynthesis in apples affected by 1-MCP and methyl jasmonate. Postharv. Biol. Technol. 36, 61-68.

Li, C., W. Shen, W. Lu. Y. Jiang. J. Xie y J. Chen. 2009. 1-MCP delayed softening and affected expression of *XET* and *EXP* genes in harvested cherimoya fruit. Postharv. Biol. Technol. 52, 254-259.

Lohani, S., P. Trivedi y P. Nath. 2004. Changes in activities of cell wall hydrolases during ethylene-induced ripening in banana: effect of 1-MCP, ABA and IAA. Postharv. Biol. Technol. 31, 119-26.

López, P., D. Neisa, C. Bacca y V. Flórez. 2008. Evaluación de preservantes florales en la poscosecha de tres variedades de clavel estándar. Agron. Colomb. 26(1), 116-126.

Ma, G., R. Wang, C. Wang, M. Kato, K. Yamawaki, F. Qin y H. Xu. 2009. Effect of 1-methylcyclopropene on expression of genes for ethylene biosynthesis enzymes and ethylene receptors in post-harvest broccoli. Plant Growth. Regul. 57, 223-232.

Mainardi, J., E. Purgatto, A.Jr. Vieira, W.A. Bastos, B.R. Cordenunsi, J.R. Oliveira y F.M. Lajolo. 2006. Effects of ethylene and 1-methylcyclopropene (1-MCP) on gene expression and activity profile of α-1,4-glucan-phosphorylase during banana ripening. J. Agric. Food Chem. 54(19), 7294-7299.

Mattheis, J., X. Fan y L. Argenta. 2005. Interactive responses of Gala apple fruit volatile production to controlled atmosphere storage and chemical inhibition of ethylene action. J. Agric. Food. Chem. 53, 1-6.

McGlasson, W., A. Rath y L. Legendre. 2005. Preharvest application of aminoethoxyvinylglycine (AVG) modifies harvest maturity and cool storage life of 'Arctic Snow' nectarines, Postharv. Biol. Technol. 36, 93-102.

Newman. J., L. Dodge y M. Reid. 1998. Evaluation of ethylene inhibitors for postharvest treatment of *Gypsophila paniculata*. Hortechnol. 8(1), 58-63.

Newman. J., L. Dodge y M. Reid. 1998. Evaluation of ethylene inhibitors for postharvest treatment of *Gypsophila paniculata* L. Hortechnology, 8(1), 58-63.

Nilsson T. 2005. Effects of ethylene and 1-MCP on ripening and senescence of European seedless cucumbers. Postharv. Biol. Technol. 36,113-25.

Nissen, P. 1994. Stimulation of somatic embryogenesis in carrot by ethylene biosynthesis and action. Physiol. Plant. 92, 397-403.

Owino, W., R. Nakano, Y. Kubo y A. Inaba. 2002. Diferencial regulation of genes encoding ethylene biosynthesis enzymes and ethylene response sensor ortholog during ripening and response to wounding avocados. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 127(4), 520-527.

Rattanawisalanon, C., S. Ketsa y W. Van Doorn. 2003. Effect of aminooxyacetic acid and sugars on the vase life of *Dendrobium* flowers. Postharv. Biol. Technol. 29, 93-100.

Romani, R., J. Labavith, T. Yamashita, B. Hess y H. Rae. 1983. Preharvest AVG treatment of 'Bartlett' pear fruits: effects on ripening, color change, and volatiles. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 108, 1046-1049.

Salamanca, F., H.E. Balaguera y A.O. Herrera. 2014. Efecto del permanganato de potasio sobre algunas características poscosecha de frutos de tomate "chonto" (*Solanum lycopersicum* L.). Acta Hort. 1016, 171-176.

Salas, N., F. Molina-Corral, G. González-Aguilar, A. Otero, D. Sepulveda y G. Olivas. 2011. Volatile production by 'Golden Delicious' apples is affected by preharvest application of aminoethoxyvinylglycine, Sci. Hort. 130, 436-444.

Saltveit, M. 2005. Aminoethoxyvinylglycine (AVG) reduces ethylene and protein biosynthesis in excised discs of mature-green tomato pericarp tissue, Postharv. Biol. Technol. 35,183-190.

Sammi, S. y T. Masud. 2007. Effect of different packaging systems on storage life and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* var. Rio Grande) during different ripening stages. J. Food Safety 9, 37-44.

Sang-Dong, Y., C. Younghee y S. Jen. 2009. Emerging connections in the ethylene signaling network. Trends Plant. Sci. 14(5), 270-279.

Schupp, J.R. y D.W. Greene, 2004. Effect of Aminoethoxyvinylglycine (AVG) on Preharvest Drop, Fruit Quality, and Maturation of `McIntosh' Apples. I. Concentration and Timing of Dilute Applications of AVG HortScience 5, 1030-1035.

Seo, S., S. Kang, I. Shim, W. Kim y S. Fujihara. 2009. Effects of various chemical agents and early ethylene production on floral senescence of *Hibiscus syriacus*. Plant Growth Regul. 57, 251-258.

Serek, M. y M. Reid. 1993. Anti-ethylene treatments for potted flowering plants-Relative efficacy of inhibitors of ethylene action and biosynthesis. HortScience 28, 1180-1181.

Serek, M., E.J. Woltering, E.C. Sisler, S. Frello y S. Sriskandarajah. 2006. Controlling ethylene responses in flowers at the receptor level. Biotechnol. Adv. 24, 368-381.

Shimamura, M., A. Ito, K. Suto, H. Okabayashi y K. Ichimura. 1997. Effects of α-aminoisobutyric acid and sucrose on the base life of hybrid *Limonium*. Postharv. Biol. Technol. 12, 247-253.

Shinozaki, Y., T. Tanabata, I. Ogiwara, T. Yamada y M. Kanekatsu. 2011. Application of digital image analysis system for fine evaluation of varietal differences and the role of ethylene in visible petal senescence of morning glory. J. Plant Growth Regul. 30, 229-234.

Silva, D., L.C.C. Salomão, D.L. Siqueira, P.R. Cecon y A. Rocha. 2009. Potassium permanganate effects in postharvest conservation of the papaya cultivar Sunrise Golden. Pesq. Agropec. Bras. 44(7), 669-675.

Singh, S. y R. Pal. 2008. Response of climacteric-type guava (*Psidium guajava* L.) to postharvest treatment with 1-MCP. Postharv. Biol. Technol. 47(3), 307-314.

Sisler, E y M. Serek. 1997 Inhibitors of ethylene responses in plants at the receptor level: Recent developments. Physiol. Plant. 100, 577-582.

Staby, G., R. Basel, M. Reld y L. Dodge, L. 1993. Efficacy of commercial anti-ethylene products for fresh cut flowers. HortTechnol. 3, 199-202.

Stepanova, A. y J. Alonso. 2009. Ethylene signaling and response: where different regulatory modules meet. Curr. Opin. Plant. Biol. 12,548–555.

Sun, B., H. Yan, N. Liu, J. Wei y Q. Wang. 2012. Effect of 1-MCP treatment on postharvest quality characters, antioxidants and glucosinolates of chinese kale. Food Chem. 131(2), 519-526.

Taiz, L. y E. Zeiger. 2006. Plant physiology, 4a ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA.

Trivedi, P. y P. Nath. 2004. An ethylene-induced expansin from ripening banana fruit. Plant Sci. 167, 1-8.

Varanasi, V., S. Shin. F. Johnson. J. Mattheis y Y. Zhu. 2013. Differential suppression of ethylene biosynthesis and receptor genes in 'Golden Delicious' apple by preharvest and postharvest 1-MCP treatments. J. Plant. Growth. Regul. 32, 585-595.

Veen H. 1983. Silver thiosulphate: an experimental tool in plant science. Sci. Hortic. 20, 211-24.

Villalobos, M., W. Biasi, E. Mitcham y D. Holcroft. 2011. Fruit temperature and ethylene modulate 1-MCP response in Bartlee pears. Postharv. Biol. Technol. 60, 17-23.

Watkins, C. 2006. The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables, Biotechnol. Adv. 24, 389-409.

Wills, R. y G. Kim. 1995. Effect of ethylene on postharvest life of strawberries. Postharv. Biol. Technol. 6, 249-255.

Wills, R. y M. Warton. 2004. Efficacy of potassium permanganate impregnated into alumina beads to reduce atmospheric ethylene. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 129(3), 433-438.

Yakimova, E., B. Atanassova y V. Kapchina-Toteva, 1997. Longevity and some metabolic events in post-harvest Spraycarnation flowers. Bulg. J. Plant Physiol. 23, 57-65.

Yang, X., J. Song, L. Campbell-Palmer, S. Fillmore y Z. Zhang. 2013. Effect of ethylene and 1-MCP on expression of genes involved in ethylene biosynthesis and perception during ripening of apple fruit. Postharv. Biol. Technol. 78, 55-66.

Yuan, G., B. Sun, J. Yuan y M. Wang. 2010. Effect of 1-methylcyclopropene on shelf life, visual quality, antioxidant enzymes and health-promoting compounds in broccoli florets. Food Chem. 118, 774-781.

Zhang, L., L. Jiang, Y. Shi, H. Luo, R. Kang y Z. Yu. 2012. Post-harvest 1-methylcyclopropene and ethephon treatments differently modify protein profiles of peach fruit during ripening. Food. Res. Int. 48, 609-619.

Zhang, Z., D.J. Huber, B.M. Hurr y J. Rao. 2009. Delay of tomato fruit ripening in response to 1-methylcyclopropene is influenced by internal ethylene levels. Postharvest Biol. Technol. 54, 1-8.

1.3 Refrigeración como tecnología poscosecha

La temperatura es el factor ambiental que más influye en la velocidad de deterioro de los productos agrícolas cosechados (Kader, 2002). Por tanto, el almacenamiento en frío es la técnica más ampliamente utilizada para la conservación de frutas y hortalizas. Esta técnica se basa generalmente en la aplicación de ciertas temperaturas constantes a los frutos a conservar, siempre por encima del punto crítico para poder mantener sus cualidades organolépticas, nutritivas, etc; durante un período de tiempo, que dependerá del genotipo y grado de madurez de que se trate. La conservación refrigerada bajo condiciones óptimas permite reducir las pérdidas cualitativas y cuantitativas debidas a desórdenes fisiológicos y enfermedades, retrasar la maduración y senescencia y prolongar la vida comercial de los productos hortofrutícolas en general, con calidad idónea para consumo en fresco o industrial (Paull, 1999; Martínez-Jávega, 1997). También la refrigeración persigue entre otros fines, el uso de tratamientos cuarentenarios para el control de insectos en frutos exportados a determinados países que lo exigen, como Estados Unidos y Japón (Martínez-Jávega, 1997). Al respecto, Alvarado et al. (2004) sometieron frutos de uchuva a cuarentena de 16 días a 1,5°C para control de mosca de la fruta, los resultados mostraron que los frutos prolongaron su vida útil en poscosecha, debido a que durante el tratamiento de frío, los frutos poseen una actividad metabólica muy baja, lo cual retarda notablemente los procesos normales que implican un avance en madurez.

1.3.1 Efecto de la refrigeración sobre características poscosecha

El manejo de la temperatura es el factor ambiental más importante que se utiliza para mantener la calidad de los productos hortícolas frescos después de la cosecha, las bajas temperaturas reducen las tasas de respiración y producción de etileno, la pérdida de agua, el crecimiento de patógenos, y la incidencia de enfermedades (Kader, 2002; Thompson et al., 2002).

La respiración es el principal proceso de deterioro de los frutos, el mismo es atenuado por las bajas temperaturas, que logran disminuir la tasa respiratoria y la pérdida excesiva de agua, así como la velocidad de las reacciones bioquímicas y enzimáticas. La velocidad de respiración de un fruto se reduce a la mitad por cada 10ºC en que disminuye la temperatura (Guerra, 1996). En la poscosecha, los frutos evolucionan hacia la senescencia con pérdidas de calidad, ablandamiento, pérdida de acidez, vitamina C y características organolépticas (sabor y comestibilidad). La velocidad de reacción de los procesos metabólicos, que llevan a la pérdida de calidad se duplica por cada 10ºC de aumento de la temperatura y en el rango de 0 a 10ºC puede llegar incluso a sextuplicarse (Martínez- Jávega, 1997).

Rugkong et al. (2011) encontraron que la expresión de PG, PME1 y Le EXP1 se redujo en refrigeración y Cel1 no se afectó. También se reporta que los niveles de proteínas asociados con la maduración del fruto de tomate después de la refrigeración generalmente disminuyen, mientras que las proteínas relacionadas con el estrés aumentan (Page et al., 2010; Vega-García et al., 2010). Rugkong et al. (2011) almacenaron frutos de tomate a 3 °C por 0, 1, 2 y 4 semanas, luego los frutos fueron dejados a 20°C por dos semanas, los resultados indicaron que la refrigeración redujo la producción de etileno, el cambio de color y la pérdida de firmeza, así como la expresión relativa de genes involucrados en la ruta de biosíntesis y en los receptores de etileno como ACS2, ACS4, ACO1, ACO6, LeETR1, *NR* (LeETR3), *LeETR4*, y *LeCTR1*. Los genes implicados en la ruta de biosíntesis de carotenoides *PSY1* (fitoeno sintasa), *CRTISO* (carotenoide isomerasa), *GGPPS2* (geranilgeranil pirofosfato sintasa 2), *DXS* (xilulosa 5-fosfato sintasa), y los genes relacionados con degradación de la pared celular PG (poligalacturonasa), PE1 (pectin metilesterasa 1), TBG4 (β-galactosidasa 4), LeExp1 (expansina1), y XTH5

(xiloglucano endotransglucosilasa/hidrolasa 5) también tuvieron menor expresión relativa a bajas temperaturas. Resultados que indican que la refrigeración retrasa la maduración en los frutos de tomate el inhibir la expresión de genes relacionados con este proceso. Asimismo, Javanmardi y Kubota (2006) encontraron que tomates almacenados a 5°C disminuyeron la síntesis de licopeno y la pérdida de peso y tuvieron mayor actividad antioxidante.

Resultados favorables de la refrigeración también se reportan en frutos de pera "japonesa" (*Pyrus pyrifolia* Nakai), donde el almacenamiento a 5°C aumentó 3 veces la vida poscosecha, retardó la pérdida de firmeza y el cambio de color, adicionalmente generó una acumulación de hexosas y una disminución de sacarosa por una mayor actividad de la invertasa ácida soluble (*PpAIV1*) e inactividad de la (Itai y Tanahashi, 2008). En frutos de carambolo (*Averrhoa carambola* L. cv. B10), la refrigeración a 5°C y 10°C fue favorable para disminuir la maduración, pues retardó los cambios en el color y en la pérdida de firmeza y disminuyo la pérdida de peso, sin embargo, a 5°C se presentó 100% de daños por frío a los 15 días de almacenamiento, mientras que con 10°C los daños por frío solo se presentaron después de los 20 días de almacenamiento, además, 10°C respecto al testigo (28°C) redujo la actividad β-galactosidasa y pectinesterasa (Ali et al., 2004).

La aplicación del frío disminuye los riesgos de aparición y desarrollo de ciertos agentes causantes de alteraciones como bacterias, hongos y levaduras. Aunque es importante señalar que puede disminuir la acción de los microorganismos, pero no inhibe la germinación de esporas de los patógenos que contaminan a las frutas. La germinación de esporas y la velocidad de crecimiento de patógenos generalmente están influenciados por la temperatura; por ejemplo, enfriando los productos por debajo de 5°C inmediatamente después de la cosecha, se reduce notablemente la incidencia de la pudrición por *Rhizopus* (Kader, 2002).

García et al. (2014) mencionan el efecto positivo del cáliz y la refrigeración sobre la reducción de los procesos de maduración en frutos de uchuva. En esta especie se han realizado estudios de almacenamiento a temperaturas de 12°C (Novoa et al., 2006), 7°C

(Lanchero et al., 2007) y 1,5°C (Alvarado et al., 2004), los autores resaltan la importancia de la refrigeración para la conservación poscosecha de esta especie. García et al. (2014) afirman que para mercados distantes como los de exportación es recomendable mantener la uchuva refrigerada y no romper la cadena del frio, dado que esto puede ocasionar condensación en los empaques y favorecer el desarrollo de hongos. Para esto los carros y contenedores deben ser enfriados previamente hasta 4°C por debajo de la temperatura de almacenamiento de la fruta, para que al ser cargados la uchuva alcance rápidamente la temperatura requerida y no se rompa la cadena de frio. En el mercado nacional el tiempo empleado desde la recolección hasta la exhibición en góndola no es muy prolongado, generalmente menos de 48 horas, por lo cual los tiempos de almacenamiento son muy cortos, y como se ha demostrado la uchuva con cáliz deshidratado se mantiene muy bien a temperatura ambiente (21°C), por lo que el uso de bajas temperaturas de almacenamiento no son necesarias. Además los vehículos utilizados para la comercialización a nivel nacional no son refrigerados por lo cual no sería apropiado mantener la uchuva refrigerada y luego romper la cadena de frio, pues esto podría acelerar los procesos de deterioro de la fruta (García et al., 2014).

Otro aspecto importante relacionado con la refrigeración, es el periodo de vida en anaquel o shelf-life, debido a que los frutos en la mayoría de los casos después de refrigerados deben ser sacados a temperatura ambiente para ser comercializados. Por tanto, la calidad de la fruta puede disminuir gradualmente durante el almacenamiento a baja temperatura y luego se puede disminuir rápidamente cuando las frutas se retiran posteriormente a las condiciones de vida de anaquel a temperatura ambiente (Jiang et al., 2003). Razón por la cual, los estudios de conservación de frutos a bajas temperaturas en lo posible deben complementarse con estudios de vida en anaquel, los cuales comprenden periodos que pueden estar entre 4 a 14 días, generalmente.

1.3.2 Daños por frío

El uso de frío durante el periodo poscosecha mantiene la calidad de frutos tropicales por más tiempo, pues disminuye el metabolismo y prolonga la vida de anaquel. Aunque, las temperaturas bajas retardan la senescencia, se ha encontrado que los frutos de algunas

especies con origen tropical y subtropical son notablemente sensibles al frío, por lo que la temperatura de almacenamiento puede causar daños, deteriorar el tejido y disminuir el valor comercial (Alia-Tejacal et al., 2000; Wismer, 2003). Algunos de los productos de origen tropical y subtropical, presentan sensibilidad a las bajas temperaturas que se manifiesta por diferentes alteraciones y manchas en la piel, conocidas generalmente como lesión o daño por frío y que pueden causar una alta pérdida de calidad comercial (Martínez- Jávega, 1997). Las respuestas propuestas como posibles causas primarias de daños por frío son: incremento en la concentración de calcio en el citosol, variación conformacional de las enzimas, cambios estructurales a nivel celular, transición en los lípidos de las membranas. Si las condiciones de frío se mantienen, estas respuestas primarias dan lugar a respuestas secundarias como: aumento de la producción de etileno, cambios en la actividad respiratoria, pérdida de agua, aumento de la permeabilidad, emisión de aceites esenciales, volátiles, producción de enzimas implicadas en el metabolismo de los fenoles (Come, 1998).

Los síntomas comunes incluyen la alteración en la tasa respiratoria, pobre desarrollo del color, ablandamiento reducido de los tejidos, pardeamientos internos y externos y susceptibilidad a las enfermedades (Hobson, 1987; Cheng y Shewfelt, 1988). En tomate (*Solanum lycopersicum* L.), los frutos son susceptibles a los daños por frío a temperaturas por debajo de 12,5°C (Rugkong et al., 2011). Por otra parte, Tietel et al. (2012) mencionan que las temperaturas bajas de almacenamiento tienen gran influencia en el sabor del fruto, y que se pueden presentar disminuciones en la aceptabilidad sensorial después de almacenamiento refrigerado antes de que cualquier síntoma de daño por frío se haga visible. Por lo tanto, los efectos perjudiciales de la refrigeración en el "flavor-life" preceden a los de calidad externa y "shelf-life" (Baldwin et al., 2007; Kader, 2008). En frutos de tomate se reporta que por debajo de 12,5°C se afecta negativamente el sabor (Maul et al., 2000). En cítricos se reportó recientemente que mandarinas “W. Murcott” almacenadas a 8°C tuvieron ligeramente mejor sabor que aquellas que fueron almacenadas a 0 o 4°C, lo cual se atribuyó principalmente a relaciones SST/ATT muy altas, más que a cambios en el aroma (Obenland et al., 2011).

Las temperaturas seguras mínimas recomendadas para el almacenamiento poscosecha de mandarinas están de entre 5 y 8°C (Kader y Arpaia, 2002; Burns, 2004). Sin embargo, frutos de las diferentes especies de cítricos y cultivares son sensibles al desarrollo de muchos de los síntomas de daño por frío cuando se almacenan a temperaturas inferiores a 10°C (Lafuente y Zacarías, 2006). Mientras que los frutos de uchuva cosechados resisten temperaturas tan bajas como 1,5°C (Alvarado et al., 2004).

Una fase transición de los lípidos se ha propuesto como el evento molecular primario resultante en el desarrollo de los síntomas de daño por frío. Una mayor proporción de ácidos grasos insaturados en los lípidos generalmente conduce a una menor incidencia de daño por frío (Marangoni et al., 1996; Cao et al., 2011). De otra parte, las membranas pueden perder la integridad como resultado de la peroxidación causada por el exceso de especies reactivas de oxigeno (ROS). Las plantas se pueden proteger contra el efecto dañino de las ROS mediante compuestos antioxidantes como ácido ascórbico y glutatión, y enzimas como la superóxido dismutasa, catalasa, ascorbato peroxidasa, glutatión peroxidasa, monodehidroascorbato reductasa, dehidroascorbato reductasa y glutatión reductasa (Mittler, 2002). La reducción de los daños por frío en frutos cosechados puede estar relacionada con su capacidad para reducir y/o limpiar ROS a través de aumento de las actividades de las enzimas antioxidantes, como se ha reportado en frutos de mandarina, zucchini y loquat (Sala, 1998; Zheng et al., 2008; Cao et al., 2011).

1.3.3 Bibliografía

Ali, Z., L. Chin, M. Marimuthu, H. Lazan. 2004. Low temperature storage and modified atmosphere packaging of carambola fruit and their effects on ripening related texture changes, wall modification and chilling injury symptoms, Postharvest Biology and Technology 33, 181-192.

Alvarado, P.; Berdugo, C. A. y Fischer, G. Efecto de un tratamiento de frío (a 1,5° C) y la humedad relativa sobre las características físico-químicas de frutos de uchuva *Physalis peruviana* L. durante el posterior transporte y almacenamiento Agronomía Colombiana, 2004. Vol. 22, No. 2, p. 147-159.

Baldwin, E.A., Plotto, A., Goodner, K., 2007. Shelf-life versus flavour life for fruits and vegetables: how to evaluate this complex trait. Stewart Postharvest Rev. 1, 3.

Burns, J.K., 2004. Mandarin (Tangerine). In: Gross, K.C., Wang, C.Y., Saltveit, M. (Eds.), The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks. USDA Agricultural Handbook Number 66.

Cao, S., Z. Yang, Y. Cai y Z. Yonghua. 2011. Fatty acid composition and antioxidant system in relation to susceptibility of loquat fruit to chilling injury. Food Chemistry 127, 1777–1783.

Cheng, T.S., Shewfelt, R.L., 1988. Effect of chilling exposure of tomatoes during subsequent ripening. J. Food Sci. 53, 1160–1162.

Come, D. 1998. Cellular and metabolic effects of cold on fruits and vegetable. Procc. of Madrid 98- Cost 915. Conference Physiological and Technological aspects of gaseous and thermal treatments of fresh fruits and vegetable.

García, M.C., A. Peña y B. Brito. 2014. Desarrollo tecnológico para el fortalecimiento del manejo poscosecha de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). pp. 80-111. En: Carvalho, C.P. y D.A. Moreno (eds.). *Physalis peruviana*: fruta andina para el mundo. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo-CYTED, Limencop SL, Alicante, España.

Guerra, F. 1996. Tecnología post-cosecha de frutos cítricos. Curso integral de citricultura. Instituto de Investigaciones de Fruticultura Tropical. p:242-257.

Hobson, G.E., 1987. Low-temperature injury and the storage of ripening tomatoes. J. hortic. Sci. 62, 55–62.

Itai, A. y T. Tanahashi. 2008. Inhibition of sucrose loss during cold storage in Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai) by 1-MCP. Postharvest Biology and Technology 48, 355–363.

Javanmardi, J. y C. Kubota. 2006. Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest storage, Postharvest Biology and Technology 41,151–155.

Jiang, Y.M., Li, Y.B., Li, J.R., 2003. Effects of low temperature acclimation on browning of litchi fruit in relation to shelf life. J. Hortic. Sci. Biotechnol. 78, 437–440.

Kader, A.A. Postharvest technology of horticultural crops, University of California (System). Division of Agriculture and Natural Resources. Third edition. ANR Publications, 2002. 535 p.

Kader, A.A., 2008. Flavor quality of fruits and vegetables. J. Sci. Food Agric. 88, 1863–1868.

Kader, A.A., Arpaia, M.L., 2002. Postharvest handling systems: subtropical fruits. In: Kader, A.A. (Ed.), Postharvest Technology of Horticultural Crops; Third edition, publication number 3311. Regents of the University of California, Division of Agricultural and Natural Resources, Oakland, CA, pp. 375–384.

Lafuente, M.T., Zacarías, L., 2006. Postharvest physiological disorder in citrus fruit. Stewart Postharvest Review 2, 1–9.

Lancheros O., G. Velandia, G. Fischer, N. Varela y H. García. 2007. Comportamiento de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en poscosecha bajo condiciones de atmosfera modificada activa. Rev. Corpoica Ciencia Tecnol. Agropec. 8(1), 61-68.

Marangoni, A. G., Palma, T., y Stanley, D.W. 1996. Membrane effects in postharvest physiology. Postharvest Biology and Technology, 7, 193–221.

Martínez- Jávega J.M. 1997. La frigoconservación en naranjas y mandarinas. Rev. Phytoma. 90: 136-140.

Maul, E., Sargent, S.A., Sims, C.A., Baldwin, E.A., Balaban, M.O., Huber, D.J., 2000. Tomato flavor and aroma quality as affected by storage temperature. J. Food Sci. 65, 1228–1237.

Mittler, R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends in Plant Science, 7, 405–410.

Obenland, D., Collin, S., Mackey, B., Sievert, J., Arpaia, M.L., 2011. Storage temperature and time influence sensory quality of mandarins by altering soluble solids, acidity and aroma volatile composition. Postharvest Biol. Technol. 59, 187–193.

Page, D., Gouble, B., Valot, B., Bouchet, J.P., Callot, C., Kretzschmar, A., Causse, M., Renard, C.M.C.G., Faurobert, M., 2010. Protective proteins are differentially expressed in tomato genotypes differing for their tolerance to low-temperature storage. Planta 232, 483–500.

Paull, R. 1999. Effect of temperature and relative humidity on fresh commodity quality, Postharvest Biology and Technology 15, 263–277.

Rugkong, A., R. McQuinnc, J.J. Giovannonic, J.K.C. Rosee y C.B. Watkins. 2011. Expression of ripening-related genes in cold-stored tomato fruit. Postharvest Biology and Technology 61, 1-14.

Sala, J. M. (1998). Involvement of oxidative stress in chilling injury in cold-stored mandarin fruits. Postharvest Biology and Technology, 13, 255–261.

Thompson, J.F., Mitchell, F.G., Kasmire, R.F., 2002. Cooling horticultural commodities. In: Kader, A.A. (Ed.), Postharvest Technology of Horticultural Crops; Third edition, publication number 3311. Regents of the University of California, Division of Agricultural and Natural Resources, Oakland, CA, pp. 97–112.

Tietel, Z., E. Lewinsohn, E. Fallik y R. Porat. 2012. Importance of storage temperatures in maintaining flavor and quality of mandarins, Postharvest Biology and Technology 64, 175–182.

Vega-Garcia, M.O., Lopez-Espinoza, G., Ontiveros, J.C., Caro-Corrales, J.J., Vargas, F.D., Lopez-Valenzuela, J.A., 2010. Changes in protein expression associated with chilling injury in tomato fruit. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 135, 83–89.

Zheng, Y. H., Raymond, W. M. F., Wang, S. Y., y C.Y. Wang. 2008. Transcript levels of antioxidative genes and oxygen radical scavenging enzyme activities in chilled zucchini squash in response to super atmospheric oxygen. Postharvest Biology and Technology, 47, 151–158.

2. Cambios fisiológicos durante la maduración del fruto de uchuva asociados con la producción de etileno

2.1 Emisión de compuestos volátiles durante el desarrollo del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.)[3]

Emission of volatile compounds during cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruit development

H. Balaguera-López, A. Herrera, L. Ramírez y M. Espinal

2.1.1 Resumen

La uchuva es una especie perteneciente a la familia Solanaceae, el fruto es una baya considerada como "superfruto" por sus propiedades funcionales y medicinales, además de su sabor. Es un fruto climatérico altamente perecedero que durante la maduración cambia de color verde a naranja, se han realizado varios estudios para conocer parte del comportamiento fisicoquímico y fisiológico del fruto, y aunque existen reportes de los compuestos volátiles que aportan al aroma en la madurez de consumo, se desconoce el comportamiento de la emisión de compuestos volátiles durante el desarrollo del fruto. El objetivo de esta investigación fue identificar los principales compuestos volátiles emitidos por los frutos de uchuva en seis estados de desarrollo. Los frutos de uchuva ecotipo Colombia fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá. Al día siguiente de haber sido cosechados los frutos, se les retiró el cáliz para luego ser separados en seis estados de desarrollo con base en el color de la epidermis y el

---

[3]Artículo publicado en las memorias del VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas, pp. 1546-1551. 2013. ISBN - 13 978-84-695-9055-3

peso fresco, de tal manera que estos seis estados abarcaran las diferentes etapas de desarrollo del fruto. La extracción de compuestos volátiles se hizo mediante microextracción en fase sólida con espacio de cabeza HS-SPME, para la identificación de dichos volátiles se utilizó un espectrómetro de masas 5975C acoplado al cromatógrafo de gases, los espectros obtenidos fueron comparados con aquellos de las bibliotecas de sistema de datos NIST 8. El índice de Kovats se calculó para todos los compuestos usando la serie homóloga de n-alcanos bajo las mismas condiciones de operación. Los resultados indican que los compuestos volátiles de los frutos de uchuva varían durante las diferentes etapas de desarrollo del fruto tanto en composición como en concentración. En los primeros estados de desarrollo predominan compuestos terpenoides, muchos de los cuales van disminuyendo durante la maduración, mientras que los esteres se caracterizaron por incrementar en número y concentración en función del desarrollo del fruto.

Palabras clave: esteres, terpenoides, maduración del fruto.

2.1.2 Abstract

Cape gooseberry is a species belonging to the Solanaceae family. The fruit is a berry considered as “super fruit” because of its functional and medicinal characteristics besides of its flavor. It is a highly perishable climateric fruit that changes color during the ripening stage from green to orange. Many studies have been conducted in order to get to know part of the physicochemical and physiological behavior of the fruit, and although there are reports on the volatile compounds that provide the aroma at consumption maturity the emission behavior of the volatile compounds during fruit development is yet unknown. The objective of this investigation was to identify the main volatile compounds emitted by cape gooseberry fruits at six development stages. Cape gooseberry fruits from "Colombia" ecotype were harvested from a commercial orchard at the municipality of Ventaquemada, Boyaca. The day after being harvested the calyx of the fruits was removed and afterwards the fruits were divided into six development stages based on epidermis color and fresh weight so that these six stages would cover the different stages of fruit development. The extraction of volatile compounds was done by solid-phase microextraction with HS-SPME

head space. For identifying such volatile compounds a 5975C mass spectrometer attached to a gas chromatograph was used, and the spectra obtained were compared with those from the NIST 8 data system libraries. The Kovats index was calculated for all the compounds using the n-alkanes homologous series under the same operating conditions. The results indicate that the volatile compounds of cape gooseberry fruits vary during the different fruit development stages in both composition and in concentration. During the first development stages terpenoid compounds prevail, many of which diminish during ripening, while esters increased in number and concentration as a function of fruit development.

Keywords: esters, terpenoids, fruit ripening.

2.1.3 Introducción

En el capítulo anterior se reportaron resultados de las principales investigaciones que se han realizado en relación a los diferentes cambios bioquímicos y fisiológicos que presenta el fruto de uchuva durante la maduración. Existen pocos estudios sobre la emisión de compuestos volátiles en uchuva, aunque se ha profundizado en la determinación de compuestos que aportan al aroma de este fruto, estos estudios solo se han hecho en frutos maduros y se desconoce el comportamiento general de los compuestos volátiles durante el desarrollo del fruto.

En el fruto de lulo (*Solanum quitoense* L.), se estableció que el proceso de maduración se caracteriza por el incremento no solo de ésteres sino también de alcoholes, que son los compuestos mayoritarios del aroma. Entre los compuestos que presentaron incremento significativo fueron acetato de butilo, (E)-2-butenoato de metilo, acetato de 3-metilbutilo, (E)-2-metil-2-butenoato de metilo, hexanoato de metilo, acetato de (Z)-3-hexenilo, benzoato de metilo, (Z)-3-hexenol, linalol y α-terpineol. Algunos compuestos, como β-mirceno, limoneno y terpinoleno, muestran una ligera disminución de su concentración con el incremento de la maduración. Las etapas finales, en las cuales se desarrolla el aroma característico del lulo, coinciden con el significativo incremento de acetato de butilo, (E)-

2-butenoato de metilo, acetato de 3-metilbutilo, (E)-2-metil-2-butenoato de metilo, hexanoato de metilo y benzoato de metilo (Suárez y Duque, 1992).

Quijano y Pino (2006) realizaron un estudio sobre la variación de los compuestos volátiles en tres estados de madurez (verde, pintón y maduro) de la cocona (*Solanum sessiliflorum* Dunal). De manera similar al comportamiento del lulo mencionado anteriormente, durante la maduración se evidencia un incremento en la concentración de ésteres y alcoholes. El salicilato de metilo y el α-terpineol son los componentes mayoritarios en el estado "maduro", mientras que los aldehídos disminuyen su contenido con la maduración. En otro estudio realizado por Ménager *et al*. (2004) se estableció la variación de componentes volátiles de la fresa en seis etapas de maduración, estos autores encontraron que en los primeros estados de madurez hubo predominio de compuestos de seis átomos de carbono (particularmente (E)-2-hexenal) mientras que furanonas, lactonas, ácidos y ésteres son los compuestos mayoritarios en las etapas finales del proceso. Establecieron, además, que los compuestos activos del flavor del fruto presentan las mayores variaciones en las etapas intermedias de la maduración. Con estos resultados se confirma que la formación de compuestos volátiles durante la maduración de los frutos es un proceso dinámico (Fajardo, 2009).

En frutos de guayaba blanca, Yusof y Mohamed (1987), estudiaron en tres estados de maduración la composición química y de volátiles. Los estados de madurez fueron caracterizados de acuerdo a la evolución del color, pH, acidez, contenido de azúcares, sólidos solubles, vitamina C y constituyentes volátiles. De ellos los sesquiterpenos como el β-cariofileno y el α-selineno se perfilaron como los mayoritarios y los que más cambiaron con el progreso de la maduración fueron los ésteres y aldehídos. En un estudio similar sobre guayaba blanca (cv. Coltibel), se analizaron los componentes volátiles y no volátiles en diferentes estadíos de madurez, los aldehídos, (E)-2-hexenal, (E)-3-hexenal predominaron y durante la madurez, fueron los ésteres como el acetato de (Z)-3-hexenilo y acetato de (E)-3-hexenilo y los sesquiterpenos como el β-cariofileno, α-humuleno y β-bisaboleno presentes en concentraciones altas (Soares, 2007).

Durante la etapa de poscosecha de frutos de guanábana se presentó mayoritariamente compuestos volátiles del grupo de los esteres, siendo la abundancia relativa de estos creciente hasta la madurez ideal o de consumo alcanzada entre los días 5 a 7 de poscosecha, se mostró una ligera disminución en la etapa de sobremaduración a partir de la cual se destaca la detección de nuevos compuestos de carácter alcohólico. Durante la maduración se presentaron cambios en la abundancia relativa de las sustancias volátiles detectadas, comprobando la desaparición y aparición de nuevos compuestos, siendo el éster hexanoato de metilo, el compuesto volátil mayoritario en las etapas de poscosecha, correspondientes a madurez intermedia, madurez ideal o de consumo y sobremadurez en las frutas de guanábana, mientras que en frutas inmaduras predominó mayoritariamente el aldehído 2-metil-4-pentenal y el alcohol 3-Hexenol (Márquez, 2009).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue realizar una aproximación a la identificación de compuestos volátiles en seis estados de desarrollo del fruto de uchuva ecotipo Colombia. Los volátiles obtenidos fueron determinados con la técnica del espacio de cabeza y analizados mediante cromatografía de gases – masas (GC-MS).

2.1.4 Materiales y métodos

Los frutos de uchuva ecotipo Colombia fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá, ubicado a 2630 msnm con temperatura ambiental que oscila entre 8 y 14°C. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Poscosecha de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Al día siguiente de haber sido cosechados los frutos, se les retiró cuidadosamente el cáliz para luego ser separados en seis estados de desarrollo con base en el color de la epidermis y el peso fresco, de tal manera que estos seis estados abarcaran todo el desarrollo del fruto. Primero se realizó una caracterización fisicoquímica de cada estado de desarrollo y luego se realizó la extracción e identificación de compuestos volátiles.

En cada estado de desarrollo se midieron las siguientes variables:

- **Firmeza del fruto (N):** mediante la utilización de un penetrómetro digital PCE-PTR200 con aproximación 0,05 N.

- **Peso fresco (g):** se realizó medición en balanza de precisión con aproximación de 0,001 g.

- **Color de la epidermis:** mediante colorímetro digital marca Minolta con los parámetros del sistema CIELab L*, a* y b*. Con estos datos se calculó el índice de color (IC) como IC= (1000 x a*)/(L* x b*).

- **Sólidos solubles totales (SST):** a través de mediciones de grados Brix con un refractómetro digital marca Hanna de rango 0 a 85% con precisión 0,1 °Brix.

- **Acidez titulable (ATT):** se realizará de acuerdo a la metodología de la AOAC (AOAC, 1995), mediante cálculos con datos de volumen de NaOH, incorporado en 5 g de jugo de frutos agregando 3 gotas de fenoftaleína en una titulación potenciométrica hasta pH de 8,2. para ello, se utiliza la fórmula. %Acidez = (A*B*C)*100/D. En donde: A = Volumen de NaOH gastado; B = Normalidad del NaOH (0,097); C = peso equivalente expresado en g de ácido predominante en el fruto (ácido cítrico 0,064 g meq^{-1}); D = peso en gramos de la muestra utilizada (5g).

- **Extracción y cuantificación de carotenoides:** se pesó aproximadamente 1g de pulpa, se agregó 5 mL de acetona, se agitó en vórtex durante 1 min y luego se centrifugó durante 10 min a 4000 rpm. Después se vertió el sobrenadante en un balón de 25 mL, al pelet nuevamente se le agregó acetona, se agitó en vórtex y luego se llevó a centrifuga, este procedimiento se repitió 3 veces. El sobrenadante obtenido se llevó a volumen de 25mL con acetona, se determinó la absorbancia en espectrofotómetro a 450 nm. La cuantificación se realizó mediante curva de calibración con diferentes concentraciones de β-caroteno. El total de carotenoides se expresó como µg de β-caroteno/g PF (peso fresco).

- **Tasa respiratoria (mg CO_2 kg^{-1} h^{-1}):** aproximadamente 100 g de frutos fueron puestos a temperatura ambiente en una cámara hermética de 0,25 L, en la cámara fue ubicado un sensor infrarrojo de CO_2, el cual se conectó a una Labquest (equipo de captura de datos). Cada 4 segundos y durante 5 minutos se registraron los valores de CO_2, con estos valores se calculó la pendiente, que correspondió a la tasa respiratoria, se tuvo en cuenta el peso de los frutos y el volumen de la cámara para convertir los datos a mg de CO_2 kg^{-1} h^{-1}.

- **Extracción e identificación de compuestos volátiles:** Para la extracción e identificación de los compuestos volátiles, se procedió de la siguiente manera: la extracción se realizó mediante microextracción en fase sólida en espacio de cabeza (HS-SPME), se tomaron 80g de frutos los cuales se colocaron a temperatura ambiente (20-23°C), en una cámara hermética de 0,25 L durante 1 hora como tiempo de equilibrio. La fibra de microextracción (PDS, 100um, SUPELCO) se expuso durante 30 minutos. La desorción se realizó durante 5 minutos en el puerto de inyección de un cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7890A acoplado al detector de masas 5975C Agilent Technologies. La identificación de los compuestos se realizó mediante la comparación de los espectros de masas obtenidos con la librería NIST 8. Se utilizó una columna HP5 de 30 m x 250 µm x 0,25 µm. Las condiciones cromatográficas fueron: temperatura del inyector 220°C, temperatura inicial del horno de 35 °C durante 2 min, luego se calentó a 4 °C/min hasta 250°C, finalmente en esta temperatura se dejó 5 min. Se usó helio como gas de arrastre a 1 mL/min. El software del equipo fue MSD ChemStation. El índice de retención (índice de Kovats) se calculó para todos los compuestos usando la serie homóloga de n-alcanos bajo las mismas condiciones de operación.

Los datos se analizaron en diseño completamente al azar, las variables físicas tuvieron 10 repeticiones y las demás cuatro repeticiones. Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey ($P \leq 0,05$).

2.1.5 Resultados y discusión

Caracterización fisicoquímica de los estados de madurez

En la figura 1-1 de la sección 1.1.7 se observa la evolución del color de los frutos de uchuva en los seis estados de desarrollo. El IC incrementa a medida que el fruto de uchuva madura ($P \leq 0{,}01$), en el E1, donde el frutos es completamente verde, el IC fue de -9,07, frutos en E5 ya tuvieron una coloración totalmente naranja y el IC presentó un valor de 2,83 y en E6 de 4,17 (Figura 2-1). El cambio en el color se explica en gran parte por la disminución de clorofilas y el incremento de carotenoides (Trinchero *et al*., 1999), siendo el β-caroteno el que se encuentra en mayor concentración (Fischer y Martínez, 1999), se observó que los carotenoides totales incrementaron continuamente durante la maduración del fruto ($P \leq 0{,}01$), con concentraciones superiores a 200 µg de β-caroteno por g de peso fresco en el E6 que corresponde con la plena madurez de consumo, valores superiores a los reportados por Fischer y Martínez (1999).

El peso fresco de los frutos incrementó notablemente del E1 al E5 ($P \leq 0{,}01$) pasando de 0,984g a 5,922g, pero en E6 se observa una leve disminución (Figura 2-1). Estos valores son concordantes con los reportados por Mazorra *et al*. (2003). Por su parte, la firmeza del fruto incrementó de E1 a E2 y posteriormente disminuyó hasta E6 ($P \leq 0{,}01$), en este último estado de desarrollo la firmeza fue de 10,44N (Figura 2-2). La pérdida de firmeza durante la maduración en uchuva al parecer en parte se debe a la acción de enzimas hidrolíticas encargadas de degradar la pared celular (Trinchero *et al.*, 1999; Majumder y Mazumdar, 2002), y que por lo menos, hasta el E6 hacen que el fruto adquiera una consistencia adecuada para su consumo.

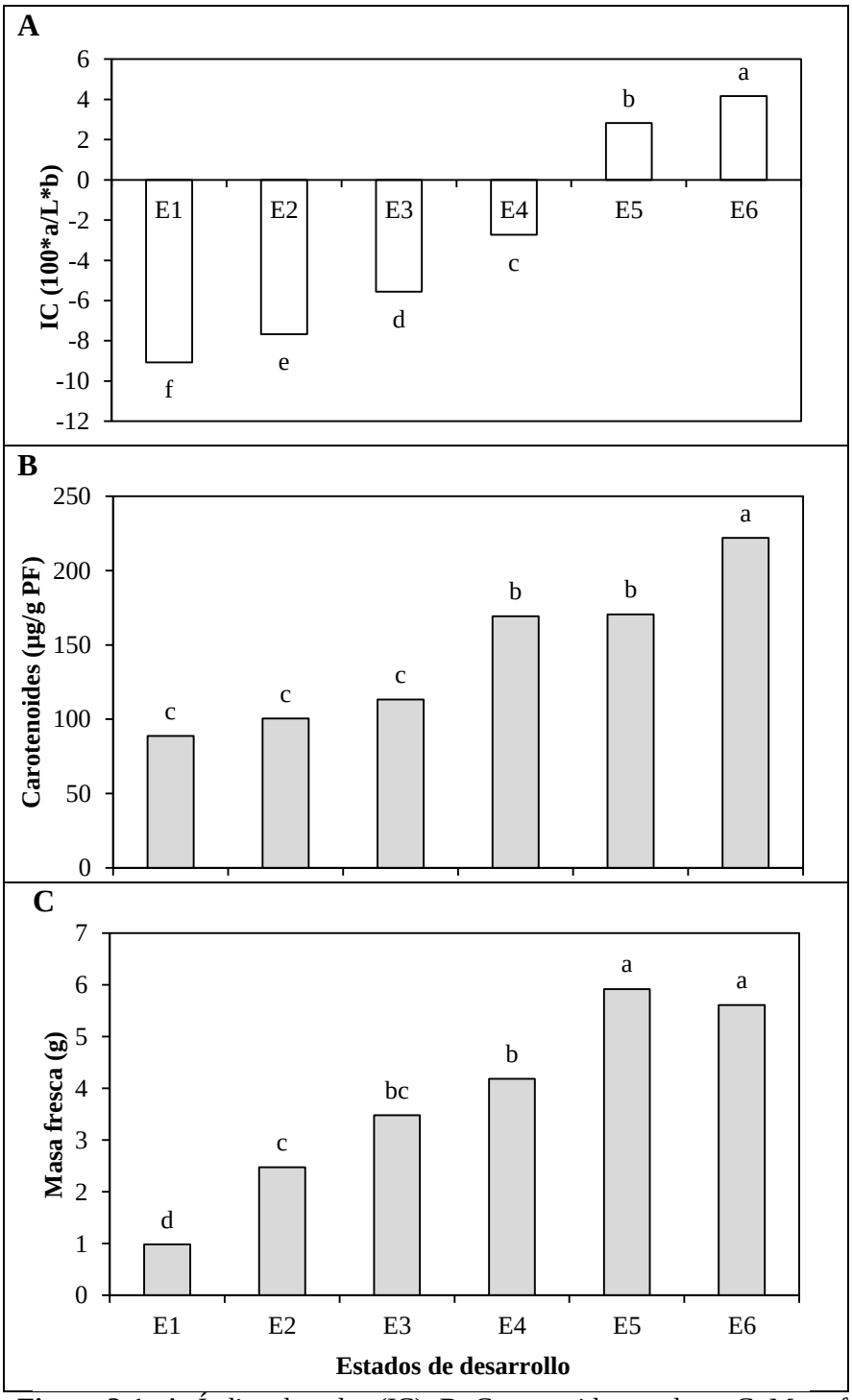


Figura 2-1: A. Índice de color (IC), B. Carotenoides totales y C. Masa fresca de frutos de uchuva en 6 estados de desarrollo. Promedios seguidos de letras distintas presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey (P≤0,05).

La tasa respiratoria presentó diferencias significativas ($P \leq 0,01$), fue alta en E1 (101,53 mg de CO_2 kg^{-1} h^{-1}) (Figura 2-2), esto indica que los frutas están en la primera fase de desarrollo y requieren altos contenidos de ATP para los procesos de división celular activa. Luego la respiración disminuyó notablemente y presentó el valor más bajo en E3, Castañeda y Paredes (2003) mencionan que el fruto de uchuva alcanza la madurez fisiológica cuando la tasa respiratoria alcanza el mínimo valor. Posteriormente, la tasa respiratoria incrementó continuamente hasta E6, lo cual podría ser indicativo de que se está alcanzando el pico climatérico (Castañeda y Paredes, 2003; Valdenegro *et al*., 2012).

Los sólidos solubles totales (SST) incrementaron en función del estado de madurez ($P \leq 0,05$), en E1 estuvieron en 6,55 °Brix y en E5 en 13,175 °Brix, este valor estuvo muy cercano al de frutos de E6 (Figura 2-3). La acidez total titulable disminuyó desde E2 hasta E6 pasando de 2,64% a 2,11% ($P \leq 0,01$). Esta disminución se debe a que los ácidos orgánicos pueden ser utilizados como sustratos respiratorios y/o convertidos en azúcares (Kays, 2004), la disminución de la ATT durante la maduración también fue reportada en uchuva por Fischer y Martínez (1999). La RM de madurez incrementó notablemente desde E2 a E6 ($P \leq 0,01$), en este último punto se obtuvo un valor de 6,5 (Figura 2-3) el aumento de la RM demuestra claramente la evolución de la madurez a medida que se aumentó el estado de desarrollo. Los datos de SST, ATT y RM son inferiores a los reportados por Fischer y Martínez (1999) y la norma Icontec (1999), indicando que la calidad interna y la maduración de los frutos de uchuva tiene gran variación.

Al observar toda la caracterización fisicoquímica se puede afirmar que todos los estados de desarrollo están correctamente definidos y son distintos, esto permite pensar que los 6 estados de desarrollo son una muestra representativa del desarrollo del fruto de uchuva y son adecuados para hacer una primera aproximación de la emisión de compuestos volátiles durante el desarrollo del fruto de uchuva.

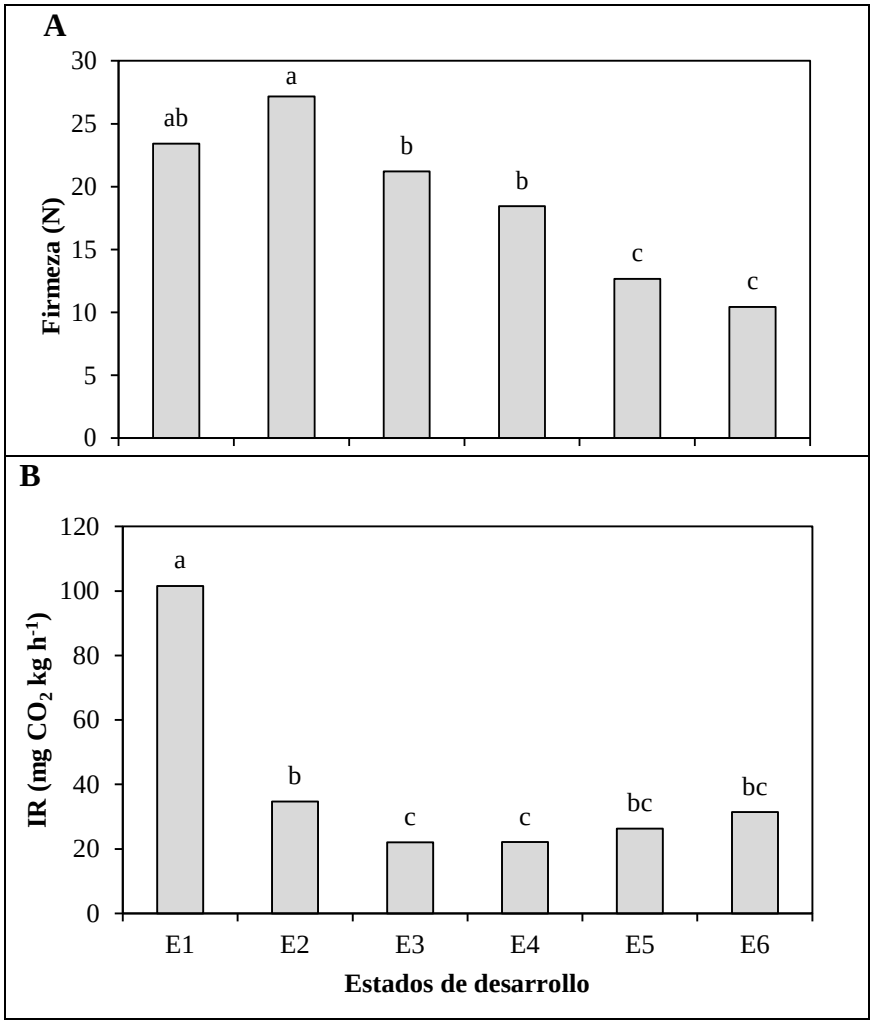


Figura 2-2: A. Firmeza y B. Intensidad respiratoria de frutos de uchuva en 6 estados de desarrollo. Promedios seguidos de letras distintas presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

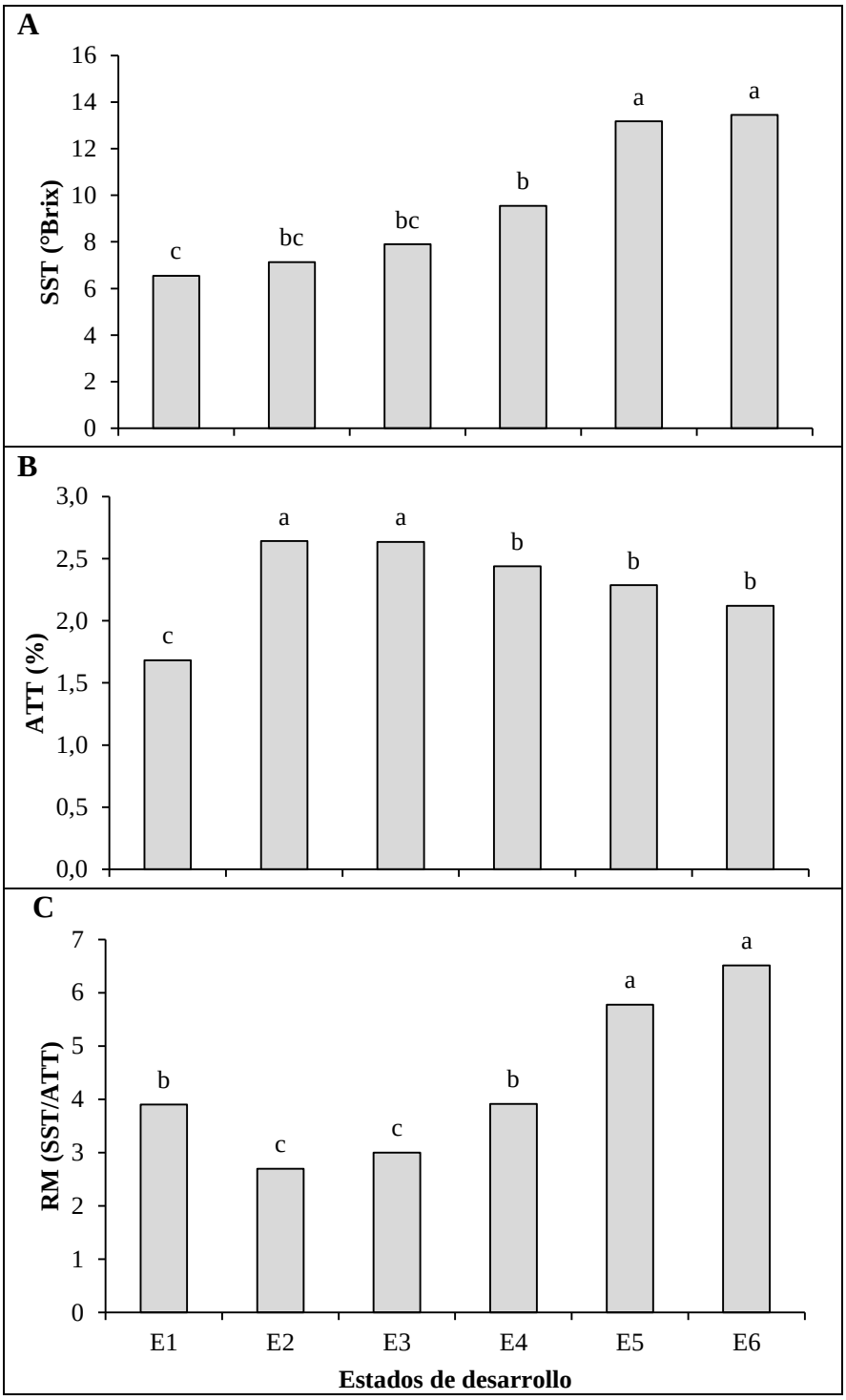


Figura 2-3: A. Sólidos solubles totales (SST), B. Acidez total titulable (ATT) y C. Relación de madurez (RM) de frutos de uchuva en 6 estados de desarrollo. Promedios seguidos de letras distintas presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

Emisión de compuestos volátiles en seis estados de desarrollo

En la tabla 2-1 se reportan 32 compuestos volátiles, que estuvieron presentes en uno o más de los seis estados de desarrollo evaluados para el fruto de uchuva. Hay una tendencia relativamente definida en la presencia de compuestos principalmente terpenoides en los primeros estados de desarrollo, muchos de los cuales van disminuyendo durante la maduración, por el contrario, los esteres se caracterizaron por incrementar en número y concentración en función del desarrollo del fruto.

De los compuestos con mayor abundancia relativa en los primeros estados de desarrollo se destacan ylangeno, α-cubebeno, α-bourbonene, cariofileno, β-elemeno, calareno, β-cubebeno, α-cariofileno, (-)-germacreno D, entre otros. Después del estado 4, fue notoria la aparición y predominio de compuestos esteres como octanoato de etilo, butanoato de etilo, butanoato de 2-metilpropilo, butanoato de butilo, octanoato de metilo, decanoato de etilo y dodecanoato de etilo, entre otros, siendo el octanoato de etilo el de mayor abundancia relativa. Compuestos como ylangeno, α-cubebeno, cariofileno, α-bourboneno, β-elemeno, α-cariofileno, (-)-germacreno D y α-elemol se mantienen con niveles representativos también en los últimos estados de desarrollo, aunque en menor concentración relativa que en los primeros estados (Tabla 2-1). Muchos de los compuestos identificados ya han sido reportados para uchuva (Duque et al., 2005; Gutiérrez et al., 2010).

De los seis estados de desarrollo analizados el estado E4 es el último con presencia de color verde y es donde comienza a manifestarse la coloración amarilla (Figura 1-1 y Figura 2-1), a su vez como se observa en la tabla 1, en el estado E4 es en el que irrumpe la presencia de los ésteres, que no estaban presentes antes y se marca el inicio en la disminución de los terpenoides, lo anterior se puede entender como una expresión del metabolismo secundario, en una ruta bioquímica común entre carotenoides y terpenoides volátiles a partir del isopreno, por lo que los terpenoides hacen parte del mismo proceso en el que se forman los carotenoides, lo cual explicaría tanto los cambios de color como de la composición en el aroma de los frutos de uchuva y también explicaría que una vez se han

formado los carotenoides, no se producen o disminuye la producción de terpenoides. De la misma manera la aparición de ésteres, cuyas rutas principales se derivan del metabolismo de ácidos grasos en algunos frutos y en otros casos de aminoácidos, pero siempre a través de procesos dependientes del etileno y en las que juega un papel importante la alcohol acil transferasa (AAT), enzima que sólo manifiesta su actividad en frutos maduros (Balbontin, 2007), explicaría el incremento sustancial de los esteres a partir del estado 4, cuando se hace más intenso el aroma de los frutos de uchuva, como se observó en este estudio.

Cambios en la composición química de compuestos volátiles durante el desarrollo se ha observado en varios frutos, al igual que el predominio de los esteres. Por ejemplo, en manzanas inmaduras predominan los aldehídos, mientras que en manzanas maduras prevalecen los ésteres, estos últimos, son los compuestos de mayor impacto en el sabor del fruto (Salas-Salazar y Olivas, 2011). Fuggate et al. (2010) encontraron que en frutos de papaya en estados tempranos de desarrollo no hubo producción representativa de esteres, mientras que en los últimos estados de maduración la producción de estos compuestos incrementó drásticamente, lo cual coincidió con la producción climatérica de etileno. En frutos variedad Cortibel provenientes de Brasil (Soares et al., 2007), Lucknow-49 de la India (Toth-Markus, 2005) y guayabas blancas de Taiwán (Chyau et al., 1992) se evaluó el comportamiento de los componentes volátiles en diferentes estados de maduración. En general, encontraron que en los frutos inmaduros y en el estado intermedio de maduración predominan los aldehídos como (E)-2-hexenal y (Z)-3-hexenal, mientras que en los frutos maduros los ésteres acetato de (Z)-3-hexenilo y acetato de (E)-3-hexenilo y sesquiterpenos como cariofileno, α-humuleno y β-bisaboleno son los compuestos predominantes.

Tabla 2-1: Concentración relativa (%) de compuestos volátiles emitidos por frutos de uchuva en seis estados de desarrollo. nd: no se detectó.

No.	TR	Índice Kovats	Compuesto	Estados de desarrollo					
				E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	6,015	801	Butanoato de etilo	nd	nd	nd	1,83	5,18	5,45
2	11,371	940	Butanoato de 2-metilpropilo	nd	nd	nd	0,82	1,93	2,16
3	12,889	981	Butanoato de butilo	nd	nd	nd	1,31	10,74	10,15
4	15,283	1023	Butanoato de 2-metilbutilo	nd	nd	nd	nd	nd	1,68
5	16,343	1038	Terpinoleno	nd	nd	nd	nd	nd	1,43
6	17,748	1058	Octanoato de metilo	nd	nd	nd	0,98	2,12	2,46
7	20,237	1092	Butanoato de hexilo	nd	nd	nd	nd	nd	1,09
8	20,423	1097	Octanoato de etilo	nd	nd	nd	17,56	37,77	38,66
9	23,728	1243	Octanoato de propilo	nd	nd	nd	nd	1,24	1,51
10	24,807	1259	Decanoato de metilo	nd	nd	nd	2,97	1,76	1,5
11	25,623	1271	Octanoato de isobutilo	nd	nd	nd	nd	nd	3,04
12	26,369	1282	Ylangeno	4,29	4,73	2,27	1,08	0,52	0,29
13	26,514	1284	α-Cubebeno	2,52	2,13	0,34	0,52	0,22	0,12
14	26,812	1289	α-Bourboneno	1,66	1,6	0,67	0,59	0,23	0,08
15	26,916	1291	Caprilato de butilo	nd	nd	nd	nd	1,27	3,24
16	27,057	1292	β-Elemeno	5,38	5,26	8,10	4,62	1,06	0,35
17	27,191	1296	Decanoato de etilo	nd	nd	nd	9,29	13,23	14,71
18	27,948	1406	Cariofileno	18,88	16,25	12,13	6,7	2,09	0,96
19	28,339	1413	Calareno	1,94	1,36	0,49	0,87	0,24	0,11
20	28,467	1415	β-Cubebeno	4,53	5,29	5,05	2,97	0,87	0,35
21	28,712	1418	β-Panasinseno	1,1	1,06	nd	nd	nd	nd
22	29,021	1423	α-Cariofileno	2,49	2,29	2,4	1,36	0,33	0,15
23	29,324	1428	(+)-Epi-biciclosesquifelandreno	1,04	0,8	nd	0,82	0,11	0,10
24	29,924	1438	(-)-Germacreno D	34,48	38,02	42,77	26,07	6,75	2,41
25	30,426	1446	Biciclogermacreno	1,97	2,66	nd	nd	0,25	nd
26	30,478	1447	Pentadecano	nd	nd	nd	2,31	0,34	0,13
27	30,746	1451	α-Farneseno	0,73	0,56	nd	0,79	0,16	0,02
28	30,921	1454	β-Cadineno	1,37	1,42	2,06	1,31	0,28	0,14
29	31,212	1459	£-Cadineno	2,14	2,02	2,58	2,48	nd	nd
30	32,069	1473	α-elemol	3,54	3,24	3,77	1,91	0,47	0,19
31	33,480	1476	Dodecanoato de etilo	nd	nd	nd	2,6	1,9	2,35
32	35,870	1642	8-Heptadeceno	nd	nd	2,96	1,69	0,24	0,04

Similar a lo encontrado en uchuva, en gulupa (*Passiflora edulis Sims*) se encontró que los compuestos tipo éster representaron más del 80% de los volátiles totales para los estados II y III de desarrollo, presentando mayor concentración relativa el butanoato de hexilo y el octanoato de etilo (Jiménez et al., 2011). En concordancia, en frutos de arazá, los esteres octanoato de etilo, dodecanoato de etilo y decanoato de etilo fueron los componentes mayoritarios (Pino y Quijano, 2007).

Los compuestos volátiles emitidos por los frutos de uchuva pueden tener un sinnúmero de funciones biológicas que deben ser motivo de estudio, muchos de los compuestos identificados pueden ser parte constituyente del aroma característico tanto en estados inmaduros como en estados más avanzados de maduración, este aspecto es un indicador muy importante de la calidad de los frutos y vegetales porque junto con el sabor determinan el flavor, el cual a su vez tiene gran influencia en la aceptación por parte de los consumidores (Song y Forney, 2008). Otros compuestos pueden tener diferentes funciones, que incluyen defensa contra insectos, atracción de polinizadores, comunicación planta-planta, interacciones planta patógeno, remoción de especies reactivas de oxígeno, termotolerancia, adaptación a condiciones de estrés (Spinelli et al., 2011) entre otros, que en frutos de uchuva y en muchas otras especies son aspectos que aún se desconocen.

2.1.6 Conclusiones

Durante el desarrollo del fruto de uchuva los compuestos volátiles varían en composición y en concentración relativa, es así, que en los primeros estados de desarrollo predominan compuestos principalmente terpenoides, muchos de los cuales van disminuyendo durante la maduración, por el contrario, los esteres se caracterizaron por incrementar en número y concentración en función del desarrollo del fruto.

2.1.7 Bibliografía

Balbontín, C.A. (2007). Biosíntesis de compuestos volátiles durante la maduración de la papaya cultivada en chile (*Vasconcellea Pubescens*): rol de etileno y participación de alcohol acil transferasas. Tesis de doctorado en Ciencias mención Ingeniería Genética Vegetal. Universidad de Talca, Chile.

Castañeda, G. y R. Paredes. 2003. Estudio del proceso respiratorio, principales ácidos orgánicos, azucares y algunos cambios fisicoquímicos en el desarrollo del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Trabajo de Grado. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 92 p.

Chyau, C., Chen, S., y Wu, M. (1992). Differences of volatile and non-volatile constituents between mature and ripe guava (*Psidium guajava* Linn.), *J. Agric. Food Chem*. **40**, 846-849.

Duque, C., Mayorga, H., Knapp, H., y Winterhalter, P. (2005). Estudios sobre el delicado aroma de uchuva (*Physalis peruviana*) y algunos de sus precursores de tipo glicosídico. En: Duque, C.. Morales, A. L., Eds. El aroma frutal de Colombia. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. pp. 43-73.

Fajardo, A. (2009). Estudio de los componentes volátiles libres y enlazados y de los precursores no volátiles de arazá (*Eugenia stipitata* Mc Vaugh) y cocona (*Solanum sessiliflorum* Dunal). Tesis de doctorado. Facultad en ciencias, posgrado en Química. Universidad Nacional de Colombia. 182 p.

Fischer G. y Martínez O. 1999, 'Calidad y madurez de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en relación con la coloración del fruto' , Agron Colomb , 16 , 35 – 39 .

Fuggatea, P., Wongs-Areea, C., Noichindac, S., y Kanlayanarata, S. (2010). Quality and volatile attributes of attached and detached 'Pluk Mai Lie' papaya during fruit ripening. *Scientia Horticulturae* **126**, 120–129.

Gutiérrez, D., Sinuco, D., y Osorio, C. (2010). Caracterización de los compuestos volátiles activos olfativamente en uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Revista Colombiana de Química* **39**(3), 389-399.

Icontec. 1999. Frutas frescas. Uchuva. Especificaciones. Norma Técnica Colombiana NTC 4580. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá.

Jiménez, A., Sierra, C.A., Rodríguez-Pulido, F.J., González-Miret, M.L., Heredia F.J., y Osorio, C. (2011). Physicochemical characterization of gulupa (*Passiflora edulis* Sims. fo edulis) fruit from Colombia during the ripening, *Food Research International* **44**, 1912–1918.

Kays, S. 2004. Postharvest biology. Exon Press (Athens, Georgia). 568 p.

Majumder, K. y B. Mazumdar. 2002. Changes of pectic substances in developing fruits of cape-gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in relation to the enzyme activity and evolution of ethylene. Scientia Horticulturae 96, 91–101.

Márquez, C. (2009). Caracterización fisiológica, físico-química, reológica, nutraceútica, estructural y sensorial de la guanábana (*Annona muricata* L. cv. ELITA), Tesis de doctorado. Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. 274 p.

Mazorra M. F., Quintana A. P. , Miranda D. , Fischer G. y Chaves B. 2003, 'Análisis sobre el desarrollo y la madurez fi siológica del fruto de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en la zona de Sumapaz (Cundinamarca)', Agron Colomb, 21 (3), 175-189.

Ménager, I., Jost, M, Aubert, C. Changes in physicochemical characteristics and volatile constituents of strawberry (cv Cigaline) during maturation. J. Agric. Food Chem. 2004. 52:1248-1254.

Pino, J., y Quijano, E. (2007). Volatile compounds of arazá fruit (*Eugenia stipitata* McVaught), *Revista CENIC Ciencias Químicas* **38**(3), 363-366.

Quijano, C., y Pino, J. (2006). Changes in volatile constituents during the ripening of cocona (*Solanum sessiliflorum* Dunal) fruit. *Revista CENIC de Ciencias Químicas* **37**, 133-136.

Salas-Salazar, N.A., y Olivas, G.I. (2011). El aroma de la manzana. *Interciencia* **36**, 265-271.

Soares, F.D., Pereira, T., Marques, M.O., y Monteiro, A.R. (2007). Volatile and non-volatile chemical composition of the white guava fruit (*Psidium guajava* L) at different stages of maturity. *Food Chemistry* **100**, 15-21.

Song, J., y Forney, C. F. (2008). Flavour volatile production and regulation in fruit. *Can. J. Plant Sci*. **88**, 537-550.

Spinelli, F., Cellini, A., Marchetti, L., Nagesh, K.M., y Piovene, C. (2011). Emission and Function of Volatile Organic Compounds in Response to Abiotic Stress. En: Shanker, A. (ed.). "Abiotic Stress in Plants - Mechanisms and Adaptations. Prof. Arun Shanker (Ed.), ISBN: 978-953-307-394-1, *InTech*, Available from: http://www.intechopen.com/books/abiotic-stress-in-plants-mechanisms-and-adaptations/emission-andfunction-of-volatile-organic-compounds-in-response-to-abiotic-stress

Suárez, M., y Duque, C. (1992). Change in volatile compounds during lulo (*Solanum vestissimum* D.) fruit maturation. *J. Agric. Food Chem*. **40**, 647-649.

Superfruit. (2011). Uchuva-the superfruit. En: http://www.uchuvasuperfruit.com; consulta: 13 de agosto de 2011.

Toth-Markus, M., Siddiqui, S., Kovacs, E., Roth, E., y Nemeth-Szerdahelyi, E. (2005). Changes in flavour, cell wall degrading enzymes and ultrastructure of guava (*Psidium guajava* L.) during ripening. *Acta Aliment*. **34**, 259-266.

Trinchero, G., Sozzi, G., Cerri, A.M., Vilella, F., Fraschina, A., 1999. Ripening-related changes in ethylene production, respiration rate and cell-wall enzyme activity in goldenberry (Physalis peruviana L.), a solanaceous species. Postharvest Biol. Technol. 16, 139–145.

Valdenegro, M., L. Fuentes, R. Herrera, M.A. Moya-León. 2012. Changes in antioxidant capacity during development and ripening of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit and in response to 1-methylcyclopropene treatment. Postharvest Biology and Technology 67,110–117.

Yusof, S.; Mohamed. S. 1987. Physico-chemical changes in guava (*Psidium guajava* L.) during development and maturation. Journal of Food and Agriculture. 38: 31-39.

2.2 El estado de madurez afecta el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) almacenados a temperatura ambiente

Maturity stage affects de postharvest behavior of cape gooseberry fruit (*Physalis peruviana* L.) stored at room temperature

Helber Enrique Balaguera-López, Claudia Andrea Martínez Cárdenas y Aníbal Herrera Arévalo

2.2.1 Resumen

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) es una especie perteneciente a la familia solanaceae, los frutos son apetecidos por su sabor y también por sus propiedades funcionales y medicinales. La madurez del fruto en el momento de la cosecha es uno de los factores más importantes que determina el comportamiento y la calidad poscosecha. Con el objetivo de determinar el efecto del estado de madurez sobre el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva, se cosecharon frutos de uchuva ecotipo Colombia en cuatro grados de madurez, E1 (fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde), E2 (fruto 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento), E3 (fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo) y E4 (fruto 100% naranja y cáliz seco de color café). Los frutos fueron almacenados sin cáliz a temperatura ambiente (18°C y 60%HR) durante 15 días. Se encontró que a medida que el estado de madurez fue mayor, los valores de producción de etileno, pérdida de peso, índice de color, sólidos solubles totales y relación de madurez fueron mayores, mientras que la firmeza y la acidez titulable fueron menores, sin embargo, los frutos E1 tuvieron menor calidad poscosecha porque presentaron la mayor pérdida de peso, la menor firmeza y una coloración irregular, no es favorable cosechar los frutos en este estado de madurez. Es recomendable cosechar los frutos de uchuva en los estados E2 y E3 porque presentan un buen comportamiento poscosecha, los frutos E4 se deben cosechar para consumo inmediato.

Palabras clave: estado de madurez, color de la epidermis, poscosecha, vida útil

2.2.2 Abstract

Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) is a species belonging to the Solanaceae family, the fruits are desired for its flavor and for its functional and medicinal properties. Fruit maturity at harvest time is one of the most important factors that determine the behavior and postharvest quality. In order to determine the effect of maturity stage on postharvest behavior of cape gooseberry fruits, fruit ecotype Colombia were harvested in four maturity stages, E1 (fruit 25% yellow, 75% green and green calyx), E2 (fruit 50% yellow, 50% orange and yellow-green calyx), E3 (Fruit 100% orange and calyx 100% yellow) and E4 (fruit 100% orange dry calyx of brown color). The fruit were stored without calyx at room temperature (18 °C and 60% RH) for 15 days. We found that as the maturity was higher, the values of ethylene production, weight loss, color index, total soluble solids and maturity ratio were higher, while firmness and titratable acidity were lower, however, the fruit harvest in E1 had lower postharvest quality because they had the highest weight loss, reduced firmness and uneven coloration, is not favorable harvest the fruit in this maturity state. It is advisable harvest the gooseberry fruits in E2 and E3 maturity states because have good postharvest behavior, E4 fruits should be harvested for immediate consumption.

Key words: maturity stages, skin color, postharvest, shelf life

2.2.3 Introducción

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) es una especie perteneciente a la familia solanaceae, los frutos son apetecidos por su sabor y también por sus propiedades funcionales y medicinales (Ramadan, 2011; Puente et al., 2011). Este fruto se destaca por su alto contenido en antioxidantes (ácido ascórbico y provitamina A), fósforo, hierro, proteína y fibra (Fischer et al., 2011). Recientemente se le ha incluido en la lista de los “Superfrutos” por su alto contenido de vitaminas, minerales y fibra (Superfruit, 2011).

La madurez del fruto en el momento de la cosecha es uno de los factores más importantes que determina el comportamiento y la calidad poscosecha, y está relacionada con los prerrequisitos de utilización por parte de los comercializadores y consumidores (Santamaría *et al*., 2009; Delwiche, 1987). Frutos cosechados inmaduros o en estado avanzado de maduración son más susceptibles a daños fisiológicos en poscosecha y son de menor calidad que frutos recogidos en el estado de madurez adecuado (Kader, 2002). El estado de madurez del fruto más apropiado para realizar la cosecha será aquel que asegure un buen desarrollo del sabor, pero que evite el excesivo ablandamiento asociado a la sobremadurez, que dificulta posteriormente el manipuleo de los frutos (Proebsting et al., 1987). Los frutos inmaduros son más propensos a los daños físicos y las pérdidas por transpiración, y tienen un pobre sabor cuando maduran. Frutos demasiado maduros se vuelven muy blandos con una textura harinosa con sabor insípido poco después de la cosecha, por tanto, frutos cosechados demasiado temprano o demasiado tarde son más susceptibles a daños fisiológicos en poscosecha que frutos recolectados en el estado de madurez adecuado (Kader, 2002), situación que también se presenta en la uchuva, y que genera pérdidas en la calidad sensorial y nutricional de los frutos, y en la rentabilidad del sistema de producción.

Rincón et al. (2012) encontraron que cosechar los frutos en el estado 3 también ayuda a mantener la calidad de los frutos al presentar valores altos de firmeza y acidez total titulable, y la menor pérdida de peso y relación de madurez, respecto a frutos cosechados más maduros. En concordancia, Balaguera-López y Herrera (2012) mencionan que en frutos de champa (*Campomanesia lineatifolia* R. & P.), la dinámica del proceso de maduración está estrechamente relacionada con el estado de madurez en el momento de la cosecha, siendo más lenta en frutos cosechados con menor grado de madurez.

En muchos cultivos agrícolas, la cosecha del fruto es manual, por lo que el recolector debe tener la capacidad de decidir el momento en que un producto ha alcanzado la madurez de cosecha (Kader, 2002). Existen distintos índices que pueden contribuir a establecer un criterio objetivo para realizar la cosecha (Kader, 2002; Kays, 2004). El color de la epidermis es uno de los más adecuados (Kader, 2002) y se correlaciona bien con otros

indicadores físicos, químicos y sensoriales de la calidad de los productos (Mendoza et al., 2006), es fácil de utilizar, no es destructivo, y es de bajo costo, pero debe acompañarse de otros índices para realizar una determinación más objetiva (Balaguera-López y Herrera, 2012). Para el caso de la uchuva el índice de madurez más utilizado por los productores y comercializadores es la determinación visual a través del color del cáliz, que coincide con la coloración del fruto. Normalmente cuando los frutos presentan color amarillo, simultáneamente con el cambio de color del cáliz de verde a amarillo, es el momento óptimo de la cosecha en aquellos frutos destinados a la exportación. Este cambio es bastante fácil de identificar y por lo tanto muy utilizado por los agricultores (Galvis et al., 2005).

El color también se ha utilizado como índice de madurez en frutos de lulo (Casierra-Posada et al, (2004), pitahaya (*Selenicereus megalanthus* Haw.) (Rodríguez et al., 2005) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Casierra-Posada y Aguilar-Avendaño, 2008) entre otros. En frutos de uchuva se han realizado algunos estudios teniendo en cuenta el estado de madurez, Novoa et al. (2006) reportan que en frutos con grado de madurez 5 (amarillo) el secado del cáliz a 24 ºC resultó ser aparentemente la mejor opción para el almacenamiento a 12°C; mientras que el grado de madurez 4 (color verde amarillo) mantuvo mejores condiciones mínimas internas de calidad en lo que se refiere a acidez. Por su parte, Gutiérrez et al. (2008) evaluaron diferentes dosis de 1-metilciclopropeno (inhibidor de la acción del etileno) en cuatro grados de madurez (verde, pintón, amarillo y naranja) de frutos de uchuva, los resultados indicaron que el grado de madurez es un factor determinante para la eficiencia del 1-MCP como retardante de madurez. Galvis et al. (2005) mencionan que uno de los limitantes que se presentan en el periodo de poscosecha de la uchuva es que no se han estudiado suficientemente los diferentes cambios que involucra el proceso de maduración. Su conocimiento puede contribuir a recomendaciones viables desde el punto de vista técnico con el fin de aplicar un adecuado manejo durante las diferentes operaciones de poscosecha, para mantener la calidad y prolongar la vida útil del fruto. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar el efecto del estado de

madurez sobre el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) almacenados a temperatura ambiente.

2.2.4 Materiales y métodos

Se cosecharon frutos de uchuva ecotipo Colombia en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá-Colombia, ubicado a 2630 msnm con temperatura ambiental que oscila entre 8 y 14°C. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Poscosecha de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos, que correspondieron a diferentes grados de madurez con base en el color de la epidermis (Tabla 2-2), cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones, para un total de 16 unidades experimentales (UE). Cada UE estuvo compuesta por 125 g de frutos sin cáliz, aproximadamente. Los frutos fueron recolectados directamente de la planta, utilizando unidades completamente sanas y con tamaño homogéneo. Las características de los frutos de cada tratamiento en el momento de la cosecha, se muestran en la tabla 1. Adicionalmente, se calculó la diferencia de color entre grados de madurez consecutivos, siguiendo la metodología utilizada por Mendoza *et al*. (2006) con el fin de asegurar que el color de los frutos de cada tratamiento fuera diferente. Los frutos fueron llevados al laboratorio y se dejaron a temperatura ambiente (18 °C y humedad relativa del 60%).

Tabla 2-2: Descripción de los frutos de uchuva cosechados en diferentes grados sucesivos de madurez con base en el color de la epidermis

Estado de madurez	Fruto	Cáliz	Fruto dentro de cáliz	Descripción	Color epidermis	Δ color[b]
E1				[a]**Fruto:** 25% amarillo, 75% verde **Cáliz:** verde	L*: 62,34 a*: -8,22 b*: 45,51 IC: -2,90	
E2				[a]**Fruto:** 50% amarillo, 50% naranja **Cáliz:** verde amarillento	L*: 64,05 a*: 1,83 b*: 52,23 IC: 0,55	12,2
E3				[a]**Fruto:** 100% naranja **Cáliz:** 100% amarillo	L*: 67,12 a*: 9,33 b*: 52,67 IC: 2,64	8,1
E4				**Fruto:** 100% naranja **Cáliz:** seco de color café	L*: 65,67 a*: 12,47 b*: 48,99 IC: 3,88	5,1

[a] Los estados E1, E2 y E3 corresponden aproximadamente a los estados 2, 4 y 6 de la norma Icontec NTC 4580 (Icontec, 1999)
[b] Corresponde a la diferencia de color con el tratamiento anterior, si la diferencia >4, el color se percibe como diferente.

A los 1, 8 y 15 días después de cosecha se hicieron mediciones del índice de color (IC, ecuación 1), calculado a partir de parámetros del sistema CIELab L*, a* y b*, se realizaron tres lecturas en el diámetro ecuatorial de cada fruto con colorímetro digital marca Minolta; Firmeza del fruto (N): mediante la utilización de un Texturómetro digital Lloyd LS1 con celda de carga de 1 KN, punzón cilíndrico de 3mm y software Nexygen

plus; Pérdida de peso (%): se calculó mediante la ecuación 2, realizando mediciones de peso fresco en balanza de precisión con aproximación de 0,01 g; Sólidos solubles totales (SST): se hizo a través de mediciones de grados Brix con un refractómetro digital marca Hanna de rango 0 a 85% con precisión 0,1 °Brix; la acidez total titulable (ATT) se determinó mediante titulador automático 916 Food Ti-Touch 120; la relación de madurez (RM) se calculó a través de la relación SST/ATT.

$$IC= (1000 \times a^*)/(L^* \times b^*) \qquad (1)$$

$$\text{Pérdida de peso (\%)}=((P_1-P_2)/P_1)\times 100 \qquad (2)$$

Dónde: P_1=peso de frutos a tiempo inicial y P_2=peso de frutos a tiempo final.

Para la cuantificación de la producción de etileno (µL C_2H_4 kg^{-1} h^{-1}) se pesaron aproximadamente 120 g de frutos de uchuva que fueron colocados en cámaras herméticas de vidrio de 500 cm^3 durante 1 hora, al cabo de este tiempo se extrajo una muestra de 0,3 mL de gas de la cámara de hermética con una jeringa de 1mL, que fue inyectada en el cromatógrafo de gases (CG) Agilent Technologies 7890A, equipado con un detector de ionización de llama (FID, por su siglas en inglés). Se utilizó una columna HP-PLOT (30m x 0,55mm x 40um). Las condiciones cromatográficas fueron las siguientes: temperatura del inyector de 70 °C, temperatura del horno de 50 °C y temperatura del detector FID de 250 °C. Se empleó Helio como gas de arrastre a un flujo de 7.0 mL min^{-1} y los gases de combustión del detector FID fueron aire seco e hidrógeno con flujos de 300 y 40 mL min^{-1}, respectivamente. Para la cuantificación se empleó un patrón de etileno (AGA, Colombia) con una concentración de 99 ppm en nitrógeno.

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (Anova), luego se llevó a cabo la prueba de comparación múltiple de Tukey (5%), utilizando el software SAS v. 9.2 (Cary, N.C).

2.2.5 Resultados y discusión

Producción de etileno

Se observó un aumento representativo de la producción de etileno en todos los estados de madurez a los 5ddc, posteriormente, la emisión de etileno disminuyó de forma progresiva. En general se encontró que a medida que el estado de madurez fue mayor, la producción de etileno fue más alta, hubo diferencias estadísticas en todos los puntos de muestreo (Figura 2-4). Resultados similares fueron reportados por Gutiérrez *et al*. (2008), quienes afirman que el etileno durante la maduración de uchuva es autocatalítico, y, depende del estado de madurez en la cosecha, siendo mayor la producción en frutos cosechados con mayor madurez. Valdenegro *et al*. (2012) también observaron mayor producción de etileno en frutos de uchuva con mayor grado de madurez.

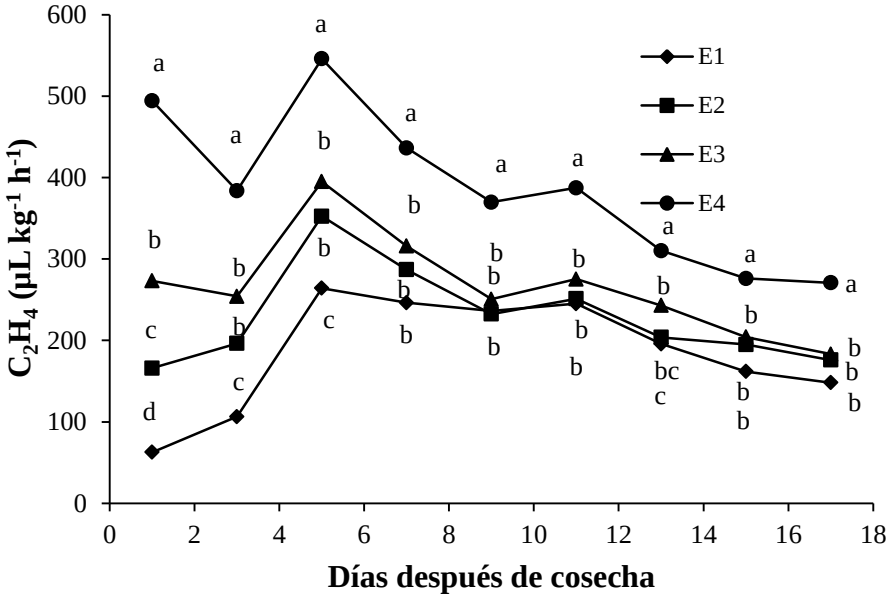


Figura 2-4: Producción de etileno durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%).

Los niveles de etileno encontrados en los frutos de uchuva son bastante altos, Trinchero *et al.* (1999) reportan que la producción de etileno en esta especie es extremadamente alta comparada con otros frutos. Estos mismos autores encontraron que durante la maduración

del fruto de uchuva el etileno aumenta 45 veces su concentración inicial, y hasta 70 veces cuando el fruto entra en estado de sobremadurez. Diferentes estudios indican que el etileno puede estar asociado a distintos procesos durante la maduración de los frutos de uchuva, como por ejemplo, el ablandamiento, la actividad antioxidante, el cambio de color, entre otros (Valdenegro *et al*., 2012; Gutiérrez *et al*., 2008; Majumder y Mazumdar, 2002; Trinchero *et al*., 1999). Por esta razón, los frutos cosechados en mayor grado de madurez y que presentan mayor producción de etileno, pueden presentar un proceso de maduración más acelerado que frutos recolectados en menor grado de madurez.

Pérdida de peso

Aumentó de manera lineal en todos los estados. Los frutos de E3 presentaron significativamente menor pérdida de peso, mientras que la mayor pérdida de peso se obtuvo en los frutos del E4 y E1, estos últimos presentaron arrugamiento en la epidermis por la alta pérdida de agua (Figura 2-5, Tabla 2-3).

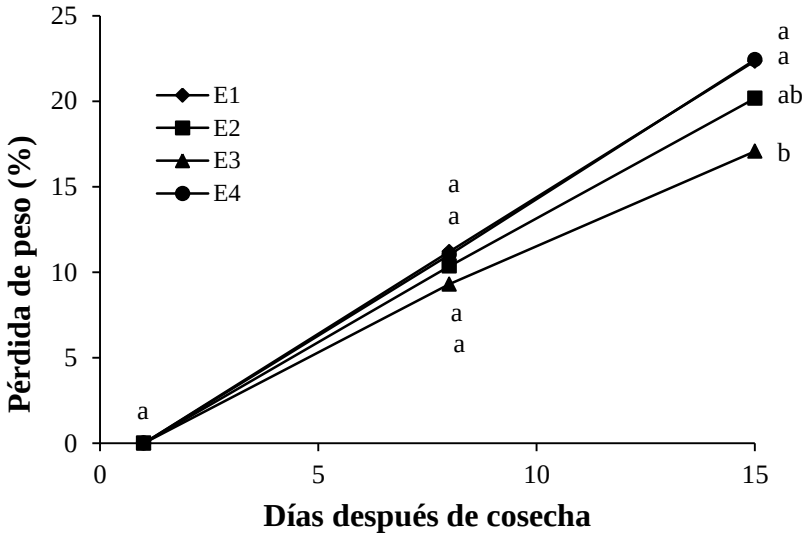


Figura 2-5: Comportamiento de la pérdida de peso durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%).

Los frutos de uchuva se caracterizan por presentar en la epidermis una película cerosa poco impermeable compuesta principalmente por resinas terpénicas, con características

microestructuras complejas (Puente et al., 2011), que se convierten en una barrera importante para el intercambio gaseoso entre el fruto y el exterior. Al parecer, los frutos de E1 y E4 presentan menor contenido de estas ceras, posiblemente en E1 porque aún no se han sintetizado completamente y en E4 porque ya se están degradando con una simultánea desintegración celular, en consecuencia, estos frutos presentan mayor pérdida de agua por transpiración. Kader (2002) comenta que la pérdida de agua es la causa principal del deterioro del fruto porque conduce a la disminución directa del peso fresco y la calidad, además acorta la vida de anaquel porque se aceleran los procesos de maduración y senescencia. Además, no sería recomendable cosechar los frutos de uchuva en los grados de madurez E1 y E4. En concordancia, Sora et al. (2006) reportan mayores pérdidas de peso en frutos de mora cosechados en estados más avanzados de maduración.

Tabla 2-3: Frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez y almacenados durante 15 días a temperatura ambiente (18°C, 75%HR). E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café.

Estado de madurez	**E1**	**E2**	**E3**	**E4**
Foto				

Firmeza

Disminuyó durante el almacenamiento, esta disminución fue mayor del 1° al 8° día después de la cosecha (ddc). Se presentaron diferencias estadísticas en los dos primeros muestreos. En el día 1 ddc, los frutos del E1 presentaron la mayor firmeza y a medida que el grado de madurez fue mayor la firmeza fue más baja. A los 8 ddc, la firmeza fue menor en los frutos más maduros, los demás estados tuvieron estadísticamente la misma firmeza (Figura 2-6).

Gutiérrez *et al*. (2008) también observaron menor firmeza en los frutos de uchuva con mayor grado de madurez. Es importante mencionar que los frutos del E1 presentaron la mayor pérdida de firmeza, en el día 1 la firmeza fue de 12,98 N y en el día 15 de 4,85 N, valor que solo fue superior al reportado por los frutos de E4 y al parecer no tiene una relación directa con la emisión de etileno. Este comportamiento atípico que también fue encontrado por Gutiérrez *et al*. (2008), no concuerda con lo reportado para otras especies como lulo (Casierra-Posada et al., 2004), guayaba (Azzolini et al., 2004) y champa (Balaguera-López y Herrera, 2012), donde los frutos que fueron cosechados con menor grado de madurez presentaron mayor firmeza durante el almacenamiento. Esto debido a que frutos con menor grado de madurez pueden presentar mayor concentración de protopectina (Hernández et al., 2007), la cual le da mayor consistencia a los tejidos. El comportamiento observado en el E3 puede estar relacionado con la mayor pérdida de peso, proceso que puede indicar una mayor degradación celular y de tejidos que acelera el proceso de senescencia incluyendo la pérdida de firmeza. La relación entre la pérdida de peso y de firmeza ha sido reportada por varios autores (Balaguera-López y Herrera, 2012; Shackel et al., 1991; Vicente et al., 2007).

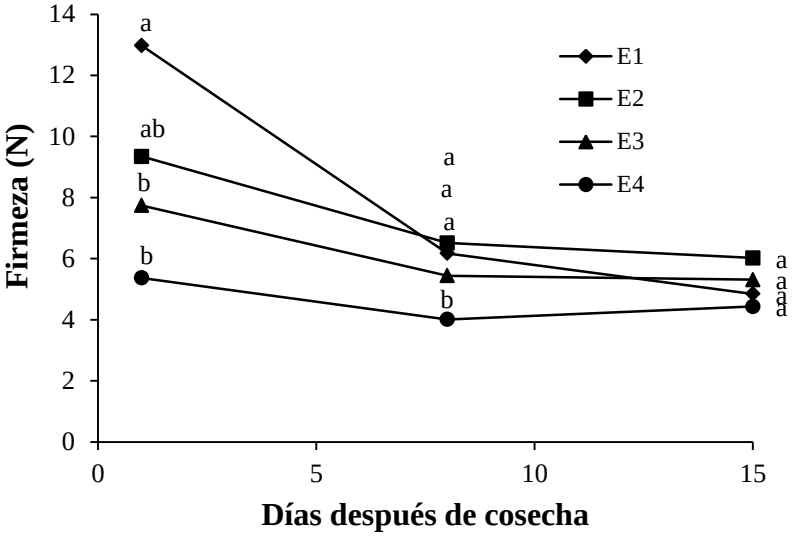


Figura 2-6: Comportamiento de la firmeza durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%).

En los demás estados sí se observa que la mayor producción de etileno puede ser la responsable de los menores valores de firmeza. Al parecer, el etileno está regulando la actividad de enzimas involucradas en el ablandamiento, como por ejemplo la poligalacturonasa (Majumder y Mazumdar, 2002). Siendo la hidrolisis de la lamela media y de la pared celular el principal proceso responsable de la pérdida de firmeza en los frutos (Morais et al., 2008). De esta manera, los frutos de uchuva en E2 son los que presentan un mejor comportamiento de la firmeza y pueden facilitar las labores poscosecha.

Color de la epidermis

Hubo un incremento representativo del 1 al 8 ddc, luego permaneció estable para todos los estados, excepto para el E1 que mostró un aumento. Se presentaron diferencias estadísticas en todos los muestreos. Se encontró relación directa entre el estado de madurez y el índice de color, siendo los frutos del E1 los que presentaron los valores más bajos, mientras que los frutos del E4 y E3 tuvieron un comportamiento similar (Figura 2-7, Tabla 2-3).

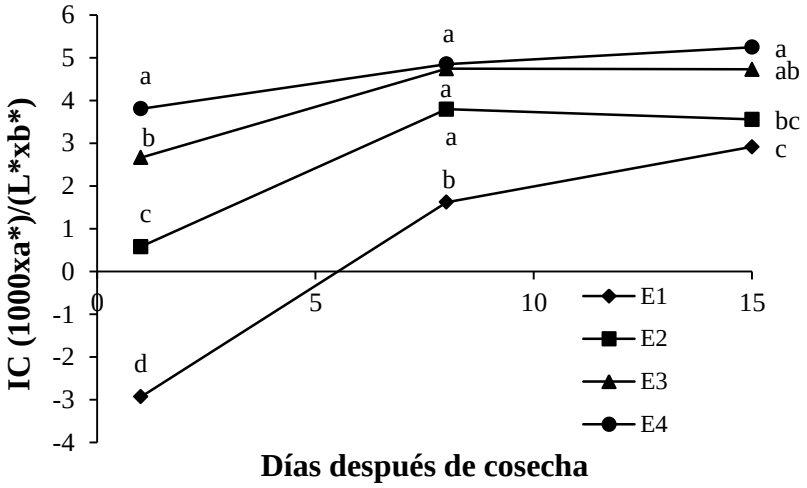


Figura 2-7: Comportamiento del Índice de Color durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%).

Resultados similares fueron observados por Balaguera-López y Herrera (2012), quienes encontraron que en frutos de champa, los frutos cosechados más maduros tuvieron un

mejor desarrollo del color que frutos cosechados en menor grado de madurez, estos autores hacen énfasis en que se podría pensar que, la acción de las clorofilasas es menor en las primeras etapas de maduración, y por tanto, la pérdida de color verde no es tan notoria como en aquellos frutos cosechados en estados más avanzados de madurez, posiblemente porque la síntesis y acción de etileno es más baja en frutos cosechados en estados de madurez tempranos. Lo cual también podría explicar el comportamiento encontrado en los frutos de uchuva. Al respecto, Trinchero et al. (1999) afirman que los cambios de color del fruto de uchuva se deben a la degradación de la clorofila y a la acumulación de carotenoides en plástidos, siendo el β-caroteno el pigmento predominante (Fischer et al., 2000), en consecuencia, también es posible que en los frutos de E1, la acumulación de β-caroteno sea considerablemente menor, y son frutos que debido al pobre desarrollo del color (coloración irregular) presentan menor calidad visual y nutricional respecto a los frutos cosechados más maduros.

Sólidos solubles totales

Los frutos del estado E1 mostraron aumento de los SST hasta los 8 ddc y luego disminuyeron, los demás estados presentaron un aumento continuo durante todo el experimento, siendo más notorio este aumento en los frutos de E4. Hubo diferencias estadísticas en todos los muestreos y se encontró una relación directa entre el estado de madurez y los SST, de tal manera que los frutos del E4 tuvieron mayor SST (Figura 2-8). El aumento de los SST durante la maduración es una característica notable en las uchuvas del ecotipo Colombia (Fischer y Lüdders, 1997), y se debe posiblemente a la hidrólisis del almidón y de los polisacáridos de la pared celular que dan origen a azúcares solubles (Kays, 2004; Menéndez et al., 2006). En este orden de ideas, los frutos con mayor grado de madurez tienen la capacidad de acumular mayor cantidad de SST que se relacionan con una mejor calidad sensorial y nutricional. Por su parte, los frutos de E1 al parecer presentan menor actividad enzimática relacionada con el metabolismo y acumulación de azúcares solubles, que puede ser explicado por la menor producción de etileno. Anzzolini et al. (2004) observaron resultados similares en guayaba y Gutiérrez et al. (2008) en

uchuva, donde los frutos maduros presentaron mayor aumento de los SST que los frutos con menor grado de madurez.

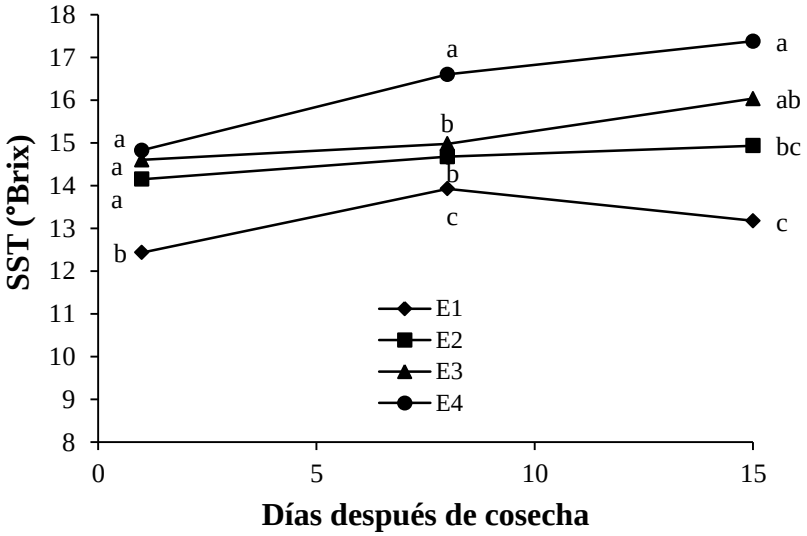


Figura 2-8: Comportamiento de los sólidos solubles totales durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%).

Acidez total titulable

Se presentaron diferencias estadísticas significativas en los tres muestreos. Hubo disminución del 1° al 8° ddc y después permaneció estable, se encontró que los frutos del E1 presentaron mayor ATT, y a medida que el grado de madurez fue mayor, la ATT fue menor (Figura 2-9). Novoa et al. (2006) determinaron que frutos de uchuva cosechados con menor grado de madurez (verde amarillo) mostraron mayor ATT durante el almacenamiento, comparados con aquellos frutos que se cosecharon en estados más avanzados de maduración (amarillos), tal como se observó en este estudio. Frutos con menor grado de madurez pueden tener un mejor comportamiento en poscosecha, pues presentan mayor cantidad de ácidos orgánicos para ser utilizados como sustrato respiratorio, lo que coincide con una mayor expectativa de vida útil. Sin embargo, los frutos cosechados en estado E1 aunque tuvieron mayor ATT no presentaron mayor calidad poscosecha, estos frutos no expresaron un proceso de maduración típico, y al parecer, la

mayor ATT se debió a que el metabolismo de los ácidos orgánicos (ciclo de Krebs, gluconeogénesis) no se llevó a cabo de manera normal, como sí ocurrió en los frutos cosechados en los demás estados de madurez.

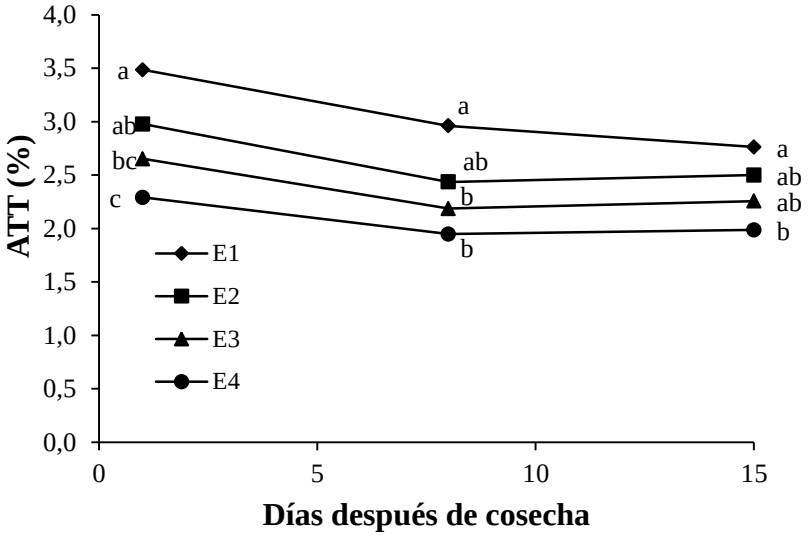


Figura 2-9: Comportamiento de la acidez total titulable durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%).

Relación de madurez

Con un aumento continuo durante el almacenamiento, los frutos de uchuva presentaron diferencias significativas en todos los puntos de muestreo. La RM fue mayor en los frutos con mayor grado de madurez (E4), mientras que los frutos del E1 presentaron la RM más baja (Figura 2-10). El incremento de la relación de madurez en todos los estados se debe a que los SST aumentaron y la ATT disminuyó. Un aumento de la relación de madurez en función del grado de madurez de uchuva también fue reportado por Valdenegro et al. (2012). Estos mismos autores también encontraron que el etileno incrementa la relación de madurez (Valdenegro et al., 2012), razón por la cual, los frutos de uchuva con mayor grado de madurez, que también produjeron mayores niveles de etileno, evidenciaron los valores más altos de relación de madurez.

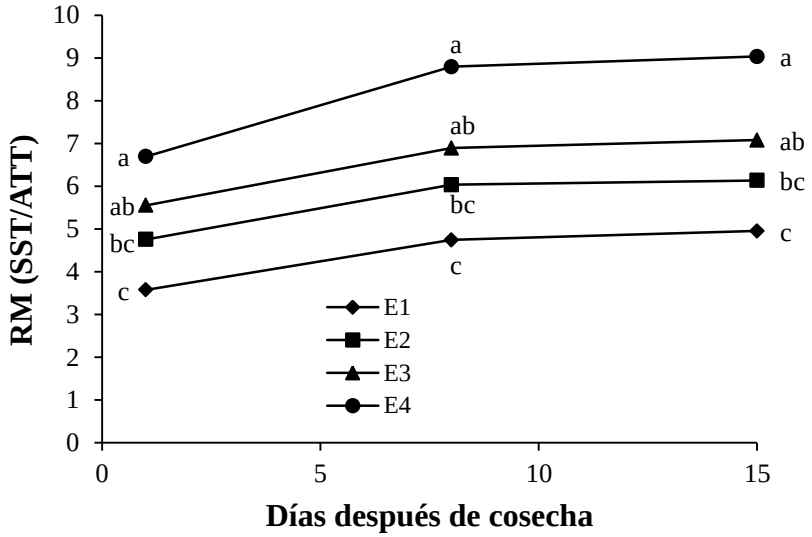


Figura 2-10: Comportamiento de la relación de madurez durante la poscosecha de frutos de uchuva cosechados en diferentes grados de madurez. E1: Fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde. E2: Fruto: 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento. E3: Fruto 100% naranja y cáliz 100% amarillo. E4: Fruto 100% naranja y cáliz seco de color café. Promedios en cada muestreo seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey (5%).

Lo anterior no solo muestra que la relación de madurez es un indicativo del grado de maduración de los frutos de uchuva, también es un indicativo del sabor del fruto, teniendo en cuenta que cuando el fruto tiene un contenido alto de azúcares, es importante que el nivel de los ácidos sea suficientemente elevado para satisfacer el gusto del consumidor (Osterloh et al., 1996). Por tanto, los frutos de uchuva con mayor grado de madurez posiblemente serán más apetecidos por el consumidor. La relación de madurez de los frutos cosechados en E1 al final del almacenamiento indica que se retrasó el proceso de maduración, pero también que son frutos muy ácidos con relación al contenido de azúcares, pues el valor a los 15 ddc (4,95) es muy bajo en comparación con los frutos de los demás estados de madurez, lo cual puede generar rechazo por parte del consumidor.

2.2.6 Conclusiones

El comportamiento poscosecha de los frutos de uchuva está estrechamente relacionado con el estado de madurez en el momento de la cosecha. Los frutos cosechados en grado de madurez E4 (fruto 100% naranja y cáliz seco de color café) presentaron mayores valores en la producción de etileno, pérdida de peso, índice de color, sólidos solubles y relación

de madurez, estos mismos frutos tuvieron los valores más bajos en firmeza y acidez total titulable. Frutos cosechados en E1 (fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde), tuvieron menores valores de producción de etileno, índice de color, sólidos solubles totales y relación de madurez, mayor acidez total titulable, pero la pérdida de peso y la firmeza fue similar a los frutos de E4. Estos frutos presentaron alta pérdida de peso con pobre desarrollo del color y de la madurez interna, no es un grado de madurez recomendable para realizar la cosecha y posteriormente almacenar los frutos a temperatura ambiente. Se recomienda cosechar los frutos en E2 (fruto 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento) porque tienen un mejor comportamiento poscosecha y pueden conservar la calidad por más tiempo. Se recomienda cosechar en E3 y E4 cuando el consumo es inmediato o en corto tiempo.

2.2.7 Bibliografía

Azzolini, M., Jacomino, A. P., Urbano, I., Índices para avaliar qualidade póscolheita de goiabas em diferentes estádios de maturação.,Pesq. Agropec. Bras., Vol. 39, No. 2, 2004, pp. 139-145.

Balaguera-López, H.E y A. Herrera. 2012. Determining optimal harvest point for champa (*Campomanesia lineatifolia* R. & P.) fruit based on skin color. Ingeniería e Investigación, vol. 32, núm. 1, pp. 88-93.

Casierra-Posada, F., Aguilar-Avendaño, Ó. E., Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cosechados en diferentes estados de madurez., Agronomía Colombiana, Vol. 26, No. 2, 2008, pp. 300-307.

Casierra-Posada, F., García, E. J. Lüdders, P., Determinación del punto óptimo de cosecha en el lulo (*Solanum quitoense* Lam. var. quitoense y septentrionale)., Agronomía Colombiana, Vol. 22, No. 1, 2004, pp. 32-39.

Delwiche, M.J., Grader performance using a peach ground color maturity chart., HortScience, Vol. 22, 1987, pp. 87-89.

Fischer, G. y Lüdders, P. Developmental changes of carbohydrates in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits in relation to the calyx and the leaves, Agron Colomb, 1997. Vol. 14, 95-107.

Fischer, G., A. Herrera y P.J. Almanza. 2011. Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) pp. 374-396. En: Yahia, E.M. (ed.) Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits. Vol. 2. Acai to citrus. Woodhead Publishing, Oxford, U.K.

Fischer, G.; Ebert, G. y Lüdders P. Provitamin A carotenoids, organic acids and ascorbic acid content of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) ecotypes grown at two tropical altitudes, Acta Hort , 2000. Vol. 531, 263-267.

Galvis J. A., Fischer G. and Gordillo O. 2005. 'Cosecha y poscosecha de la uchuva' , en Fischer G. , Miranda D. , Piedrahíta W. y Romero J. , Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en Colombia, Bogotá, Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia , 165-190.

Gutiérrez, M.S.; Trinchero, G.D.; Cerri, A.M.; Vilella, F.; Sozzi, G.O. 2008. Different responses of goldenberry fruit treated at four maturity stages with the ethylene antagonist 1-methylcyclopropene. Postharvest Biol. Technol. 48, 199–205.

Hernández M.S., O. Martínez y J.P. Fernández-Trujillo. 2007. Behavior of arazá (*Eugenia stipitata* Mc Vaugh) fruit quality traits during growth, development and ripening. Scientia Horticulturae 111, 220–227.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec]. 1999. Frutas frescas. Uchuva. Especificaciones. Norma Técnica Colombiana NTC 4580. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. 15 p.

Kader, A. A., (ed.), Postharvest technology of horticultural crops, 3rd., edition, California, University of California (System). Division of Agriculture and Natural Resources. ANR Publications, 2002, 535 p.

Kays, S., (ed.), Postharvest biology, Athens (Georgia), Exon Press. 2004, 568 p.

Majumder, K.; Mazumdar. B. Changes of pectic substances in developing fruits of cape-gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in relation to the enzyme activity and evolution of ethylene. Scientia Horticulturae 96, 91–101. 2002.

Mendoza, F., Dejmek, P., Aguilera, J. M., Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis, Postharvest Biology and Technology, Vol. 41, 2006, pp. 285-295.

Menéndez, O., Lozano, S. E., Arenas, M., Bermúdez, K., Martínez A., Jiménez, A., Cambios en la actividad de α-amilasa, pectinmetilesterasa y poligalacturonasa durante la maduración del maracuyá amarillo (*Passiflora edulis* Var. Flavicarpa Degener), Interciencia, Vol. 31, No. 10, 2006, pp. 728-733.

Morais, P.L.D.; Miranda, M.R.A.; Lima, L.C.O.; Alves, J.D.; Alves, R.E. y Silva. J.D. Cell wall biochemistry of sapodilla (*Manilkara zapota*) submitted to 1-methylcyclopropene, Braz. J. Plant Physiol., 2008. Vol. 20, No. 2, 85-94.

Novoa, R. H., Bojacá, M., Galvis, J. A., Fischer, G., La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12 °C (*Physalis peruviana* L.)., Agronomía Colombiana, Vol. 24, No. 1, 2006, pp. 77-86.

Osterloh, A., G. Ebert, W.H. Held, H. Schulz y E. Urban. 1996. Lagerung von Obst und Südfrüchten. Verlag Ulmer, Stuttgart. 253 p.

Proebsting, E. L. and A. Swindeman Murphey. 1987. Variability of fruit quality characteristics within sweet cherry trees in Central Washington. HortScience 22: 227-230.

Puente, L., C. Pinto-Muñoz, E. Castro y Misael Cortés. 2011. *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. Food Research International 44, 1733–1740.

Ramadan, M. 2011. Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. Food Research International 44 1830–1836.

Rincón, M., C.M. Buitrago, G.A. Ligarreto, W.S. Torres y H.E. Balaguera. 2012. Comportamiento del Fruto de Agraz (*Vaccinium meridionale* Swartz) Cosechado en Diferentes Estados de Madurez y Almacenado en Refrigeración. Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín 65(2): 6615-6625.

Santamaría, F. B., Sauri, E., Espadas, F., Díaz, R., Larqué, A., Santamaría, J. M., Postharvest ripening and maturity indices for maradol papaya., Interciencia, Vol. 34, No. 8, 2009, 583-588.

Shackel, K.,A., Greve, C., Labavitch, J. M., Ahmadi, H., Cell turgor changes associated with ripening in tomato pericarp tissue., Plant Physiol, Vol. 97, 1991, pp. 814-816.

Sora, A. D., Fischer, G., Flórez, R., Almacenamiento refrigerado de frutos de mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.) en empaques con atmósfera modificada., Agronomía Colombiana, Vol. 24, No. 2, 2006, pp. 306-316.

Superfruit. 2011. Uchuva - the superfruit. En: http://www.uchuvasuperfruit.com; consulta: 13 de agosto de 2011.

Trinchero, G.; Sozzi, G.; Cerri, A.M.; Vilella, F.; Fraschina, A. Ripening-related changes in ethylene production, respiration rate and cell-wall enzyme activity in goldenberry (*Physalis peruviana* L.), a solanaceous species. Postharvest Biol. Technol. 16, 139–145. 1999.

Valdenegro, M.; Fuentes, L.; Herrera, R.; Moya-León. M.A. Changes in antioxidant capacity during development and ripening of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit and in response to 1-methylcyclopropene treatment. Postharvest Biology and Technology 67,110–117. 2012.

Vicente, A. R., Saladié, M., Rose, J. K. C., Labavitch, J. M., The linkage between cell wall metabolism and fruit softening: looking to the future., J. Sci. Food. Agric., Vol. 87, 2007, pp. 1435-1448.

2.3 Papel del cáliz en el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo Colombia[4]

Paper calyx on postharvest behavior of cape gooseberry fruits (*Physalis peruviana* L.) ecotype Colombia

Helber Enrique Balaguera-López, Claudia Andrea Martínez Cárdenas y Aníbal Herrera Arévalo

2.3.1 Resumen

Los frutos de uchuva se desarrollan y permanecen dentro del cáliz. Se desconocen aspectos relacionados con el papel del cáliz en la fisiología del fruto de uchuva. El objetivo fue determinar el papel del cáliz en el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva ecotipo Colombia. Se utilizó un diseño completamente al azar con dos tratamientos, el primero correspondió a frutos con cáliz y el segundo fueron frutos sin cáliz. Los frutos fueron cosechados en el municipio de Ventaquemada (Boyacá), en grado de madurez 3 según la norma NTC 4580. Una vez cosechados los frutos fueron llevados al laboratorio y se dispusieron en cámaras de almacenamiento (16 ±1°C y humedad relativa del 80%) durante 22 días. Semanalmente se realizaron mediciones de parámetros fisicoquímicos. Se encontró un efecto positivo del cáliz durante el almacenamiento de los frutos de uchuva. Con diferencias estadísticas, los frutos con cáliz produjeron menor cantidad de etileno. Estos mismos frutos presentaron menor aumento de los sólidos solubles totales, de la relación de madurez y del índice de color. Los frutos con cáliz mayor firmeza, acidez total titulable y menor pérdida de peso respecto a frutos sin cáliz. Esto demuestra la gran importancia de mantener el cáliz unido a los frutos de uchuva durante la poscosecha.

Palabras clave: producción de etileno, maduración, frutos con cáliz, frutos sin cáliz.

---

[4]Artículo publicado en la Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas 8(2), 178-188. 2014.

2.3.2 Abstract

The fruit of cape gooseberry develop and remain within the calyx. Aspects related to the role of the calyx in cape gooseberry fruit physiology are unknown. The objective was to determine the role of the calyx on postharvest behavior of the cape gooseberry fruit, ecotype Colombia. Experimental design was completely randomized with two treatments, the first corresponded to fruit with calyx and the second were fruit without calyx. The fruits were harvested in Ventaquemada (Boyaca) municipality, in maturity grade 3, according to Icontec standard 4850. Once harvested the fruits were brought to the laboratory and placed in cold storage (16 ± 1 ° C and 80% relative humidity) for 22 days. Physicochemical parameters were measured periodically. A positive effect of the calyx was found during storage of the cape gooseberry fruits. With statistical differences, the ethylene concentration produced by the fruit with calyx was minor. These same fruits showed lower increase in total soluble solids, maturity ratio and color index. The fruit with calyx showed more firmness, total titratable acidity and lower weight loss compared to fruit without calyx. This shows the great importance of keeping the calyx attached to the cape gooseberry fruits during postharvest.

Key words: ethylene production, ripening, fruit with calyx, fruit without calyx.

2.3.3 Introducción

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) es una especie perteneciente a la familia Solanaceae, los frutos son bayas apetecidas por su sabor y también por sus propiedades funcionales y medicinales (Ramadan, 2011; Puente *et al*., 2011). Pertenece a la lista de los “Superfrutos” por su alto contenido de vitaminas, minerales y fibra (Superfruit, 2011). Fischer *et al*. (2011) reportan que el fruto de uchuva se destaca por su alto contenido en antioxidantes (ácido ascórbico y provitamina A), fósforo, hierro, proteína y fibra.

La uchuva es una de las pocas especies que presenta frutos que se forman y permanecen dentro del cáliz durante todo su desarrollo (Fischer *et al*., 2014), situación que indica la gran importancia que tiene el cáliz durante la pre y poscosecha del fruto. El cáliz mide

alrededor de 5 cm y su forma puede ser redonda o alargada (Fischer *et al*., 1997), crece a mayor velocidad que el ovario (Yamaguchi, 1983) y en la etapa de maduración el cáliz del ecotipo Colombia es de aproximadamente 2,5 veces la longitud del fruto (Valencia, 1985). El cáliz protege al fruto de condiciones climáticas extremas (sol, frío, granizo), daños mecánicos, enfermedades, insectos y aves (Fischer *et al*., 2014). En la base interior del cáliz se encuentra un tejido glandular que produce una "resina terpénica' cuya síntesis empieza aproximadamente cuando el fruto tiene un diámetro de 10 a 11 mm, y cubre el fruto hasta la madurez, esta resina posiblemente tiene funciones de repelente (Valencia, 1985). Al parecer, el cáliz tiene una función importante en la producción y en la translocación de carbohidratos, principalmente de sacarosa en la etapa temprana del crecimiento del fruto, con su eliminación, el desarrollo del fruto es más lento (Fischer y Lüdders, 1997). De acuerdo con la composición química, el cáliz se asemeja más a un fruto; sin embargo, según su anatomía es muy parecido a un órgano foliar (Fischer *et al*., 1997).

De acuerdo con Fischer *et al*. (2011) el cambio de color del cáliz y el fruto presentan sincronía. Cuando se produce la madurez fisiológica se generan cambios en el color del cáliz de verde claro a amarillo, lo que hace que esta característica sea adecuada para ser utilizada como índice de madurez (Fischer *et al*., 2011). En Colombia y en Estados Unidos, los consumidores prefieren los frutos sin cáliz, mientras que las exportaciones a Europa y Canadá se realizan con el cáliz. Debido al hecho de que las condiciones y requisitos para la exportación a Europa y los Estados Unidos son diferentes, las condiciones especiales en la cosecha, manejo poscosecha y comercialización son necesarios para cada uno de estos dos mercados importantes del mundo (García *et al*., 2008). Sin embargo, el cáliz no le da mayor valor agregado ni tampoco cumple con los requisitos logísticos de facilitar su transporte, manipulación, conteo, exhibición ni promociona su venta, pero el cáliz si se ajusta muy bien a las nuevas tendencias de los mercados que apuntan hacia el uso de empaques reciclables o biodegradables (García *et al*., 2014).

Son pocos los estudios que se han realizado sobre el efecto del cáliz en la calidad poscosecha de los frutos de uchuva. Al respecto, Lanchero *et al*. (2007) evaluaron el uso de empaques, concentraciones de gases para atmósfera modificada activa en frutos de uchuva con cáliz y sin cáliz, durante 4 semanas de almacenamiento a 7°C, los resultados indicaron que los frutos con cáliz presentaron mayor concentración de sólidos solubles totales, pH y acidez total titulable pero menor firmeza. Villamizar *et al*. (1993) almacenaron frutos de uchuva a 6 y 18°C, determinaron que la tasa respiratoria del fruto sin cáliz llega a ser 2,9 veces superior a la del fruto con cáliz, mientras que la duración poscosecha fue de 20 y 30 días, siendo mayor para frutos con cáliz. De otra parte, el cáliz también determina el porcentaje de humedad relativa durante el almacenamiento, García *et al*. (2014) mencionan que para la conservación de la uchuva con cáliz es recomendable mantenerla en ambientes de baja humedad relativa (60-70%), mientras que en el caso de la uchuva sin cáliz la condición es opuesta pues es recomendable mantenerla en ambientes de alta humedad (90-95%) para evitar la deshidratación de los frutos.

Sin embargo, aún faltan estudios detallados que permitan conocer con más exactitud el efecto del cáliz en la fisiología poscosecha del fruto de uchuva. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar el papel del cáliz en el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.), almacenados a temperatura ambiente, con el fin de obtener más conocimientos para mejorar el almacenamiento de esta especie.

2.3.4 Materiales y métodos

Se utilizaron frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo Colombia, cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada (departamento de Boyacá, Colombia), ubicado a 2630 msnm con temperatura ambiental promedio de 14°C. Los frutos fueron llevados al laboratorio de Poscosecha de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá para el montaje del experimento y las respectivas mediciones.

Se utilizó un diseño completamente al azar con dos tratamientos, el primero correspondió a frutos con cáliz y el segundo fueron frutos sin cáliz, cada tratamiento se repitió cuatro veces, para un total de 8 unidades experimentales (UE). Cada UE estuvo compuesta por 125 g de frutos aproximadamente. Los frutos fueron recolectados en el estado 3 según la norma Icontec NTC 4580 (1999), se utilizaron frutos completamente sanos y con tamaño homogéneo. Los frutos se dispusieron en cámaras de almacenamiento con temperatura promedio de 16±1°C y humedad relativa del 80%.

A los 1, 8, 15 y 22 d después de cosecha (ddc) se hicieron mediciones del índice de color (IC, ecuación 1), calculado a partir de parámetros del sistema CIELab L*, a* y b*, se realizaron tres lecturas en el diámetro ecuatorial de cada fruto con colorímetro digital Minolta CR 410 (marca Konica Minolta, Hong Kong); firmeza del fruto (N): mediante la utilización de un Texturómetro digital (marca Lloyd LS1, Bognor Regis, Sussex Occidental, Reino Unido) con celda de carga de 1 KN, punzón cilíndrico de 3mm y software Nexygen plus; pérdida de peso (%): se calculó mediante la ecuación 2, realizando mediciones de peso fresco en balanza de precisión con aproximación de 0,01 g; sólidos solubles totales (SST): se hizo a través de mediciones de grados Brix con un refractómetro digital (marca Hanna, Woonsocket, U.S.A.) de rango 0 a 85% con precisión 0,1 °Brix; la acidez total titulable (ATT) se determinó con titulador automático 916 Food Ti-Touch 120 (marca Metrohm, Herisau, Suiza); la relación de madurez (RM) se calculó como la relación SST/ATT.

$IC = (1000 \times a^*)/(L^* \times b^*)$ (1)

Pérdida de peso (%) = $((P_1-P_2)/P_1)\times 100$ (2)

Dónde: P_1=peso de frutos a tiempo inicial y P_2=peso de frutos a tiempo final.

Producción de etileno (µL C_2H_4 kg^{-1} h^{-1}): se pesaron aproximadamente 100 g de frutos de uchuva que fueron puestos en cámaras herméticas de vidrio de 500 cm^3 durante 1 hora, al cabo de este tiempo se extrajo una muestra de 0,3 mL de gas y fue inyectada en el cromatógrafo de gases (CG) Agilent Technologies 7890A (Agilent Technologies, Santa Clara, CA), equipado con un detector de ionización de llama (FID, por su siglas en inglés). Se utilizó una columna HP-PLOT (30m x 0,55mm x 40µm). Las condiciones

cromatográficas fueron las siguientes: temperatura del inyector de 70 °C, temperatura del horno de 50 °C y temperatura del detector FID de 250 °C. Se empleó helio como gas de arrastre a un flujo de 7.0 mL min^{-1} y los gases de combustión del detector FID fueron aire seco e hidrógeno con flujos de 300 y 40 mL min^{-1}, respectivamente. Para la cuantificación se realizó curva de calibración con un patrón de etileno (AGA, Bogotá). Con los datos obtenidos se realizó a un análisis de varianza (Anova) utilizando el software SAS v. 9.2 (Cary, N.C).

2.3.5 Resultados y discusión

Producción de etileno

Se observó un aumento representativo de la producción de etileno en los dos tratamientos a los 3 ddc, luego, la emisión de etileno disminuyó de forma progresiva. No obstante, la producción de etileno fue significativamente mayor en los frutos sin cáliz hasta los 14 ddc, posteriormente los niveles de etileno fueron similares (Figura 2-11). Estos resultados responden a la hipótesis que plantearon Galvis *et al*. (2005) y Fischer *et al*. (2011), quienes reportaron la posibilidad de que los frutos con cáliz podían generar menores niveles de etileno. Además, menores niveles de etileno en los frutos con cáliz estarían relacionados con un menor grado de deterioro poscosecha.

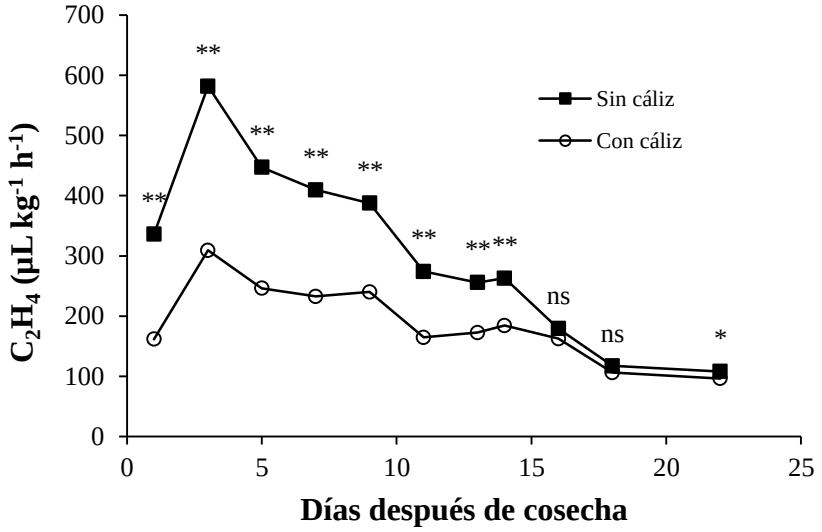


Figura 2-11: Efecto de la presencia del cáliz sobre la producción de etileno de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas.

La mayor producción de etileno en frutos sin cáliz, puede deberse a que según Galvis *et al*. (2005), la eliminación del cáliz genera una herida en el fruto que estimula la producción de etileno. Además, el cáliz puede funcionar como una especie de atmósfera modificada pasiva que limita la entrada de O_2 al fruto, de esta manera se puede reducir la síntesis de etileno, ya que de acuerdo con Cara y Giovannoni (2008), la enzima ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico oxidasa (ACO) que cataliza el último paso en la biosíntesis de etileno, requiere la presencia de O_2. Además, el cáliz protege de daños mecánicos (Fischer *et al*., 2011), por lo que disminuye la producción de etileno como consecuencia del manejo poscosecha (selección, clasificación, empaque, transporte, etc.).

Pérdida de peso

Se presentaron diferencias estadísticas a los 8 y 22 ddc. En los frutos sin cáliz la pérdida de peso fue lineal, con un valor de 14,9% al final del almacenamiento, mientras que los frutos con cáliz tuvieron una pérdida de 10,6%, no obstante, a los 8 ddc, la pérdida de peso de estos frutos fue superior a los frutos sin cáliz (Figura 2-12). El cáliz puede ser considerado como un órgano de intercambio gaseoso, tal como lo reportan Kitagawa y Glucina (1984) para frutos de caqui (*Diospyros kaki* Thunb.), por esta razón, en los primeros días de almacenamiento, la pérdida de peso en los frutos con cáliz depende más del cáliz que del fruto. De manera similar, a los 5 ddc se observó alta pérdida de peso en frutos de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm) con la presencia del cáliz (Cruz-Álvarez *et al*., 2012). Sin embargo, cuando el cáliz ya está seco, la pérdida de peso se debe casi que en su totalidad a los frutos, pero interesantemente, al final del almacenamiento, los frutos con cáliz presentaron menor pérdida de peso que frutos sin cáliz.

Las principales causas de pérdida de peso en los productos agrícolas cosechados son la respiración y la transpiración (Kader, 2002). En concordancia, García y Torres (2005) afirman que el cáliz constituye el mejor empaque para la uchuva, ya que cumple con la mayoría de las funciones de un empaque; protege el fruto del daño mecánico (amortigua los impactos), protege de la abrasión por el transporte en carreteras destapadas, de la

compresión por sobrellenado de los empaques o por columnas muy altas en los empaques. El cáliz deshidratado protege los frutos contra hongos y además favorece la modificación de la atmósfera. Por su parte, Galvis *et al*. (2005) reportan que el cáliz protege no solamente contra daños físicos, sino también contra los cambios bruscos de temperatura y humedad relativa durante el manejo poscosecha, que pueden afectar el fruto. Por tanto, los frutos de uchuva con cáliz presentan menor posibilidad de perder peso por respiración y transpiración, que a su vez es un indicativo de que pueden presentar un mejor comportamiento poscosecha que frutos sin cáliz.

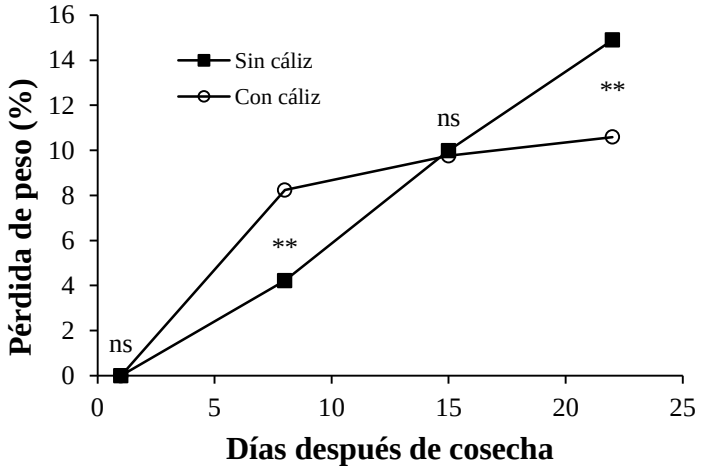


Figura 2-12: Efecto de la presencia del cáliz sobre la pérdida de peso de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas.

Resultados similares fueron mencionados por García *et al*. (2014), quienes reportan resultados de pérdida de peso de frutos de uchuva en dos grados de madurez, empacados en empaques tipo PVC (policloruro de vinilo) o PET (polietileno tereftalato), con y sin cáliz, respecto a este último factor, los autores encontraron que los frutos con cáliz tuvieron mayor duración poscosecha (35 d), y en los 15 d que permanecieron los frutos sin cáliz en buen estado, presentaron mayor pérdida de peso que los frutos con cáliz.

Firmeza

Disminuyó continuamente durante el almacenamiento, lo cual está en concordancia con lo reportado por varios autores (Ciro *et al*., 2007; Ciro y Osorio, 2008). Se presentaron

diferencias estadísticas a los 22 ddc, los frutos con cáliz presentaron la mayor firmeza (Figura 2-13). Por el contrario, Lanchero *et al*. (2007) encontraron que frutos sin cáliz tuvieron mayor firmeza.

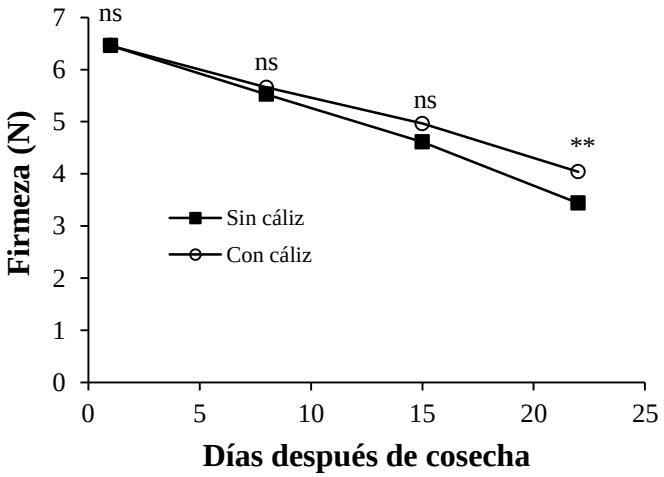


Figura 2-13: Efecto de la presencia del cáliz sobre la firmeza de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas.

Una de las principales causas de pérdida de firmeza en frutos es la actividad de enzimas que hidrolizan polisacáridos estructurales y de reserva (Kays, 2004). Se ha encontrado que en frutos de uchuva la actividad de enzimas como la poligalacturonasa (PG), pectinmetilesterasa y algunas glicosidasas al parecer están relacionadas con la pérdida de firmeza del fruto (Trinchero *et al.*, 1999), donde la PG correlaciona con la presencia de etileno en el fruto (Majumder y Mazumdar 2002), esto puede indicar la posible relación que hay entre la presencia de etileno y la pérdida de firmeza de los frutos de uchuva, y coincide con lo encontrado en este estudio, donde los frutos con cáliz que presentaron menor producción de etileno tuvieron la menor pérdida de firmeza.

Color de la epidermis

En el cáliz, el IC aumentó de forma representativa del 1 al 15 ddc para permanecer casi estable hasta el día 22 ddc, pasando de -6,96 en el día 1 a -0,78 en el día 22 ddc (Figura 2-14A). Esto indica que durante el almacenamiento, el cáliz perdió la coloración verde y adquirió una tonalidad café, posiblemente por la degradación de clorofilas (Taiz y Zeiger, 2006). En concordancia, Ligarreto *et al*. (2005) reportan que el cáliz al madurar adquiere

una textura similar a la del pergamino y su color se vuelve “pajizo”. Fischer *et al*. (2011) mencionan que el cambio de color del cáliz y el fruto presentan sincronía. Lo cual concuerda con los resultados de este estudio, pues el IC de los frutos también presentó un continuo aumento durante el almacenamiento, que coincide con el incremento del IC durante la maduración reportado por Balaguera-López *et al*. (2014).

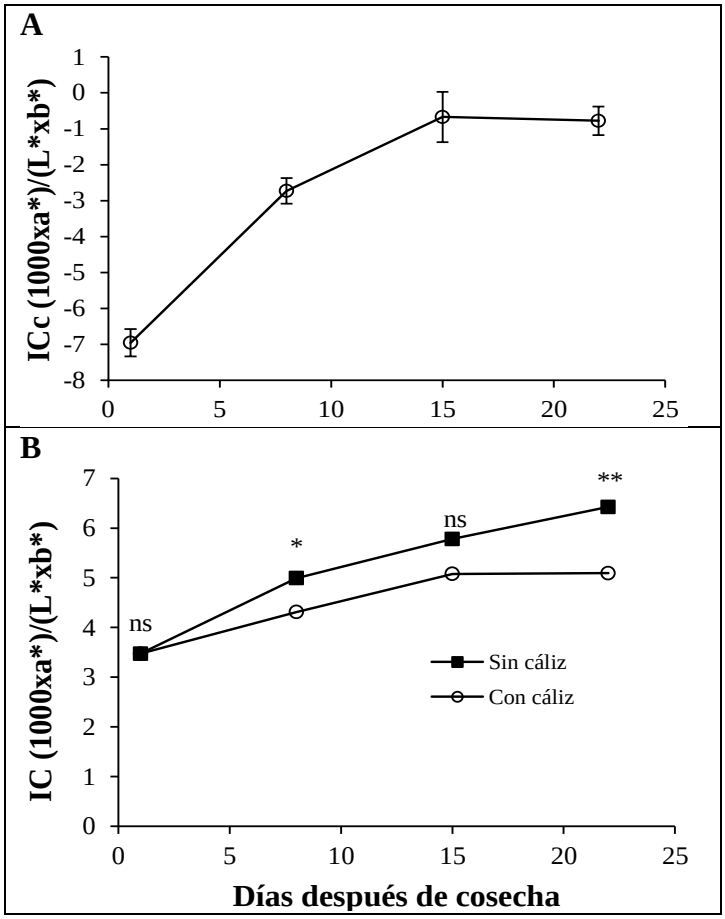


Figura 2-14: Efecto de la presencia del cáliz sobre el índice de color (IC) de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). A. Cáliz B. Fruto. ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas. Barras verticales indican el error estándar (n=4).

Con diferencias estadísticas a los 8 y 22ddc, los frutos con cáliz presentaron menor IC (Figura 2-14B). Los cambios de color del fruto de uchuva se deben a la degradación de la clorofila y a la acumulación de carotenoides en plástidos (Trinchero *et al*., 1999), principalmente β-caroteno (Fischer *et al*., 2000). Además, el cambio de color en uchuva está relacionado con la presencia de etileno (Valdenegro *et al*., 2012; Gutiérrez *et al*.,

2008). Es posible que el menor IC en frutos con cáliz se deba a una menor acumulación de carotenoides, como resultado de un proceso de maduración más lento, pues estos frutos produjeron significativamente menor cantidad de etileno.

Sólidos solubles totales

Los frutos sin cáliz tuvieron un incremento continuo de los SST durante el almacenamiento, en los frutos sin cáliz este aumento fue significativamente menor después de los 8 ddc (Figura 2-15). El incremento de los SST en uchuva también fue observado por Fischer y Martínez (1999). Este aumento se debe posiblemente a la hidrólisis del almidón y de los polisacáridos de la pared celular que dan origen a azúcares solubles (Kays, 2004; Menéndez *et al*., 2006), esto indica que los frutos desprovistos de cáliz presentan un proceso de maduración acelerado, tal vez por una mayor producción de etileno al generar desprendimiento del cáliz, y como consecuencia, presentan mayor acumulación de SST. Estos resultados confirman la importancia de la presencia del cáliz como retardante natural de la maduración del fruto de uchuva. De otra parte, Fischer y Lüdders (1997) mencionan que el cáliz puede ser una fuente importante de carbohidratos para el fruto, principalmente de sacarosa. Teniendo en cuenta que los SST fueron estadísticamente similares hasta los 8 ddc, es posible pensar que durante la primera semana de almacenamiento el cáliz aún tenga la capacidad de translocar sacarosa al fruto, que se refleja en un alto valor de SST.

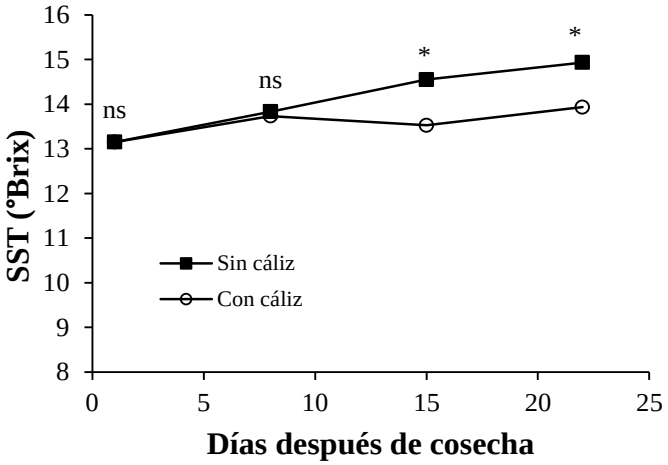


Figura 2-15: Efecto de la presencia del cáliz sobre los sólidos solubles totales (SST) de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas.

Acidez total titulable

Disminuyó de manera constante, con diferencias estadísticas de los 8 a los 22 ddc, frutos con cáliz presentaron mayor ATT durante el almacenamiento (Figura 2-16). Generalmente la ATT disminuye cuando avanza el proceso de maduración, tal como se encontró para frutos de uchuva por Fischer y Martínez (1999), este comportamiento se debe a que los ácidos orgánicos son utilizados como sustratos de la respiración (Kader, 2002) o son convertidos en azúcares mediante gluconeogénesis, por lo que la maduración genera un descenso en la acidez, por tanto, los frutos con cáliz que presentan un proceso de maduración más lento, presentan mayor ATT que los frutos sin cáliz, tal como lo reportan Lanchero *et al*. (2007).

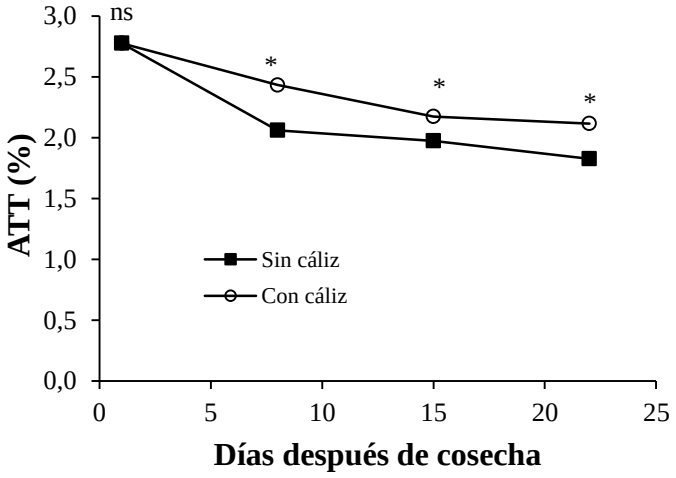


Figura 2-16: Efecto de la presencia del cáliz sobre la acidez total titulable (ATT) de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas.

Relación de madurez

Aumentó durante la poscosecha en los dos tratamientos, no obstante, el aumento fue menor con los frutos con cáliz, se presentaron diferencias estadísticas desde los 8 ddc (Figura 2-17). El incremento de la relación de madurez en todos los dos tratamientos se debe a que los SST aumentaron y la ATT disminuyó. La relación de madurez es un indicativo del grado de maduración de los frutos de uchuva (Osterloh *et al*., 1996) que está relacionado con la presencia de etileno en uchuva (Valdenegro *et al*., 2012), al respecto,

Grierson (2014) mencionan que la herida que deja el cáliz cuando se retira puede estimular la maduración del fruto, por esta razón, los frutos de uchuva con cáliz que produjeron menos etileno presentaron una maduración más lenta que se evidenció también por una menor relación de madurez. Estos resultados muestran la importancia del cáliz para retrasar el proceso de maduración en los frutos de uchuva. Lo anterior indica que los frutos de uchuva con cáliz conservan la calidad por más tiempo. Al respecto, Alvarado *et al*. (2004) mencionan que los frutos sin cáliz deben comercializarse más rápidamente que los frutos con cáliz, debido a que el cáliz les brinda mayor protección, prolonga su vida útil y garantiza la calidad hasta llegar al consumidor.

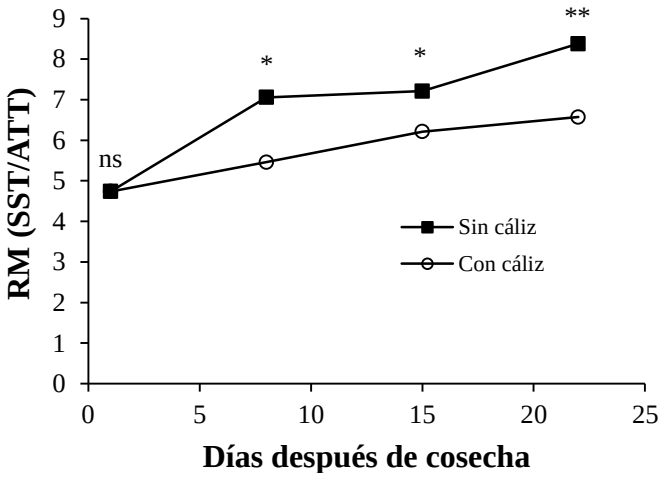


Figura 2-17: Efecto de la presencia del cáliz sobre la relación de madurez (RM) de frutos de uchuva ecotipo Colombia almacenados a temperatura ambiente (16 ±1°C). ** Diferencias significativas al 1%, * Diferencias significativas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas.

2.3.6 Conclusiones

La presencia del cáliz en los frutos de uchuva garantiza un mejor comportamiento poscosecha. El cáliz disminuyó significativamente la producción de etileno en comparación con frutos sin cáliz, como consecuencia, la pérdida de peso, de firmeza y de acidez total titulable fue menor. En frutos con cáliz, el cambio de color fue más lento al igual que la acumulación de sólidos solubles totales y la relación de madurez.

2.3.7 Bibliografía

Balaguera-López, H.E., L.V. Ramírez y A. Herrera. 2014. Fisiología y bioquímica del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) durante la maduración y poscosecha. pp. 113-131. En: Carvalho, C.P. y D.A. Moreno (eds.). *Physalis peruviana*: fruta andina para el mundo. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo-CYTED, Limencop SL, Alicante, España.

Cara, B. y J. Giovannoni. 2008. Molecular biology of ethylene during tomato fruit development and maturation. Plant Sci. 175, 106–113.

Ciro, H., O. Buitrago y S. Pérez. 2007. Estudio preliminar de la resistencia mecánica a la fractura y fuerza de firmeza para fruta de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 60 (1), 3785−3796.

Ciro, H., y J. Osorio. 2008. Avance experimental de la ingeniería de postcosecha de frutas colombianas: resistencia mecánica para frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Dyna. 75 (154), 39-46.

Cruz-Álvarez, O., M.T. Martínez-Damián, J.E. Rodríguez-Pérez, M.T. Colinas-León y E. Moreno-Pérez. 2012. Conservación poscosecha de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot. ex Horm.) con y sin cáliz. Rev. Chapingo Ser. Hortic. 18 (3), 333-344.

Fischer, G. y O. Martínez 1999. Calidad y madurez de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en relación con la coloración del fruto, Agron Colomb, 16(1-3), 35-37.

Fischer, G. y P. Lüdders. 1997. Developmental changes of carbohydrates in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits in relation to the calyx and the leaves. Agron. Colomb. 14, 95-107.

Fischer, G., A. Herrera y P.J. Almanza. 2011. Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) En: Yahia, E.M. (ed.). Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits. Acai to citrus. Cambridge: Woodhead Publishing.

Fischer, G., P. Lüdders y F. Torres. 1997. Influencia de la separación del cáliz de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) sobre el desarrollo del fruto, Revista Comalfi 24(1-2), 3-16.

Fischer, G., P.J. Almanza-Merchán y D. Miranda. 2014. Importancia y cultivo de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). Rev. Bras. Frutic. 36(1), 1-15.

Galvis, J.A., Fischer G. y Gordillo O. 2005. Cosecha y poscosecha de la uchuva. pp. 165-190. En: Fischer G., D. Miranda, W. Piedrahita y J. Romero (ed.). Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en Colombia, Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

García, H.R., A. C. Peña y C. García. 2008. Manual de práctica de cosecha y acondicionamiento de la uchuva con fines de exportación, Corpoica, Bogotá,

García, M.C. y M. Torres. 2005. Evaluación preliminar de algunos empaques como alternativa para prolongar la vida titil de la uchuva. En: http://www.frutasyhortalizas.com.co; consulta: febrero de 2005.

García, M.C., A.C. Peña y B. Brito. 2014. Desarrollo tecnológico para el fortalecimiento del manejo poscosecha de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). pp. 80-112. En: Carvalho, C.P. y D.A. Moreno (eds.). *Physalis peruviana*: fruta andina para el mundo. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo-CYTED, Limencop SL, Alicante, España.

Grierson, D. 2013. Ethylene and the Control of Fruit Ripening. pp. 43-74. En: Seymour, G., M. Poole, J. Giovannoni y G. Tucker (eds.). The Molecular Biology and Biochemistry of Fruit Ripening. John Wiley & Sons, Inc. Iowa, USA.

Gutiérrez, M.S., G.D. Trinchero, A.M. Cerri, F. Vilella y G.O. Sozzi. 2008. Different responses of goldenberry fruit treated at four maturity stages with the ethylene antagonist 1-methylcyclopropene. Postharvest Biol. Technol. 48, 199–205.

Icontec. 1999. Frutas frescas. Uchuva. Especificaciones. Norma Técnica Colombiana NTC 4580. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá.

Kader, A.A. (ed.). 2002. Postharvest technology of horticultural crops, 3rd ed. Division of Agriculture and Natural Resources, ANR Publications, University of California, Oakland, CA.

Kays, S. (ed.), 2004. Postharvest biology, Exon Press, Athens, GA.

Kitagawa, H. y P.G. Glucina. 1984. Persimmon Culture in New Zealand. Science Information Publishing Center, Wellington, New Zealand

Lancheros O., G. Velandia, G. Fischer, N. Varela y H. García. 2007. Comportamiento de la uchuva (*Physalis peruvian*a L.) en poscosecha bajo condiciones de atmosfera modificada activa. Rev. Corpoica Ciencia Tecnol. Agropec. 8(1), 61-68.

Ligarreto, G., M. Lobo y A. Correa. 2005. Recursos genéticos del genero Physalis en Colombia. pp. 9-27. En: Fischer G., D. Miranda, W. Piedrahita y J. Romero (ed.). Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en Colombia, Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Majumder, K. y B. Mazumdar. 2002. Changes of pectic substances in developing fruits of cape-gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in relation to the enzyme activity and evolution of ethylene. Sc. Hortic. 96, 91-101.

Menéndez, O., S.E. Lozano, M. Arenas, K. Bermúdez, A. Martínez y A. Jiménez. 2006. Cambios en la actividad de α-amilasa, pectinmetilesterasa y poligalacturonasa durante la maduración del maracuyá amarillo (*Passiflora edulis* var. flavicarpa degener). Interciencia, 31(10), 728-733.

Novoa R., M. Bojacá, A. Galvis y G. Fischer. 2006. La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12°C (*Physalis peruviana* L.). Agron. Colomb. 24 (1), 77-86.

Osterloh, A., G. Ebert, W.H. Held, H. Schulz y E. Urban. 1996. Lagerung von Obst und Südfrüchten. Verlag Ulmer, Stuttgart, Alemania.

Puente, L., C. Pinto-Muñoz, E. Castro y M. Cortés. 2011. *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. Food Res. Int. 44, 1733–1740.

Ramadan, M. 2011. Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. Food Res. Int. 44, 1830–1836.

Superfruit. 2011. Uchuva - the superfruit. En: http://www.uchuvasuperfruit.com; consulta: 13 de agosto de 2011.

Taiz, L. y E. Zeiger. 2006. Plant physiology. 4th ed. Sinauer Associates Publishers, Sunderland, MA.

Cara, B. y J. Giovannoni. 2008. Molecular biology of ethylene during tomato fruit development and maturation. Plant Science 175, 106–113.

Valdenegro, M., L. Fuentes, R. Herrera y M.A. Moya-León. 2012. Changes in antioxidant capacity during development and ripening of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit

and in response to 1-methylcyclopropene treatment. Postharv. Biol. Technol. 67,110-117.

Valencia M. L. 1985. Anatomía del fruto de la uchuva. Acta Biol. Colomb. 1(2), 63-89.

Villamizar F., A. Ramírez y M. Meneses. 1993. Estudio de la caracterización física, morfológica y fisiológica poscosecha de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). AgroDesarrollo 4 (1-2), 305-320.

Yamaguchi, M. 1983. World vegetables. Principles, production and nutritive values, AVI Publishing, Westport, CT.

2.4 Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno en la emisión de compuestos volátiles durante la poscosecha de frutos de uchuva[5]

Effect of Ethylene and 1-methylcyclopropene on the emission of volatile compounds during post-harvest of cape gooseberry fruits

H. Balaguera-López, L. Ramírez, M. Espinal y A. Herrera

2.4.1 Resumen

Los frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L., familia solanaceae) son bayas con comportamiento climatérico, altamente perecederos. Durante la maduración del fruto de uchuva, los esteres son los compuestos volátiles emitidos en mayor cantidad. Sin embargo, se desconoce el efecto que pueda tener el etileno y el 1-metilciclopropeno como reguladores de la maduración, sobre la emisión de esteres volátiles en uchuva. En muchos frutos se ha encontrado que el etileno estimula la producción de esteres, mientras que el 1-metilciclopropeno inhibe la biosíntesis de estos compuestos, lo cual, puede afectar la calidad del fruto. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de etileno y 1-metilciclopropeno sobre la emisión de esteres volátiles durante el almacenamiento a temperatura ambiente de frutos de uchuva. Los frutos de uchuva ecotipo Colombia fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá, Colombia. Se utilizó un diseño completamente al azar con 3 tratamientos, estos fueron: etileno (100 mg L^{-1}), 1-metilciclopropeno (1-MCP; 10 mg L^{-1}) y un testigo sin aplicación. La exposición de los frutos al tratamiento de etileno tuvo una duración de 48 h, mientras que el tratamiento de 1-MCP fue de 24 h. Después de los tratamientos, todos los frutos fueron empacados en termoformados de polietilentereftalato (PET) y fueron dejados a temperatura ambiente (20°C, 75% HR). Se hicieron mediciones de compuestos volátiles a los 1, 6 y 11 días después de cosecha. Se realizó la extracción de compuestos volátiles

[5]Artículo publicado en las memorias del VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas, pp. 1736-1741. 2013. ISBN - 13 978-84-695-9055-3

mediante microextracción en fase sólida con espacio de cabeza HS-SPME, para la identificación de compuestos volátiles se utilizó cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7890A acoplado a un espectrómetro de masas Agilent Technologies 5975C, los espectros obtenidos fueron comparados con aquellos de la librería NIST 8. El índice de Kovats se calculó usando la serie homóloga de n-alcanos bajo las mismas condiciones de operación.

Se encontró que algunos esteres como octanoato de etilo, butanoato de etilo, butanoato de 2-metilpropilo, butanoato de butilo, octanoato de metilo, decanoato de etilo y dodecanoato de etilo al parecer están regulados por etileno durante la maduración del fruto de uchuva, los resultados indicaron que estos compuestos incrementaron su concentración relativa en presencia de etileno y se inhibieron parcialmente con la aplicación de 1-metilciclopropeno. Los resultados sugieren que la emisión de algunos compuestos volátiles del fruto de uchuva pueden estar determinados por la presencia de etileno.

Palabras clave: esteres volátiles, octanoato de etilo, microextracción en fase sólida.

2.4.2 Abstract

Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L., solanaceae family) fruits are highly perishable berries showing climateric behavior. During ripening of cape gooseberry fruits esters are the most emitted volatile compounds. However, the effect that ethylene and 1-methylcyclopropene may have as ripening regulators on the emission of volatile esters in cape gooseberry is unknown. In many fruits it has been found that ethylene stimulates ester production while 1-methylcyclopropene inhibits the biosynthesis of these compounds, which can affect fruit quality. The objective of this work was to assess the effect of the application of ethylene and 1-methylcyclopropene on the emission of volatile esters in cape gooseberry fruits during storage at ambient temperature. Cape gooseberry fruits from "Colombia" ecotype were harvested from a commercial orchard at the municipality of Ventaquemada, Boyaca-Colombia. A completely randomized design was used with the 3 following treatments: ethylene (100 mg L^{-1}), 1-methylcylopropene (1-MCP; 10 mg L^{-1}) and a control without application whatsoever. Exposition of fruits to the

treatment with ethylene lasted for 48 h, while the treatment with 1-MCP lasted for 24 h. After the treatments all the fruits were packed in polyethylenetereftalate (PET) thermoformed packages and were placed at ambient temperature (20°C, 75% RH). Measurements of volatile compounds were carried out at 1, 6 and 11 days after harvest. The extraction of volatile compounds was carried out by solid-phase microextraction with HS-SPME head space. For identifying volatile compounds a gas chromatograph Agilent technologies 7890A attached to 5975C mass spectrometer was used, and the spectra obtained were compared with those from the NIST 8 data system libraries. The Kovats index was calculated using the n-alkanes homologous series under the same operating conditions.

It was found that some esters such as ethyl octanoate, ethyl butanoate, 2-methylpropyl-butanoate, butyl butanoate, methyl octanoate, ethyl decanoate, and ethyl dodecanoate apparently are regulated by ethylene during ripening of cape gooseberry fruits. The results indicated that these compounds increased their relative concentration in the presence of ethylene and were partially inhibited with the application of 1-methylcyclopropene. The results suggest that the emission of some of the volatile compounds of cape gooseberry a fruits can be determined by the presence of ethylene.

Keywords: volatile esters, ethyl octanoate, solid-phase microextraction.

2.4.3 Introducción

El etileno ha sido reconocido como la hormona que acelera la maduración de los frutos. La exposición de frutos al etileno acelera los procesos asociados con la maduración. Sin embargo, no todos ellos responden al etileno (Taiz y Zeiger, 2006). La principal respuesta favorable del etileno es la inducción de una maduración más rápida y uniforme. Al respecto, se ha encontrado que aplicaciones de etileno superiores a 10 µL L^{-1} tienen un impacto positivo en la producción de compuestos volátiles de frutos de peras maduradas a 20°C (Villalobos-Acuña y Mitcham, 2008). Estudios previos han reportado el papel del etileno en la inducción de esteres en frutos climatéricos (Flores et al., 2002; Beekwilder et al., 2004; Defilippi et al., 2004), en particular en el control de la enzima alcohol acil transferasa (Yahyaoui et al., 2002; Defilippi et al., 2005). En frutos de papaya se necesitan

niveles internos de etileno sobre 0,4 ppm para incrementar los esteres (Fuggate et al., 2010). En concordancia, en manzanas se encontró que la producción de esteres y alcoholes es etileno dependiente (Dandekar et al., 2004; Defilippi et al., 2004). Asimismo, en frutos de papayuela (*Carica pubescens*) se encontró que el tratamiento con etileno exógeno incrementó el contenido de esteres, principales componentes del aroma de esta especie (Balbontín et al., 2007).

Por su parte, el 1-metilciclopropeno (1-MCP) es un retardante químico de la madurez que ocupa los receptores de etileno en la membrana, por tanto, evita la unión del etileno con su receptor y su acción. La afinidad del 1-MCP por los receptores es 10 veces mayor a la del etileno y actúa a más bajas concentraciones, también regula la biosíntesis de etileno a través de la inhibición del proceso autocatalítico (Blankenship y Dole, 2003), es altamente eficaz para proteger a muchas especies agrícolas de la acción del etileno (Serek et al., 2006; Watkins, 2006).

Se ha encontrado que el contenido total de volátiles disminuye con la aplicación de 1-MCP, pero los volátiles individuales son afectados diferencialmente (Marin et al., 2009; Bai et al., 2005). En frutos de manzana, Defilippi et al. (2004) y Kondo et al. (2005) encontraron disminución de la producción de esteres y alcoholes por el 1-MCP. Asimismo, la expresión de cuatro genes de alcohol acil transferasa fueron suprimidos por el 1-MCP en melón (El-Sharkawy et al., 2005), Defilippi et al. (2005) también encontraron que la actividad de la alcohol acil transferasa fue más baja con 1-MCP, al igual que la cantidad de esteres, sugiriendo que este paso en la síntesis de volátiles está regulado por el etileno. Marin et al. (2009) también reportan disminución de los esteres con la aplicación de 1-MCP.

Por lo anterior, y debido a que los esteres son los compuestos volátiles mayoritarios durante la maduración del fruto de uchuva, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de etileno y 1-metilciclopropeno sobre la emisión de esteres volátiles durante el almacenamiento a temperatura ambiente de frutos de uchuva ecotipo Colombia.

2.4.4 Material y métodos

Los frutos de uchuva ecotipo Colombia fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá, ubicado a 2630 msnm con temperatura ambiental promedio de 12°C. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Poscosecha de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Se utilizó un diseño completamente al azar con 3 tratamientos, estos fueron: etileno (100 mg L^{-1}), 1-metilciclopropeno (1-MCP; 10 mg L^{-1}) y un testigo sin aplicación. Cada tratamiento tuvo 3 repeticiones, para un total de 9 unidades experimentales (UE). Cada UE estuvo compuesta por 125g de frutos sin cáliz, cosechados en estado pintón con los siguientes valores de color: L*=70,85, a*=-6,77, b*=51,11 y IC=-2,09.

Para la aplicación de etileno se utilizó una cámara hermética de 10L acoplada a un cilindro de etileno, el tratamiento tuvo una duración de 48 h. Para el 1-MCP (Rohm and Haas), se pesó la cantidad necesaria en un baker, el cual se ubicó dentro de una cámara hermética de 2L junto con los frutos, por medio de una septa se inyectó 30 mL de agua caliente (45-50°C). La disolución del 1-MCP en el agua caliente generó la liberación al espacio de cabeza del 1-MCP gaseoso. Los frutos fueron expuestos al tratamiento por 24 h a temperatura ambiente. Después de los tratamientos, todos los frutos fueron empacados en termoformados de polietilentereftalato (PET) y fueron dejados a temperatura ambiente (20°C, 75% HR). Se hicieron mediciones de compuestos volátiles y del índice de color a los 1, 6 y 11 días después de cosecha. El índice de color (IC, ecuación 1) se calculó a partir de parámetros del sistema CIELab L*, a* y b*.

$$IC= (1000 \times a^*)/(L^* \times b^*) \quad (1)$$

Los compuestos volátiles analizados fueron octanoato de etilo, butanoato de etilo, butanoato de 2-metilpropilo, butanoato de butilo, octanoato de metilo, decanoato de etilo y dodecanoato de etilo, fueron expresados en unidades de área/µL, para lo cual se realizó microextracción en fase sólida con espacio de cabeza HS-SPME, para la identificación de compuestos volátiles se utilizó un cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7890A acoplado a un espectrómetro de masas Agilent Technologies 5975C, los espectros

obtenidos fueron comparados con aquellos de la librería NIST 8. El índice de Kovats se calculó usando la serie homóloga de n-alcanos bajo las mismas condiciones de operación.

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey ($P \leq 0,05$).

2.4.5 Resultados y discusión

Color epidermis

El color de la epidermis a través del IC se determinó para monitorear el efecto de los tratamientos sobre la maduración del fruto de uchuva. Se encontró que el IC incrementó durante el almacenamiento, sin embargo, este cambio fue significativamente más bajo en los frutos tratados con 1-MCP, mientras que con etileno y el testigo el cambio fue más rápido (Figura 2-18). Estos resultados indican que con el 1-MCP se retrasó el proceso de maduración. Estudios recientes muestran que 1-MCP disminuyen la actividad de clorofilasa y disminuyen la pérdida de clorofila (Watkins, 2006; Sun et al., 2012). Frutos de tomate tratados con 1-MCP mostraron baja acumulación de licopeno y el cambio de color fue más lento (Zhang et al., 2009). En frutos de pera, el 1-MCP (0,3 μLL^{-1}) fueron suficientes para incrementar la vida poscosecha y retrasar el cambio del color de la epidermis (Villalobos et al., 2011). Gutiérrez et al. (2008) reportan que el 1-MCP retrasa el cambio de color en frutos de uchuva, principalmente en frutos pintones, lo cual coincide con lo encontrado en este estudio.

Respecto al efecto del etileno, se ha encontrado que este tratamiento acelera la degradación de la clorofila y la aparición de los colores rojo, amarillo, naranja etc., ya que interviene en la expresión de genes que codifican para carotenoides y otros compuestos (Rodrigo y Zacarías, 2007). Sin embargo, los resultados obtenidos fueron similares al testigo, tal vez porque los frutos se encontraban en un estado de madurez en el cual la respuesta a etileno ya no es muy notoria, además, el color externo del fruto en el momento del tratamiento es un factor importante en la respuesta, siendo mayor el cambio cuando el grado de desarrollo del color es menor (Martínez-Jávega et al., 2008).

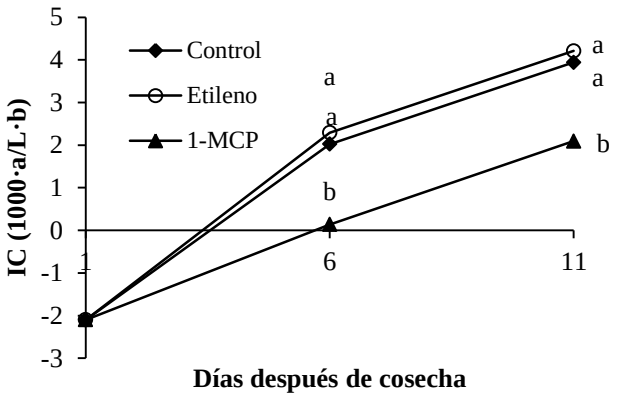


Figura 2-18: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre el índice de color de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%).

Emisión de compuestos volátiles

El octanoato de etilo fue el compuesto volátil de mayor abundancia en los frutos de uchuva, al parecer su síntesis depende de la presencia de etileno, pues en el testigo y con etileno la concentración de este compuesto volátil fue alta, siendo mayor con etileno, después del día 6 el octanoato de etilo disminuyó en estos dos tratamientos. Con 1-MCP la concentración en el día 6 fue casi nula, no obstante después se observó un incremento (Tabla 2-4). Butanoato de etilo, butanoato de 2-metilpropilo y octanoato de metilo en general presentaron el mismo comportamiento, estos compuestos incrementaron continuamente durante el almacenamiento, este incremento fue mayor con etileno, no obstante, con el 1-MCP fue mayor el octanoato de metilo en el día 11. A pesar de esto, se puede afirmar que por lo menos hasta el día 6 después de cosecha (ddc) con el 1-MCP se retrasa la emisión de estos compuestos volátiles y con etileno se estimula (Tabla 2-4). En el butanoato de butilo y decanoato de etilo hubo un aumento con etileno hasta el día 6 ddc y luego se presentó una disminución, similar tendencia tuvo el testigo pero los valores fueron inferiores. Por su parte con 1-MCP, hubo una disminución representativa hasta el día 6, pero posteriormente, los niveles incrementaron, aunque con niveles inferiores que los observados con etileno. En el dodecanoato de etilo, hubo un marcado incremento con

etileno en el día 6 pero luego disminuyó, mientras que en el testigo y con 1-MCP el resultado fue opuesto, y con este último, los niveles de dodecanoato de etilo fueron más bajos (Tabla 2-4).

En general se puede observar que los esteres evaluados en los frutos de uchuva incrementan su concentración con la aplicación de etileno, mientras que con 1-MCP disminuyen. Estos resultados concuerdan con lo encontrado en manzana y melón, donde la producción de volátiles fue inhibida por la aplicación de 1-MCP, o acelerada por tratamientos con etileno (Defilippi et al., 2005; Yahyaoui et al., 2002). Con este trabajo se tiene una primera aproximación de los compuestos volátiles del fruto de uchuva que pueden ser asociados con la presencia de etileno. En banano se encontró que el etileno es un regulador de la producción de volátiles durante la maduración de este fruto (Yang et al., 2011).

Estudios previos han reportado el papel del etileno en la inducción de esteres volátiles en frutos climatéricos (Flores et al., 2002; Beekwilder et al., 2004; Defilippi et al., 2004), en particular en el control de la enzima alcohol acil transferasa (Yahyaoui et al., 2002; Defilippi et al., 2005). La alcohol aciltransferasa (AAT) es una enzima que cataliza el último paso en la biosíntesis de esteres mediante la acetilación de alcoholes, es decir, que trasfiere un grupo acil-CoA a un alcohol, y puede ser considerado como el último punto de control en la emisión de estos compuestos, se ha reportado que acepta un amplio rango de sustratos (Pérez y Sanz, 2008). También existen reportes de que el etileno regula el paso de la reducción de ácidos grasos y aldehídos y, parcialmente, el paso de esterificación en la vida de esteres alifáticos, esto indica que las enzimas aldehído deshidrogenasas (ADH) implicadas en esta vía son etileno dependientes (Flores et al., 2002), lo cual, probablemente puede estar pasando en los frutos de uchuva y posiblemente explicaría el incremento de esteres en presencia de etileno en estos frutos.

Tabla 2-4: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre la emisión de ésteres volátiles (unidades de área/µL) emitidos por frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%).

	Día 1	Día 6	Día 11
Butanoato de etilo			
Control		218,40 b	295,32 b
Etileno	34,74	296,05 a	396,17 a
1-MCP		0,00 c	257,68 b
Butanoato de 2 metilpropilo			
Control		125,02 a	117,07 b
Etileno	15,56	132,21 a	153,95 a
1-MCP		13,23 b	115,21 b
Butanoato de butilo			
Control		197,32 b	137,59 b
Etileno	24,68	237,69 a	210,63 a
1-MCP		0,00 c	149,52 b
Octanoato de metilo			
Control		55,24 b	63,24 b
Etileno	17,45	77,89 a	101,07 a
1-MCP		15,15 c	117,71 a
Octanoato de etilo			
Control		1877,47 b	1051,74 b
Etileno	313,91	2359,44 a	1406,81 a
1-MCP		57,11 c	828,05 c
Decanoato de etilo			
Control		871,05 b	529,01 a
Etileno	160,49	988,22 a	608,81 a
1-MCP		11,67 c	224,16 b
Dodecanoato de etilo			
Control		14,81 b	32,83 a
Etileno	43,12	70,04 a	15,93 a
1-MCP		2,55 b	27,03 a

2.4.6 Conclusiones

Los resultados indican que compuestos como octanoato de etilo, butanoato de etilo, butanoato de 2-metilpropilo, butanoato de butilo, octanoato de metilo, decanoato de etilo y dodecanoato de etilo al parecer están regulados por etileno durante la maduración del fruto de uchuva, los resultados indicaron que estos esteres incrementaron su concentración relativa en presencia de etileno y se inhibieron parcialmente con la aplicación de 1-metilciclopropeno. Esto se convierte en una primera aproximación en la que varios compuestos volátiles del fruto de uchuva pueden ser asociados con la presencia de etileno.

2.4.7 Bibliografía

Bai, J.H., Baldwin, E.A., Goodner, K.L., Mattheis, J.P., y Brecht, J.K., (2005). Response of four apple cultivars to 1-methylcyclopropene treatment and controlled atmosphere storage. *HortScience* **40**,1534–8.

Balbontín, C., Gaete-Eastman, C., Vergara, M., Herrera, R., Moya-León, M.A. (2007). Treatment with 1-MCP and the role of ethylene in aroma development of mountain papaya fruit, Postharvest Biology and Technology **43**, 67–77.

Beekwilder, J., Alvarez-Huerta, M., Neef, E., Verstappen, F.W., Bouwmeester, H.J., y Aharoni, A. (2004). Functional characterization of enzymes forming volatile esters from strawberry and banana. *Plant Physiol*. **135**, 1865–1878.

Blankenship, S.M., y Dole, J.M. (2003). 1-Methylcyclopropene: a review. *Postharv. Biol. Technol.* **28**, 1–25.

Dandekar, A.A., Teo, G., Defilippi, B.G., Uratsu, S.L., Passey, A.J., Kader, A.A., Stow, J.R., Colgan, R.J., James, D.J. (2004). Effect of down-regulation of ethylene biosynthesis on fruit flavour complex in apple fruit, *Transgenic Res*. **13**, 373–384.

Defilippi, B.G., Dandekar, A.M., Kader, A.A. (2004). Impact of suppression of ethylene action or biosynthesis on flavor metabolites in apple (*Malus domestica* Borkh) fruits. *J. Agric. Food Chem*. **52**, 5694–5701.

Defilippi, B.G., Kader, A.A., y Dandekar, A.M. (2005). Apple aroma: alcohol acyltransferase, a rate limiting step for ester biosynthesis, is regulated by ethylene. *Plant Sci*. **168**, 1199–1210.

El-Sharkawy, I., Manriquez, D, Flores, F.B., Regad, F., Bouzayen, M., Latche, A., y Pech, J.C. (2005). Functional characterization of a melon alcohol acyl-transferase gene family involved in the biosynthesis of ester volatiles. Identification of the crucial role of a threonine residue for enzyme activity. *Plant Mol Biol*. **59**,345–62.

Flores, F., Yahyaoui, F.E., de Billerbeck, G., Romojaro, F., Latché, A., Bouzayen, M., Pech, J.C., y Ambid, C. (2002). Role of ethylene in the biosynthetic pathway of aliphatic ester aroma volatiles in Charentais Cantaloupe melons. *J. Exp. Bot*. **5**3, 201–206.

Fuggate, P., Wongs-Areea, C., Noichindac, S., y Kanlayanarata. S. (2010). Quality and volatile attributes of attached and detached 'Pluk Mai Lie' papaya during fruit ripening. *Scientia Horticulturae* **126**, 120–129.

Gutiérrez, M.S., Trinchero, G.D., Cerri, A.M., Vilella, F., y Sozzi, G.O. (2008). Different responses of goldenberry fruit treated at four maturity stages with the ethylene antagonist 1-methylcyclopropene. *Postharvest Biol. Technol*. **48**, 199–205.

Kondo, S., Setha, S., Rudell, D.R., Buchanan, D.A., Mattheis, J.P. (2005). Aroma volatile biosynthesis in apples affected by 1-MCP and methyl jasmonate. *Postharvest Biol Technol* **36**, 61–8.

Marin, A., Colonna, A., Kudo, K., Kupferman, E. y Mattheis, J. (2009). Measuring consumer response to "Gala" apples treated with 1-methylcyclopropene (1-MCP). *Postharvest Biol. Technol*. **51**, 73-79.

Martínez-Jávega, J.M., Monterde, A., Navarro, P., y Salvador, A. (2008). Responsse of new clementines to degreening treatment. *Proc. Int. Soc. Citriculture* **11**, 1342–1346.

Pérez, A.G., y Sanz, C. (2008). Formation of Fruit Flavour. In: Fruit and Vegetable Flavour. B Bruckner, W S Grant (eds). Cambridge, England. pp:41-70.

Rodrigo, M.J., y Zacarias, L. (2007). Effect of postharvest ethylene treatment on carotenoid accumulation and the expression of carotenoid biosynthesis genes in the flavedo of orange (Citrus sinensis L. Osbeck) fruit. *Postharvest Biol. Technol*. **43**, 14–22.

Serek, M., Woltering, E.J., Sisler, E.C., Frello, S., y Sriskandarajah, S. (2006). Controlling ethylene responses in flowers at the receptor level, *Biotechnology Advances* **24**,368–381.

Sun, B., Yan, H., Liu, N., Wei, J., y Wang, Q. (2012). Effect of 1-MCP treatment on postharvest quality characters, antioxidants and glucosinolates of chinese kale. *Food Chemistry*. **131** (2), 519-526.

Taiz, L., y Zeiger, E. (2006). Plant physiology, 4a ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA.

Villalobos, M., Biasi, W., Mitcham, E., y Holcroft, D. (2011). Fruit temperature and ethylene modulate 1-MCP response in Bartlee pears. *Postharvest Biology and Technology* **60**, 17-23.

Watkins, C.B. (2006). The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables. *Biotechnology Advances* 24, 389-409.

Yahyaoui, F.E., Wongs-Aree, C., Latché, A., Hackett, R., Grierson, D., y Pech, J.C. (2002). Molecular and biochemical characteristics of a gene encoding an alcohol acyltransferase involved in the generation of aroma volatile esters during melon ripening. *Eur. J. Biochem*. **269**, 2359–2366.

Yang, X., Song, J., Fillmore, S., Pang, X., y Zhang, Z. (2011). Effect of high temperature on color, chlorophyll fluorescence and volatile biosynthesis in green-ripe banana fruit. *Postharvest Biology and Technology* **62**, 246–257.

Zhang, Z., Huber, D.J., Hurr, B.M., y Rao, J. (2009). Delay of tomato fruit ripening in response to 1-methylcyclopropene is influenced by internal ethylene levels. *Postharvest Biol. Technol*. **54**, 1–8.

2.5 Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.)

Effect of ethylene and 1-methylcyclopropene on the postharvest behavior of fruits of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.)

Helber Enrique Balaguera-López, Mauricio Espinal-Ruiz, Lorenzo Zacarías y Aníbal Herrera Arévalo

2.5.1 Resumen

Los frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L., familia solanaceae) son bayas con comportamiento climatérico, altamente perecederos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de etileno y 1-metilciclopropeno (1-MCP) sobre el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva. Los frutos de uchuva ecotipo Colombia fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá, Colombia. Se utilizó un diseño completamente al azar con 4 tratamientos, estos fueron: etileno (1000 µL L^{-1}), 1-MCP (1 µL L^{-1}), 1-MCP+etileno y un testigo sin aplicación. Después de los tratamientos, todos los frutos fueron dejados a temperatura ambiente (20°C, 75% HR). Se hicieron mediciones de parámetros fisicoquímicos a los 1, 6 y 11 días después de cosecha (ddc), la medición de compuestos volátiles se realizó a los 6 ddc. Se encontró que la aplicación de 1-MCP en frutos de uchuva retrasó la maduración, generó disminución de la producción de etileno, de la tasa respiratoria, índice de color de la epidermis, carotenoides totales, pérdida de firmeza y acidez total titulable, sólidos solubles totales y compuestos volátiles como octanoato de etilo, butanoato de etilo, decanoato de etilo y decanoato de exilo, por su parte, la aplicación de etileno aceleró estos cambios. Los resultados sugieren que algunos procesos de la maduración del fruto de uchuva pueden estar asociados con la presencia de etileno.

Palabras clave: retardante de madurez, tasa respiratoria, esteres volátiles.

2.5.2 Abstract

The fruits of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L., family Solanaceae) berries with climacteric behavior are highly perishable. The aim of this study was to evaluate the effect of the application of ethylene and 1 - methylcyclopropene on the postharvest behavior of gooseberry fruit. The ecotype Colombia Cape gooseberry fruits were harvested in a commercial crop in the municipality of Ventaquemada Boyacá, Colombia. We used a completely randomized design with 4 treatments, these were: ethylene (1000 µL L^{-1}), 1-methylcyclopropene (1-MCP, 1 µL L^{-1}), 1 -MCP + ethylene and a control without application. After treatment, all the fruits were left at room temperature (20 ° C, 75% RH). Measurements were made of physicochemical parameters at 1, 6 and 11 days after harvest (DAH), the measurement of volatile compounds was performed at 7 DAH. It was found that the application of 1-MCP delayed fruit ripening gooseberry, as generated decreased in ethylene, respiratory rate, index of skin color, total carotenoids, loss of firmness and titratable acidity, total soluble solids and volatile compounds as ethyl octanoate, ethyl butanoate, ethyl decanoate, and hexhyl dodecanoate, meanwhile, the ethylene application accelerated these changes. The results suggest that some processes cape gooseberry fruit ripening may be associated with the presence of ethylene.

Key words: maturity retardant, respiratory rate, volatile esters.

2.5.3 Introducción

Los frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L., familia solanaceae) son bayas que se forman y permanecen dentro del cáliz durante todo su desarrollo, son redondos (1,25 a 2,50 cm, 4 a 10 g) y contienen entre 150 y 300 semillas. El fruto de uchuva es muy apetecido por su sabor y también por sus propiedades funcionales y medicinales, se destaca por su alto contenido de antioxidantes (ácido ascórbico y provitamina A), fósforo, hierro, proteína y fibra (Fischer et al., 2011), razón por la cual se ha incluido en la lista de los “Superfrutos” (Superfruit, 2011). Novoa et al. (2006) mencionan que Colombia es el mayor productor de uchuva del mundo. El ecotipo colombiano ha sobresalido en el mercado mundial por su dulce sabor, aroma y color brillante característico (Galvis et al., 2005).

La uchuva es un fruto perecedero, que presenta un comportamiento climatérico (Gutiérrez et al., 2008; Novoa et al., 2006), con aumento en la síntesis de etileno (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008; Majumder y Mazumdar, 2002). Pero se desconocen los cambios durante la maduración que son regulados por etileno, lo cual puede ser un parámetro útil para aumentar la vida poscosecha de esta especie, por ejemplo mediante la aplicación de inhibidores de la acción del etileno como el 1-metilciclopropeno.

El etileno ha sido reconocido como la hormona que regula la maduración de los frutos. La exposición de frutos al etileno acelera los procesos asociados con la maduración. Sin embargo, no todos ellos responden al etileno (Taiz y Zeiger, 2006). El etileno tiene una importante función en los procesos de maduración y senescencia de los productos agrícolas, generando efectos deseables (maduración más rápida y uniforme) o indeseables en los mismos (aceleración de la maduración y la senescencia, se reduce la vida útil), según sea el caso. Parámetros de maduración como ablandamiento del fruto (Mwaniki et al., 2005), cambio del color, incremento de la concentración de azúcares solubles, disminución del contenido de ácidos orgánicos y compuestos fenólicos (Kays, 2004; Taiz y Zeiger, 2006), y producción de aromas, entre otros, dependen en gran medida de la presencia de etileno (Alexander y Grierson, 2002; Flores et al., 2002). Diferentes estudios indican que el etileno puede estar asociado con distintos procesos durante la maduración de los frutos de uchuva, como por ejemplo, el ablandamiento, la actividad antioxidante, el cambio de color, entre otros (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008; Majumder y Mazumdar, 2002; Trinchero et al., 1999), sin embargo, es necesario el desarrollo de investigaciones complementarias para establecer con certeza el papel del etileno en la maduración del fruto de uchuva.

También se ha encontrado que aplicaciones de etileno superiores a 10 $\mu L\ L^{-1}$ tienen un impacto positivo en la producción de compuestos volátiles de frutos de peras madurados a 20°C (Villalobos-Acuña y Mitcham, 2008). Estudios previos han reportado el papel del etileno en la inducción de esteres en frutos climatéricos (Flores et al., 2002; Beekwilder et al., 2004; Defilippi et al., 2004). En concordancia, en manzanas se encontró que la

producción de esteres y alcoholes es etileno dependiente (Dandekar et al., 2004; Defilippi et al., 2004).

Por su parte, el 1-metilciclopropeno (1-MCP) es un retardante químico de la madurez que ocupa los receptores de etileno en la membrana, por tanto, evita la unión del etileno con su receptor y su acción (Serek et al., 2006). La afinidad del 1-MCP por los receptores es 10 veces mayor a la del etileno y actúa a más bajas concentraciones, también regula la biosíntesis de etileno a través de la inhibición del proceso autocatalítico (Blankenship y Dole, 2003). Serek et al. (2006) y Watkins (2006) mencionan que el 1-MCP es altamente eficaz para proteger a muchas especies agrícolas de la acción del etileno. Se ha encontrado que el contenido total de volátiles disminuye con la aplicación de 1-MCP, pero los volátiles individuales son afectados diferencialmente (Marin et al., 2009; Bai et al., 2005). En frutos de manzana, Defilippi et al. (2004) y Kondo et al. (2005) encontraron disminución de la producción de esteres y alcoholes por el 1-MCP. En frutos de uchuva se reporta que la aplicación de 1-MCP disminuye notablemente la producción de etileno y la tasa respiratoria (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008).

De acuerdo con lo expuesto, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de etileno y 1-metilciclopropeno sobre el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva ecotipo Colombia.

2.5.4 Material y métodos

Los frutos de uchuva ecotipo Colombia fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá, ubicado a 2630 msnm con temperatura ambiental de 12°C. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Poscosecha de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 4 tratamientos y 4 repeticiones, estos fueron: etileno (1000 µL L^{-1}), 1-metilciclopropeno (1-MCP; 1 µL L^{-1}), 1-MCP+etileno y un testigo sin aplicación. Cada una de las 16 unidades experimentales

estuvo compuesta por 125g de frutos sin cáliz, cosechados en estado pintón con los siguientes valores de color: L*=65,85, a*=10,66, b*=52,6 y IC=3,10.

Para la aplicación de etileno se hizo inmersión de los frutos en Ethrel™ por 10 minutos. Para el 1-MCP (Rohm and Haas), se pesó la cantidad necesaria en un vaso de precipitado, que se ubicó dentro de una cámara hermética de 2L, junto con los frutos, por medio de una septa se inyectaron 30 mL de agua caliente (45-50°C). La disolución del 1-MCP en el agua caliente generó la liberación al espacio de cabeza del 1-MCP gaseoso. Los frutos fueron expuestos al tratamiento por 24 h a temperatura ambiente. En el tratamiento de 1-MCP+Etileno, el etileno se aplicó 5 días después del 1-MCP, también mediante inmersión de los frutos en Ethrel™ por 10 minutos. Después de los tratamientos, todos los frutos fueron empacados en termoformados de polietilentereftalato (PET) con perforaciones y fueron dejados a temperatura ambiente (20°C, 75% HR).

A los 1, 6 y 11 días después de cosecha (ddc) se hicieron mediciones del índice de color (IC, ecuación 1), calculado a partir de parámetros del sistema CIELab L*, a* y b*, se realizaron tres lecturas en el diámetro ecuatorial de cada fruto con colorímetro digital marca Minolta; Firmeza del fruto (N): mediante la utilización de un penetrómetro digital PCE-PTR200 con aproximación 0,05 N; Pérdida de peso (%): a una muestra de aproximadamente 50g de frutos se le realizó medición de la masa fresca en balanza de precisión con aproximación de 0,001 g; Sólidos solubles totales (SST): se hizo a través de mediciones de grados Brix con un refractómetro digital marca Hanna de rango 0 a 85% con precisión 0,1 °Brix.

$$IC= (1000 \times a^*)/(L^* \times b^*) \qquad (1)$$

Para la extracción y cuantificación de carotenoides: se pesó aproximadamente 1g de pulpa, se agregaron 5 mL de acetona, se agitó en vórtex durante 1 min y luego se centrifugó durante 10 min a 4000 rpm. Después se virtió el sobrenadante en un balón de 25 mL, al pelet nuevamente se le agregó acetona, se agitó en vórtex y se llevó a centrifuga, este procedimiento se repitió 3 veces. El sobrenadante obtenido se llevó a volumen de 25mL

con acetona, se determinó la absorbancia en espectrofotómetro a 450 nm. La cuantificación se realizó mediante curva de calibración con diferentes concentraciones de β-caroteno. El total de carotenoides se expresó como µg de β-caroteno/g PF (peso fresco). Para calcular la tasa respiratoria se pesaron aproximadamente 50 g de frutos, que se despositaron a temperatura ambiente en una cámara hermética de 0,25 L, en la cámara fue ubicado un sensor infrarrojo de CO_2, que se conectó a un equipo de captura de datos marca Labquest. Cada 4 segundos y durante 5 minutos se registraron los valores de CO_2, con estos valores se calculó la pendiente, que correspondió a la tasa respiratoria, se tuvo en cuenta el peso de los frutos y el volumen de la cámara para convertir los datos a mg de CO_2 kg^{-1} h^{-1}. La producción de etileno (µL C_2H_4 kg^{-1} h^{-1}): se determinó con un cromatógrafo de gases (CG) Agilent Technologies 7890A, equipado con un detector de ionización de llama (FID). Se utilizó una columna HP-PLOT (30m x 0,55mm x 40µm). Las condiciones cromatográficas fueron las siguientes: temperatura del inyector de 70 °C, temperatura del horno de 50 °C y temperatura del detector FID de 250 °C.

Los compuestos volátiles mayoritarios analizados a los 6 ddc fueron octanoato de etilo, butanoato de etilo, decanoato de etilo y decanoato de hexilo, para lo cual se realizó microextracción en fase sólida con espacio de cabeza HS-SPME, se utilizó limoneno como estándar interno. Para la identificación de compuestos volátiles se utilizó un cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7890A acoplado a un espectrómetro de masas Agilent Technologies 5975C, los espectros obtenidos fueron comparados con aquellos de la librería NIST 8. Complementariamente se utilizó el índice de Kovats, que se calculó usando la serie homóloga de n-alcanos bajo las mismas condiciones de operación.

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey ($P<0,05$).

2.5.5 Resultados y Discusión

Producción de etileno

Se presentó un aumento de los 2 a los 4 días después de cosecha en todos los tratamientos, posteriormente hubo una disminución continua hasta el final del almacenamiento, excepto en los frutos con 1-MCP + etileno, que mostraron aumento continuo de etileno hasta los 6 ddc y luego disminuyó. Se encontró que los frutos de uchuva con 1-MCP tuvieron menor producción de etileno, mientras que con la aplicación de etileno dicha producción fue mayor (Figura 2-19A). Resultados similares fueron encontrados por Valdenegro et al. (2012) y Gutiérrez et al. (2008). En concordancia, la uchuva es un fruto altamente perecedero, con aumento en la síntesis de etileno (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008), según diferentes autores, esta hormona puede estar asociada con distintos procesos durante la maduración de los frutos de uchuva, como por ejemplo, el ablandamiento, la actividad antioxidante, el cambio de color, entre otros (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008; Majumder y Mazumdar, 2002). La aplicación de 1-MCP bloquea la unión del etileno con su receptor y evita las respuestas etileno-dependientes (Serek et al., 2006; Watkins, 2006), en este caso la producción autocatalítica de etileno, pues se ha encontrado que el 1-MCP puede disminuir la expresión y la actividad de la ACC oxidasa (Chiriboga et al., 2012).

De otra parte, el aumento de la producción de etileno en el tratamiento de 1-MCP + etileno se debe posiblemente a la aparición de nuevos receptores de etileno, en este sentido Blankenship y Dole (2003) afirman que el 1-MCP se une de forma permanente a los receptores presentes en el momento del tratamiento.

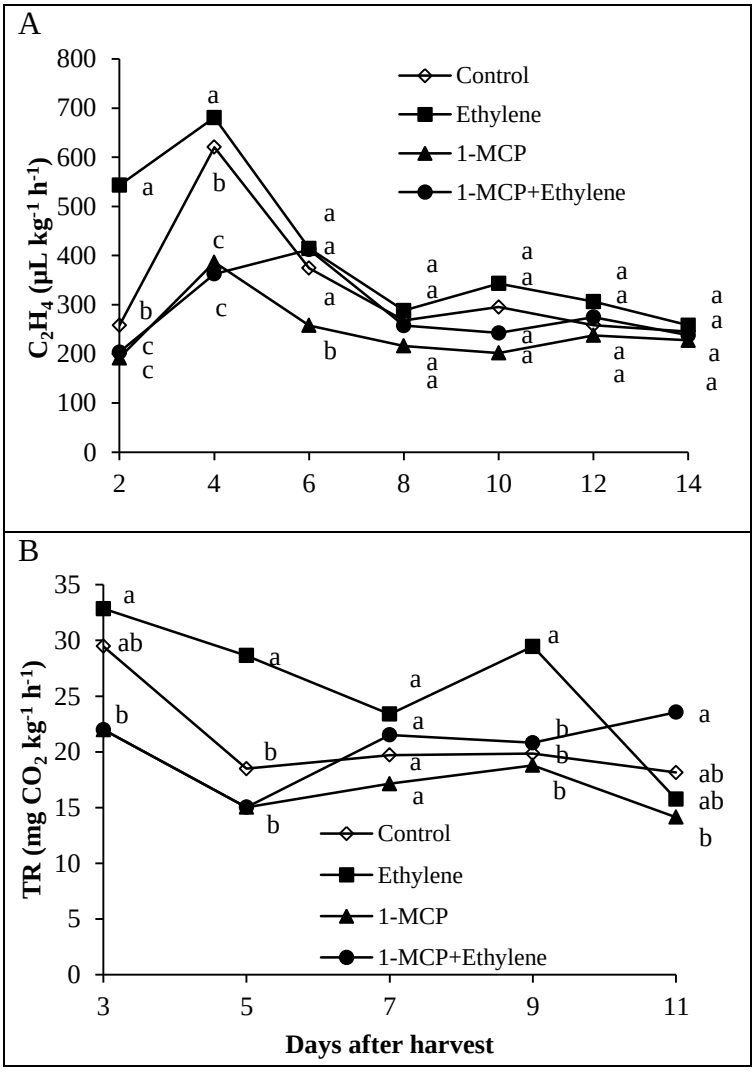


Figura 2-19: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre A. Producción de etileno, B. Tasa respiratoria de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%).

Tasa respiratoria

Se presentaron diferencias estadísticas significativas en todos los puntos de muestreo, excepto a los 7 días después de cosecha (ddc). La mayor tasa respiratoria observada durante el almacenamiento se encontró en los frutos con etileno, con un aumento marcado a los 9 ddc, por su parte, la aplicación de 1-MCP generó menor respiración en los frutos de uchuva durante el experimento (Figura 2-19B).

Barry y Giovannoni (2007) mencionan que el etileno tiene una estrecha relación con la tasa respiratoria de los frutos. Por esta razón, aplicaciones de 1-MCP resultan efectivas para disminuir la tasa respiratoria de diferentes frutos, tal como se reporta para tomate (Choi et al., 2008) y guayaba (Cerqueira et al., 2009), entre otros. Los resultados encontrados coinciden con lo reportado para frutos de uchuva en estudios anteriores, donde la aplicación de 1-MCP disminuye notablemente la tasa respiratoria (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008). Teniendo en cuenta que la tasa respiratoria tiene una relación directa con la perecibilidad de los frutos, el 1-MCP puede convertirse en una alternativa viable para mejorar la conservación de los frutos de uchuva.

Color epidermis

El IC se incrementó durante el almacenamiento, este cambio fue significativamente más bajo en los frutos tratados con 1-MCP ($P<0,01$), mientras que con etileno y el testigo el cambio fue más rápido, cuando se aplicó etileno después de la aplicación de 1-MCP el IC se incrementó marcadamente después del día 6 de cosecha (Figura 2-20A). Estos resultados indican que con el 1-MCP se retrasó el proceso de coloración del fruto. Diferentes estudios muestran que aplicaciones de 1-MCP disminuyen la actividad de la enzima clorofilasa y la pérdida de clorofila (Watkins, 2006; Sun et al., 2012). Frutos de tomate tratados con 1-MCP mostraron baja acumulación de licopeno y el cambio de color fue más lento (Zhang et al., 2009). Gutiérrez et al. (2008) reportan que el 1-MCP retrasa el cambio de color en frutos de uchuva, principalmente en frutos pintones, lo cual coincide con lo encontrado en este estudio.

Con relación al efecto del etileno, se ha encontrado que este tratamiento acelera la degradación de la clorofila y la aparición de ciertos colores como rojo, amarillo y naranja, ya que interviene en la expresión de genes que codifican para carotenoides y otros compuestos (Rodrigo y Zacarías, 2007). Sin embargo, los resultados obtenidos fueron similares al testigo, tal vez porque los frutos se encontraban en un estado de madurez en el cual ya se había aumentado la producción de etileno endógeno y estimulado la ruta de biosíntesis de los pigmentos característicos de los frutos maduros, por tanto, la respuesta al

etileno exógeno no fue muy notoria, además, el color externo del fruto en el momento del tratamiento es un factor importante en la respuesta, siendo mayor el cambio cuando el grado de desarrollo del color es menor (Martínez-Jávega et al., 2008).

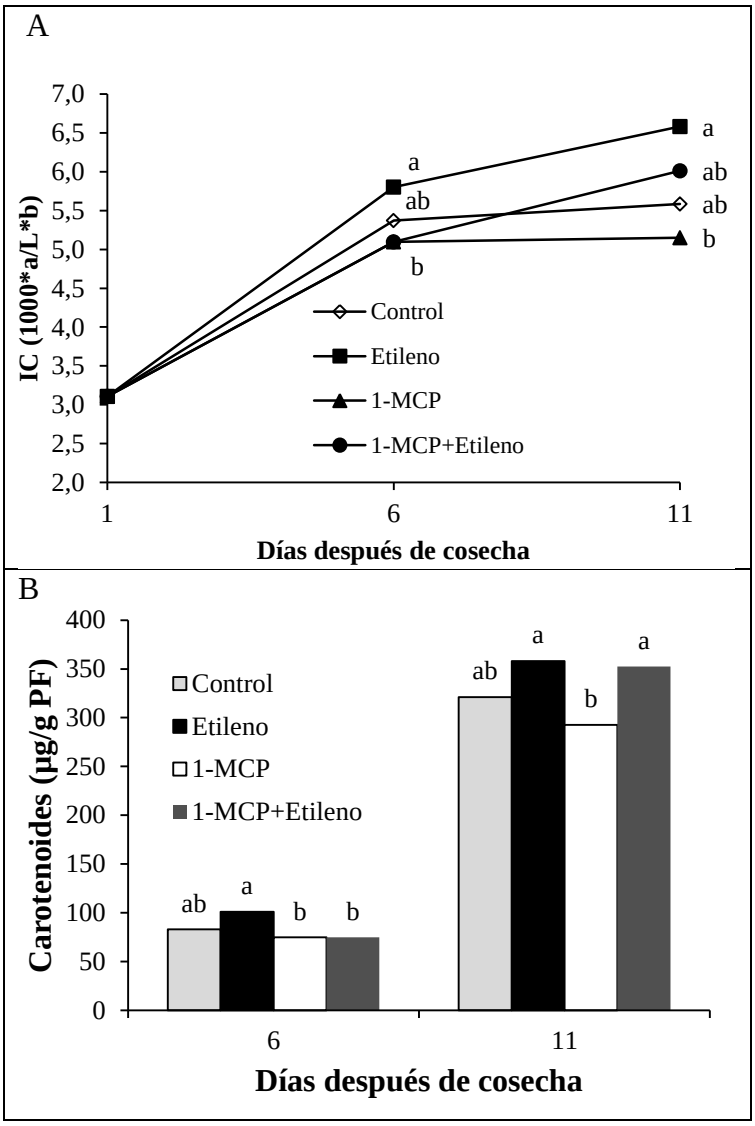


Figura 2-20: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre A). El índice de color y B). Carotenoides de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%).

Carotenoides totales

Con diferencias estadísticas a los 6 y 11 ddc (P<0,05), la aplicación de 1-MCP retrasó la acumulación de carotenoides totales, por el contrario, la aplicación de etileno generó mayor concentración de estos pigmentos en los frutos de uchuva. Durante el almacenamiento los carotenoides incrementaron de manera representativa en todos los frutos de uchuva, los aumentos fueron superiores a 3 veces la concentración presentada en el día 6 ddc (Figura 2-20B), al respecto, Fischer et al. (2000) reportan que el β-caroteno es el principal carotenoide del fruto de uchuva, y se ha encontrado que incrementa su concentración hasta que el fruto adquiere la coloración naranja (Fischer y Martínez, 1999).

En naranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck) var. Navelate, el etileno también incrementó el contenido total de carotenoides en la piel, porque interviene en la expresión de genes que codifican para la síntesis de estos pigmentos (Rodrigo y Zacarías, 2007), es posible que en frutos de uchuva, el proceso de carotenogénesis también esté regulado por etileno, no solo porque la aplicación exógena aumentó los carotenoides totales, sino también, porque el 1-MCP los disminuyó (Figura 2-20B), resultados similares fueron observados en frutos de tomate, donde el 1-MCP retrasó significativamente la acumulación de licopeno (Choi et al., 2008).

Firmeza

Disminuyó durante el almacenamiento. Se observaron diferencias significativas a los 6 y 11 ddc. La pérdida de firmeza de los frutos de uchuva fue menor con el tratamiento de 1-MCP y mayor con la exposición a etileno, incluso cuando se aplicó después del 1-MCP, a los 11 ddc la firmeza encontrada fue de 5,08 N con etileno y 7,9 para frutos con 1-MCP (Figura 2-21A).

Una de las principales causas de pérdida de firmeza en frutos es la actividad de enzimas que hidrolizan polisacáridos estructurales y de reserva, en uchuva la actividad poligalacturonasa, pectinmetilesterasa y algunas glicosidasas al parecer están relacionadas con la pérdida de firmeza del fruto (Majumder y Mazumdar, 2002). Se ha encontrado que en melón (*Cucumis melo*) el etileno regula la expresión de varios genes que codifican para

enzimas hidrolasas como poligalacturonasa (PG; *CmPG1*, *CmPG2, CmPG3*), xyloglucano endotransglicosilasa (*Cm-XTH1*), expansina (*Cm-Exp1*) y β-galactosidasas, esto indica que la depolimerización de pectinas y el xiloglucano están regulados por la presencia de etileno (Nishiyama et al., 2007; Pech et al., 2008), en uchuva la PG correlaciona con la presencia de etileno en el fruto (Majumder y Mazumdar, 2002) y en tomate, la expresión del gen que codifica para PG es muy sensible a etileno (Sitrit y Bennett, 1998), lo cual indica la probable relación que hay entre la presencia de etileno y la pérdida de firmeza de los frutos de uchuva. En concordancia, frutos de tomate tratados con 1-MCP fueron más firmes y la actividad poligalacturonasa (PG) fue suprimida (Choi y Huber, 2008) al igual que la enzima celulasa (Feng et al., 2000). En frutos de guayaba, la mayor dosis de 1-MCP (900 nLL^{-1}) generó los mayores valores de firmeza al final del almacenamiento (Cequeira et al., 2009), por su parte, Khan y Singh (2007) encontraron que con 1-MCP se retrasó la pérdida de firmeza y se disminuyó la actividad de las enzimas exo-PG, endo-PG, pectin esterasa y EGsa.

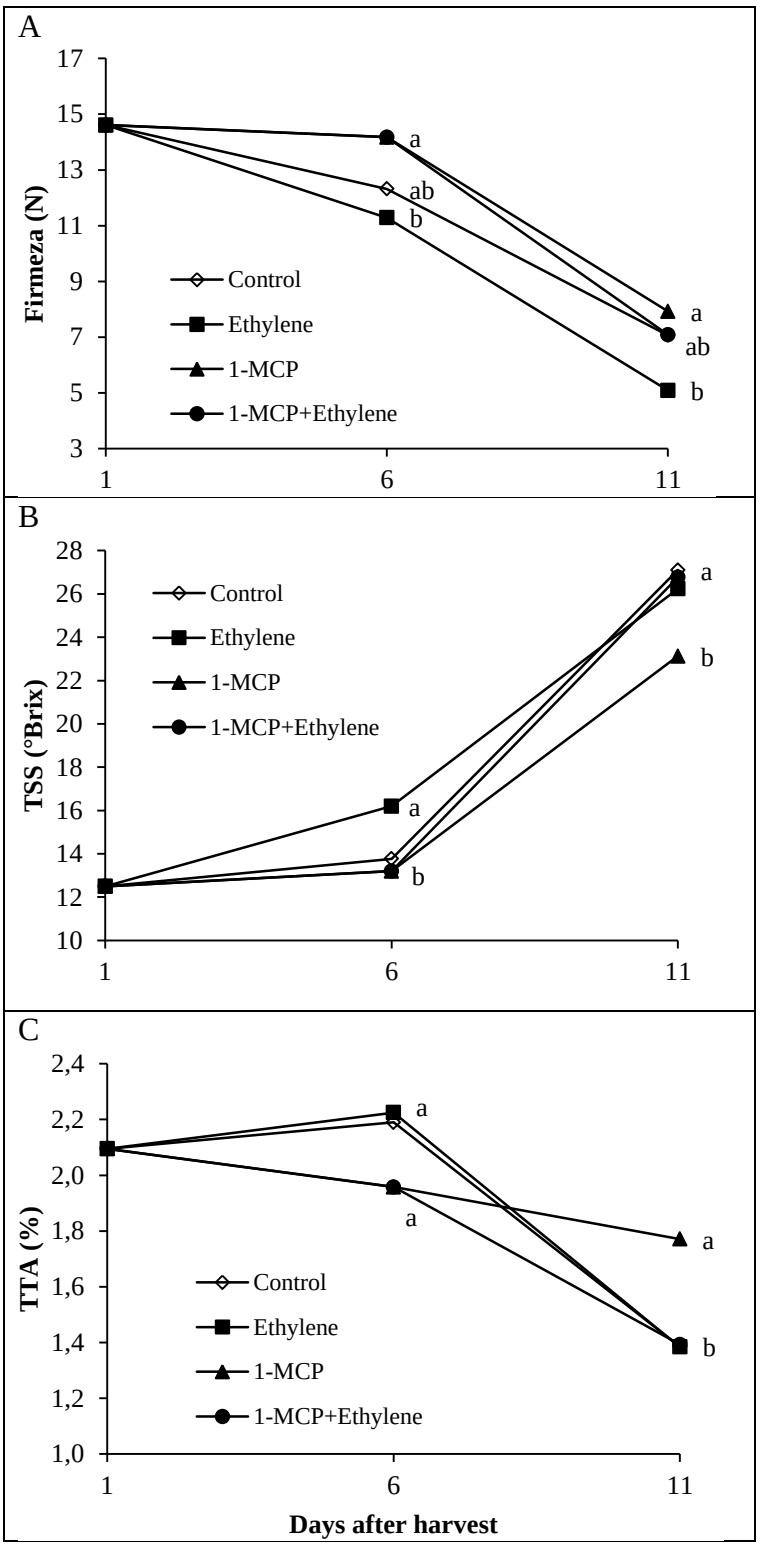


Figura 2-21: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre A). La firmeza, B. Los sólidos solubles totales y C). La acidez total titulable de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%).

Una menor pérdida de firmeza en frutos de uchuva con la aplicación de 1-MCP también fue encontrada por Gutiérrez et al. (2008). Al respecto, la disminución en la pérdida de firmeza en frutos de banano tratados con 1-MCP estuvo asociada con la baja expresión de un gen de expansina (MaExp1) que se induce por etileno (Trivedi y Nath, 2004), también hay relación con una disminución de la actividad de pectin metilesterasa (PME), PG, endo-β-1,4-glucanasa (EGase) y pectato liasa (Lohani et al., 2004). En pera, el 1-MCP disminuyó la actividad de β-galactosidasa por efecto sobre la expresión de sus genes (Mwaniki et al., 2005), mientras que en kiwi se redujo la actividad de las enzimas β-galactosidasa, α-arabinofuranosidasa y β-xylosidasa (Boquete et al., 2004).

Sólidos solubles totales y Acidez total titulable

Los sólidos solubles totales incrementaron en función del tiempo, con un mayor aumento de los 6 a los 11 ddc. Con diferencias estadísticas significativas, el 1-MCP retrasó el incremento de los SST en los frutos de uchuva, mientras que los frutos con presencia de etileno presentaron mayor ganancia ddc SST (Figura 2-21B). La acidez total titulable presentó diferencias estadísticas solo a los 11 ddc. Se observó disminución de la acidez a partir de los 6 ddc, a los 11 ddc se encontró mayor ATT en los frutos tratados con 1-MCP, mientras que el etileno aceleró la pérdida de ATT (Figura 2-21C).

El incremento de la concentración de azúcares solubles y la disminución del contenido de ácidos orgánicos dependen de la producción de etileno (Kays, 2004), y la relación de SST/ATT en uchuva es favorecida por la aplicación de etileno (Valdenegro et al., 2012). Asimismo, Marin *et al*. (2009) mencionan que el 1-MCP puede afectar el metabolismo de carbohidratos, tal como se evidencia en este estudio. En frutos de tomate, Zhang *et al*. (2009) observaron que el 1-MCP retrasó la disminución de la ATT. Por su parte Singh y Pal (2008) encontraron que en guayabas "Safed", el tratamiento con 1-MCP disminuyó el incremento de SST. No obstante, en uchuva, Gutiérrez et al. (2008) no encontraron efecto significativo del 1-MCP sobre los SST con dosis hasta de 5 $\mu L\ L^{-1}$, al parecer, factores como el estado de madurez y los niveles endógenos de etileno pueden afectar la respuesta de este retardante de madurez (Valdenegro et al., 2012; Zhang *et al*., 2009).

Emisión de compuestos volátiles

Con diferencias significativas estadísticas (P<0,05), el 1-MCP disminuyó la emisión de octanoato de etilo, butanoato de etilo, decanoato de etilo y decanoato de hexilo, mientras que la aplicación de etileno generó aumento de octanoato de etilo, butanoato de etilo y decanoato de etilo, la aplicación de etileno después de la exposición de 1-MCP también indujo aumento de los compuestos volátiles analizados (Figura 2-22). Estos resultados concuerdan con lo encontrado en manzana y melón, donde la producción de volátiles fue inhibida por la aplicación de 1-MCP, o acelerada por tratamientos con etileno (Defilippi et al., 2004; Yahyaoui et al., 2002), asimismo, en banano se encontró que el etileno es un regulador de la producción de volátiles durante la maduración de este fruto (Yang et al., 2011). Con este trabajo se tiene una primera aproximación de los compuestos volátiles del fruto de uchuva que pueden ser asociados con la presencia de etileno.

Estudios previos han reportado el papel del etileno en la inducción de esteres volátiles en frutos climatéricos (Flores et al., 2002; Beekwilder et al., 2004; Defilippi et al., 2004), en particular en el control de la enzima alcohol acil transferasa (Yahyaoui et al., 2002). La alcohol aciltransferasa (AAT) es una enzima que cataliza el último paso en la biosíntesis de esteres mediante la acetilación de alcoholes, es decir, que trasfiere un grupo acil-CoA a un alcohol, y puede ser considerado como el último punto de control en la emisión de estos compuestos, se ha reportado que acepta un amplio rango de sustratos (Pérez y Sanz, 2008). También existen reportes de que el etileno regula el paso de la reducción de ácidos grasos y aldehídos y, parcialmente, el paso de esterificación en la vida de esteres alifáticos, esto indica que las enzimas aldehído deshidrogenasas (ADH) implicadas en esta vía son etileno dependientes (Flores et al., 2002), lo cual, probablemente puede estar pasando en los frutos de uchuva y posiblemente explicaría el incremento de esteres en presencia de etileno en estos frutos y la disminución de estos volátiles cuando hay aplicación de 1-MCP.

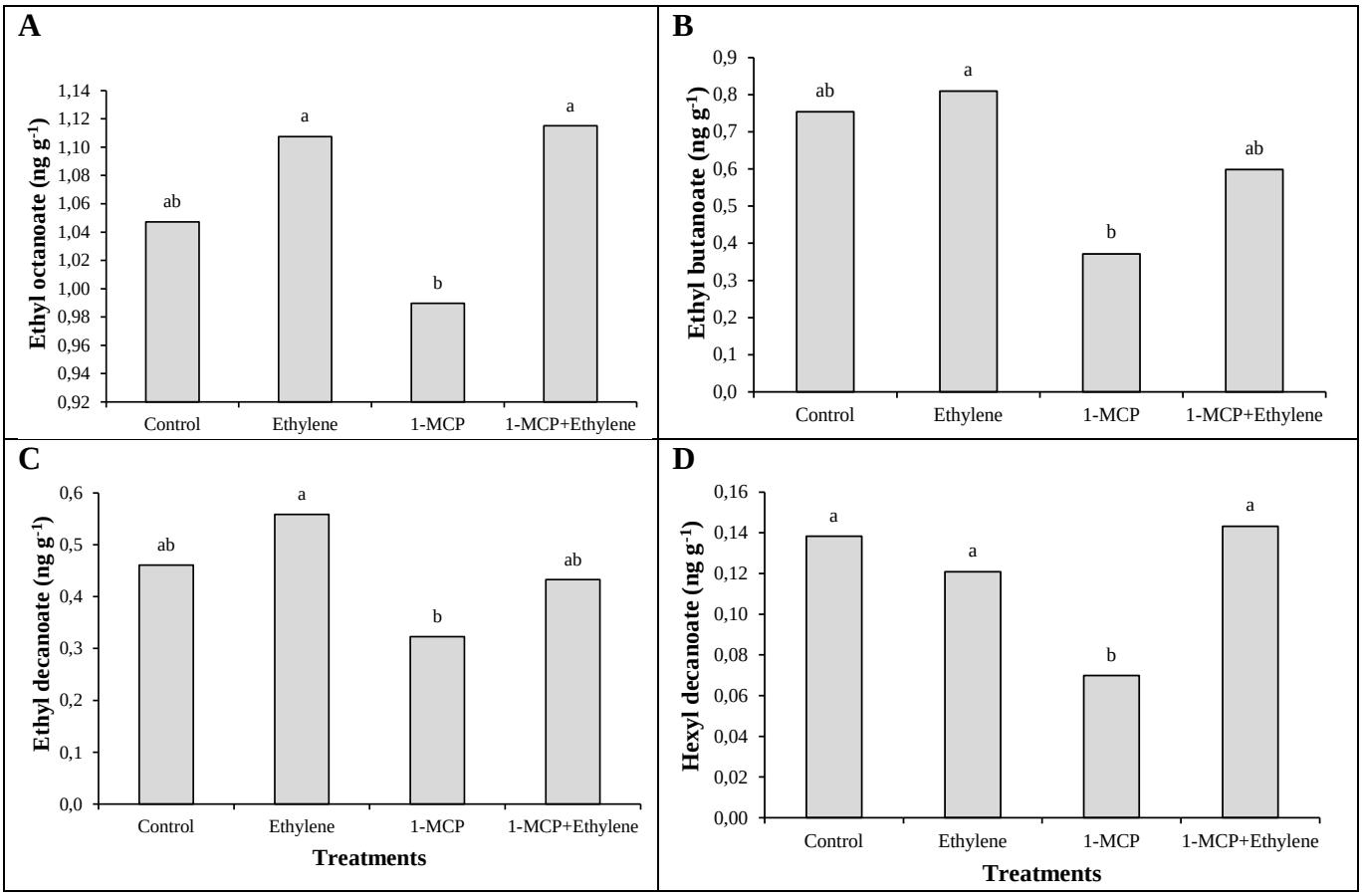


Figura 2-22: Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno sobre compuestos volátiles mayoritarios A). Octanoato de etilo, B). Butanoato de etilo, C). Decanoato de etilo y D). Decanoato de hexilo de frutos de uchuva durante el almacenamiento. La cuantificación se hizo con base en limoneno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (5%).

2.5.6 Conclusiones

La aplicación de 1-MCP en frutos de uchuva generó disminución de la tasa respiratoria, índice de color de la epidermis, carotenoides totales, pérdida de firmeza y acidez total titulable, sólidos solubles totales y compuestos volátiles, con lo cual dicho compuesto se muestra como un retardante de madurez eficiente para la conservación de frutos de uchuva. Además, estos resultados plantean evidencias de que el etileno está involucrado en el proceso de maduración de los frutos de uchuva.

2.5.7 Bibliografía

ALEXANDER, L.; GRIERSON, D. Ethylene biosynthesis and action in tomato: a model for climacteric fruit ripening. **J Exp Bot** 53: 2039–2055. 2002.

BAI, J.H.; BALDWIN, E.A.; GOODNER, K.L.; MATTHEIS, J.P.; BRECHT, J.K. Response of four apple cultivars to 1-methylcyclopropene treatment and controlled atmosphere storage. **HortScience** 40, 1534–8. 2005.

BARRY, C.; GIOVANNONI, J. Ethylene and Fruit Ripening. **J. Plant Growth Regul**, 26,143–159.

BEEKWILDER, J.; ALVAREZ-HUERTA, M.; NEEF, E.; VERSTAPPEN, F.W.; BOUWMEESTER, H.J.; AHARONI, A. Functional characterization of enzymes forming volatile esters from strawberry and banana. **Plant Physiol.** 135, 1865–1878. 2004.

BLANKENSHIP, S.M.; DOLE, J.M. 1-Methylcyclopropene: a review. **Postharv. Biol. Technol**. 28,1-25. 2003.

BOQUETE, E.J.; TRINCHERO, G.D.; FRASCHINA, A.A.; VILELLA, F.; SOZZLI, G.O. Ripening of 'Hayward' kiwifruit treated with 1-methylcyclopropene after cold storage. **Postharvest Biol Technol** 32:57–65. 2004.

CERQUEIRA, T.S.; JACOMINO, A.P.; SASAKI, F.F.; AMORIM, L. Controle do amadurecimento de goiabas 'kumagai' tratadas com 1-metilciclopropeno. **Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal** - SP, v. 31, n. 3, p. 687-692. 2009.

Chiriboga, M.A., I. Recasens, W. Schotsmans, E. Dupille y C. Larrigaudiere. 2012. Cold-induced changes in ACC metabolism determine softening recovery in 1-MCP treated 'conference' pears. Postharvest Biology and Technology 68, 78–85.

CHOI, S.T., HUBER, D.J. Influence of aqueous 1-methylcyclopropene concentration, immersion duration, and solution longevity on the postharvest ripening of breaker-turning tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. **Postharvest Biol. Technol**. 49, 147–154. 2008.

CHOI, S.T.; TSOUVALTZIS, P.; LIM, C.; HUBER. D.J. Suppression of ripening and induction of asynchronous ripening in tomato and avocado fruits subjected to

complete or partial exposure to aqueous solutions of 1-methylcyclopropene. **Postharvest Biology and Technology**, 48,206–214. 2008.

DANDEKAR, A.A.; TEO, G.; DEFILIPPI, B.G.; URATSU, S.L.; PASSEY, A.J.; KADER, A.A.; STOW, J.R.; COLGAN, R.J.; JAMES, D.J. Effect of down-regulation of ethylene biosynthesis on fruit flavour complex in apple fruit, **Transgenic Res**. 13, 373–384. 2004.

DEFILIPPI, B.G.; DANDEKAR, A.M.; KADER, A.A. Impact of suppression of ethylene action or biosynthesis on flavor metabolites in apple (*Malus domestica* Borkh) fruits. **J. Agric. Food Chem**. 52, 5694–5701. 2004.

FISCHER G.; MARTÍNEZ, O. 1999, 'Calidad y madurez de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en relación con la coloración del fruto', **Agron Colomb**. 16, 35- 39.

FISCHER G.; EBERT G.; LÜDDERS, P. 'Provitamin A carotenoids, organic acids and ascorbic acid content of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) ecotypes grown at two tropical altitudes', **Acta Hort**, 531 , 263-267. 2000.

FISCHER, G., HERRERA, A.; ALMANZA. P.J. Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) pp. 374-396. En: Yahia, E.M. (ed.) **Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits**. Vol. 2. Acai to citrus. Woodhead Publishing, Oxford, U.K. 2011.

FLORES, F.; EL-YAHYAOUI, F.; DE BILLERBECK, G.; ROMOJARO, F.; LATCHE, A.; BOUZAYEN, M.; PECH, J.C.; AMBID, C. Role of ethylene in the biosynthetic pathway of aliphatic ester aroma volatiles in Charentais Cantaloupe melons. **J Exp Bot** 53: 201–206. 2002.

GALVIS J. A.; FISCHER, G.; GORDILLO, O. 'Cosecha y poscosecha de la uchuva' , en Fischer G. , Miranda D. , Piedrahíta W. y Romero J. , **Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en Colombia**, Bogotá, Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia, 165-190. 2005.

GUTIÉRREZ, M.S.; TRINCHERO, G.D.; CERRI, A.M.; VILELLA, F.; SOZZI, G.O. 2008. Different responses of goldenberry fruit treated at four maturity stages with the ethylene antagonist 1-methylcyclopropene. **Postharvest Biol. Technol**. 48, 199–205.

KAYS, S. **Postharvest biology.** Exon Press (Athens, Georgia). 568 p. 2004.

KHAN, A.; SINGH, Z. 1-MCP regulates ethylene biosynthesis and fruit softening during ripening of "Tegan Blue" plum. **Postharvest Biol. Technol**. 43, 298-306. 2007.

KONDO, S.; SETHA, S.; RUDELL, D.R.; BUCHANAN, D.A.; MATTHEIS, J.P. Aroma volatile biosynthesis in apples affected by 1-MCP and methyl jasmonate. **Postharvest Biol Technol** 36, 61–8. 2005.

LOHANI S.; TRIVEDI, P.K.; NATH, P. Changes in activities of cell wall hydrolases during ethylene-induced ripening in banana: effect of 1-MCP, ABA and IAA. **Postharvest Biol Technol** 31:119–26. 2004.

MAJUMDER, K.; MAZUMDAR. B. Changes of pectic substances in developing fruits of cape-gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in relation to the enzyme activity and evolution of ethylene. **Scientia Horticulturae** 96, 91–101. 2002.

MARIN, A.; COLONNA, A.; KUDO, K.; KUPFERMAN, E.; MATTHEIS, J. Measuring consumer response to "Gala" apples treated with 1-methylcyclopropene (1-MCP). **Postharvest Biol. Technol.** 51, 73-79. 2009.

MARTÍNEZ-JÁVEGA, J.M.; MONTERDE, A.; NAVARRO, P.; SALVADOR, A. Responsse of new clementines to degreening treatment. **Proc. Int. Soc. Citriculture** 11, 1342–1346. 2008.

MWANIKI M.W.; MATHOOKO F.M.; MATSUZAKI M.; HIWASA K.; TATEISHI A.; USHIJIMA K.; NAKANOE, R.; INABAE, A.; KUBO. Y. Expression characteristics of seven members of the beta-galactosidase gene family in 'La France' pear (*Pyrus communis* L.) fruit during growth and their regulation by 1-methylcyclopropene during postharvest ripening. **Postharvest Biol Technol,** 36(3), 253–63. 2005.

NISHIYAMA, K.; GUIS, M.; ROSE, J.K.C.; KUBO, Y.; BENNETT, K.A.; WANGJIN, L.; KATO, K.; USHIJIMA, K.; NAKANO, R.; INABA, A.; BOUZAYEN, M.; LATCHE, A.; PECH, J.C.; BENNETT, A. Ethylene regulation of fruit softening and cell wall disassembly in Charentais melon, **J. Exp. Bot.** 58 1281–1290. 2007.

NOVOA R. H.; BOJACÁ, M.; GÁLVIS, J.A.; FISCHER, G. 2006., 'La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) almacenada a 12°C', **Agron Colomb,** 24 (1), 68-76.

PECH, J.C.; BOUZAYEN M.; LATCHÉ. A. 2008. Climateric fruit ripening: Ethylene-dependent and independent regulation of ripening pathways in melon fruit. **Plant science,** 175, 114-120.

PÉREZ, A.G.; SANZ, C. Formation of Fruit Flavour. In: **Fruit and Vegetable Flavour**. B Bruckner, W S Grant (eds). Cambridge, England. pp:41-70. 2008.

RODRIGO, M.J.; ZACARIAS, L. Effect of postharvest ethylene treatment on carotenoid accumulation and the expression of carotenoid biosynthesis genes in the flavedo of orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) fruit. *Postharvest Biol. Technol*.43, 14–22. 2007.

SEREK, M.; WOLTERING, E.J.; SISLER, E.C.; FRELLO, S.; SRISKANDARAJAH, S. Controlling ethylene responses in flowers at the receptor level, **Biotechnology Advances** 24,368–381. 2006.

SINGH, S.P.; PAL, R.K. 2008. Response of climacteric-type guava (*Psidium guajava* L.) to postharvest treatment with 1-MCP, **Postharvest Biology and Technology**, Amsterdam, v.47 , n.3, p. 307-314.

SITRIT, Y.; BENNETT, A.B. Regulation of tomato fruit polygalacturonase mRNA accumulation by ethylene: a re-examination, **Plant Physiol.** 116 1145–1150. 1998.

SUN, B.; YAN, H.; LIU, N.; WEI, J.; WANG, Q. Effect of 1-MCP treatment on postharvest quality characters, antioxidants and glucosinolates of chinese kale. **Food Chemistry.** 131 (2), 519-526. 2012.

SUPERFRUIT. 2011. **Uchuva - the superfruit.** En: http://www.uchuvasuperfruit.com; consulta: 13 de agosto de 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**, 4a ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA. 2006.

TRINCHERO, G.; SOZZI, G.; CERRI, A.M.; VILELLA, F.; FRASCHINA, A. Ripening-related changes in ethylene production, respiration rate and cell-wall enzyme activity in goldenberry (*Physalis peruviana* L.), a solanaceous species. **Postharvest Biol. Technol**. 16, 139–145. 1999.

TRIVEDI, P.K.; NATH P. Exp1, an ethylene-induced expansin from ripening banana fruit. Plant Sci 167:1351–8. 2004.

VALDENEGRO, M.; FUENTES, L.; HERRERA, R.; MOYA-LEÓN. M.A. Changes in antioxidant capacity during development and ripening of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit and in response to 1-methylcyclopropene treatment. Postharvest Biology and Technology 67,110–117. 2012.

VILLALOBOS-ACUÑA, M.; MITCHAM. E. Ripening of European pears: The chilling dilema. **Postharvest Biology and Technology**, 49,187–200. 2008.

WATKINS, C.B. The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables. **Biotechnology Advances** 24, 389-409. 2006.

YAHYAOUI, F.E.; WONGS-AREE, C.; LATCHÉ, A.; HACKETT, R.; GRIERSON, D.; PECH, J.C. Molecular and biochemical characteristics of a gene encoding an alcohol acyltransferase involved in the generation of aroma volatile esters during melon ripening. **Eur. J. Biochem**. 269, 2359–2366. 2002.

YANG, X.; SONG, J.; FILLMORE, S.; PANG, X.; ZHANG, Z. Effect of high temperature on color, chlorophyll fluorescence and volatile biosynthesis in green-ripe banana fruit. **Postharvest Biology and Technology** 62, 246–257. 2011.

ZHANG, Z.; HUBER, D.J.; HURR, B.M.; RAO, J. Delay of tomato fruit ripening in response to 1-methylcyclopropene is influenced by internal ethylene levels. **Postharvest Biol. Technol**. 54, 1–8. 2009.

2.6 Regulación de respuestas fisiológicas del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) bajo la aplicación poscosecha de etileno y 1-metilciclopropeno

Regulation of the physiological responses of cape gooseberry fruit (*Physalis peruviana*) by postharvest treatment with ethylene and 1-MCP

Mauricio Espinal-Ruiz[1], Helber-Enrique Balaguera-López[2*], Jeimmy-Marcela Rodríguez-Nieto[1], Fredy Alexander Salamanca-Gutiérrez, Lorenzo Zacarías García[2], Aníbal Herrera-Arévalo[2,3], Luz-Patricia Restrepo-Sánchez[1]

1. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. AA 14490, Bogotá, Colombia.
2. Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. AA 14490, Bogotá, Colombia.

***Helber-Enrique Balaguera-López**
hebalagueral@unal.edu.co
Phone number: +571 – 3165000 ext. 19084.
Fax number: +571 – 3165037

2.6.1 Resumen

El fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L., familia solanaceae) es una pequeña baya altamente perecedera con patrón respiratorio climatérico. Son pocos los estudios que reportan que en esta especie el etileno regula la maduración y que el 1-metilciclopropeno (1-MCP) la inhibe. Los resultados obtenidos hasta el momento son controversiales y no se cuenta con información suficiente para utilizar el 1-MCP como retardante de madurez del fruto de uchuva. El objetivo de esta investigación fue estudiar la regulación de algunas respuestas fisiológicas del fruto de uchuva bajo la aplicación poscosecha de etileno y 1-

MCP. Los frutos de uchuva ecotipo Colombia fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá, Colombia. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 3 tratamientos, estos fueron: etileno (etefón 1000 µL L^{-1}), 1-MCP (1 µL L^{-1}), y un control sin aplicación. Después de los tratamientos, todos los frutos fueron dejados a temperatura ambiente (20°C, 75% HR). Se hicieron mediciones de algunos parámetros fisicoquímicos a los 1, 6 y 11 días después de tratamiento. Se determinó in vitro la actividad y la cinética de la enzima ACC oxidasa (E.C. 1.14.17.4) y de la histidina kinasa (E.C. 2.7.13.3). Los resultados indicaron que la aplicación de etileno estimuló la emisión de esteres volátiles, el índice de color, la pérdida de firmeza, la actividad de la ACC oxidasa y la histidina kinasa. Por su parte, el 1-MCP retrasó los procesos anteriormente mencionados. Por tanto, el 1-MCP puede retrasar el proceso de maduración en los frutos de uchuva mediante la inhibición de la biosíntesis y de la acción del etileno. Los resultados sugieren que algunos procesos de la maduración del fruto de uchuva pueden estar asociados con la presencia de etileno y que estos pueden ser inhibidos por el 1-MCP.

Palabras clave: *Physalis peruviana*, etileno, 1-MCP, histidina quinasa, ACC oxidasa, la maduración.

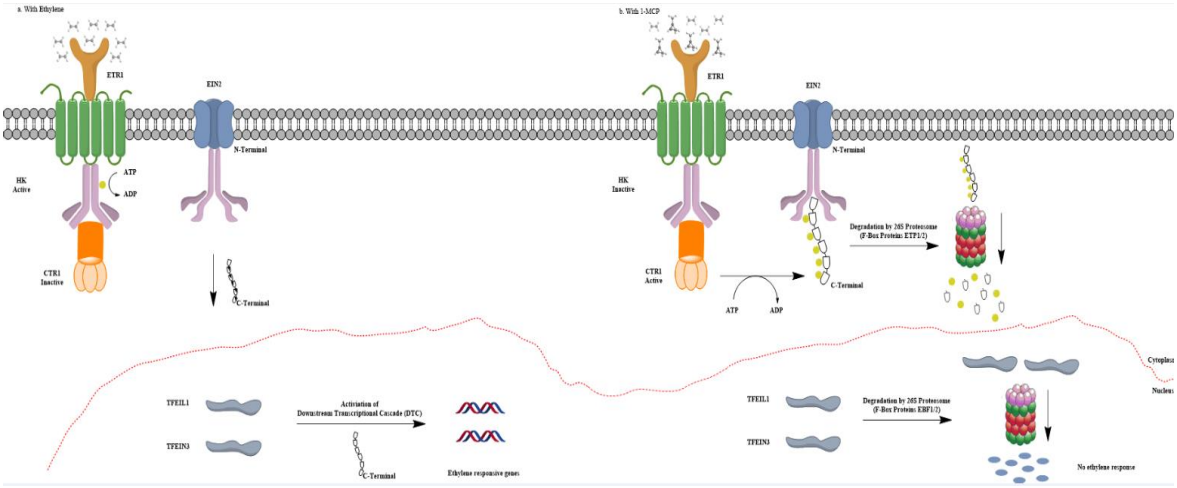
2.6.2 Abstract

The fruit of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L., family Solanaceae) is a small berry with highly perishable climacteric respiratory pattern. Few studies have reported that this species regulates ethylene ripening and 1-methylcyclopropene (1-MCP) inhibits it. The results obtained so far are controversial and do not have enough information to use the 1-MCP as retardant cape gooseberry fruit maturity. The objective of this research was to study the regulation of some physiological responses under gooseberry fruit postharvest application of ethylene and 1-MCP. The fruits of gooseberry ecotype Colombia were harvested at a commercial crop in the town of Ventaquemada Boyacá, Colombia. A pilot randomized design with 3 treatments were used, these were: ethylene (ethephon 1000 µL L^{-1}), 1-MCP (1 µL L^{-1}), and an untreated control. After the treatments, all the fruits were left at room temperature (20 ° C, 75% RH). Some physicochemical parameters

measurements at 1, 6 and 11 days after treatment were made. Activity and kinetics of the enzyme ACC oxidase (EC 1.14.17.4) and kinase (EC 2.7.13.3) was determined in vitro histidine. The results indicated that application of ethylene stimulated emission of volatile esters, the color index, loss of firmness, ACC oxidase activity and histidine kinase. Meanwhile, 1-MCP delayed the aforementioned processes. Therefore, the 1-MCP can delay the ripening process in fruits of cape gooseberry by inhibiting the biosynthesis and action of ethylene. The results suggest that some processes of fruit ripening gooseberry may be associated with the presence of ethylene and these can be inhibited by 1-MCP.

Keywords: *Physalis peruviana*, ethylene, 1-MCP, histidine kinase, ACC oxidase, ripening.

Graphical abstract



Efecto del etileno (a) y del 1-MCP (b) en la expresión de los genes de respuesta al etileno. En presencia de etileno (a) se promueve la expresión de los genes de respuesta a etileno, mientras que en presencia de 1-MCP (b) se promueve la inhibición de la expresión de dichos genes.

List of Abbreviations

1-ACC: 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid

1-MCP: 1-Methylcyclopropene

ACC oxidase: 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid oxidase

ATP: Adenosine triphosphate

C_2H_4: Ethylene

His: Histidine

HisP: Histidine-N-phosphate

HK: Histidine kinase

K_m: Michaelis-Menten constant

V_{max}: Maximum velocity

V_{maxapp}: Apparent maximum velocity

2.6.3 Introducción

Los frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L., familia solanaceae) son bayas que se forman y permanecen dentro del cáliz durante todo su desarrollo. Estos frutos son muy apetecido por su sabor y también por sus propiedades funcionales y medicinales, se destacan por su alto contenido de antioxidantes (ácido ascórbico y provitamina A), fósforo, hierro, proteína y fibra (Fischer et al., 2011), razón por la cual se ha incluido en la lista de los "Superfrutos" (Superfruit, 2011). Al respecto, Novoa et al. (2006) mencionan que Colombia es el mayor productor de uchuva del mundo. La uchuva es un fruto altamente perecedero, que presenta un comportamiento climatérico (Gutiérrez et al., 2008; Novoa et al., 2006), con aumento en la síntesis de etileno (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008), que puede estar asociado con distintos procesos durante la maduración de los frutos de uchuva, como por ejemplo, el ablandamiento, la actividad antioxidante, el cambio de color, entre otros (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008; Majumder y Mazumdar, 2002). No obstante, el etileno puede incrementar la susceptibilidad de los frutos a los desórdenes fisiológicos, ataque de patógenos y senescencia (Martínez-Romero et al., 2009; Mworia et al., 2010).

La señalización del etileno inicia con la unión a un grupo de receptores proteicos, que actúan como reguladores negativos de la respuesta a etileno. Cuando el etileno es percibido por los receptores, la señal de etileno se envía a través de una secuencia de eventos bioquímicos que regulan la expresión de genes relacionados con la actividad de enzimas implicadas en la maduración (Figura 1; Lacey y Binder, 2014; Binder, 2008; Kesari *et al*., 2007). Los receptores de etileno son proteínas de membrana del retículo endoplasmático codificadas por una familia de multi-genes estructuralmente diferentes pero funcionalmente redundantes (Chen *et al.*, 2005; Bouzayen *et al.*, 2010). En *Arabidopsis* se han reportado 5 receptores de etileno, ETR1-2 (ETHYLENE RESPONSE), ERS1-2 (ETHYLENE SENSOR) y EIN4 (ETHYLENE INSENSITIVE) (Klee y Giovannoni, 2011); en tomate 7 receptores (LeETR1-7, NR (NEVER RIPE) (también referido como LeETR3) (Barry y Giovannoni, 2007), y en manzana 5 (MdETR1, MdETR2, MdETR5, MdERS1, MdERS2) (Yang *et al.*, 2013).

Para disminuir los efectos negativos del etileno en los frutos se ha empleado con éxito la aplicación de 1-metilciclopropeno (1-MCP), un retardante químico de la madurez que se une irreversiblemente a los receptores de etileno en la membrana, por tanto, se bloquea la unión del etileno con su receptor y evita las respuestas etileno-dependientes (Figura 2-23; Serek et al., 2006; Watkins, 2006). Además, la afinidad del 1-MCP por los receptores es 10 veces mayor a la del etileno y actúa a más bajas concentraciones (Blankenship y Dole, 2003) y no presenta efectos tóxicos para el ser humano y el ambiente (Huber, 2008). Los escasos reportes del efecto del 1-MCP en frutos de uchuva, indican que con este inhibidor de la acción de etileno se disminuyó notablemente la tasa respiratoria, la producción de etileno, el cambio de color y la pérdida de firmeza (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008).

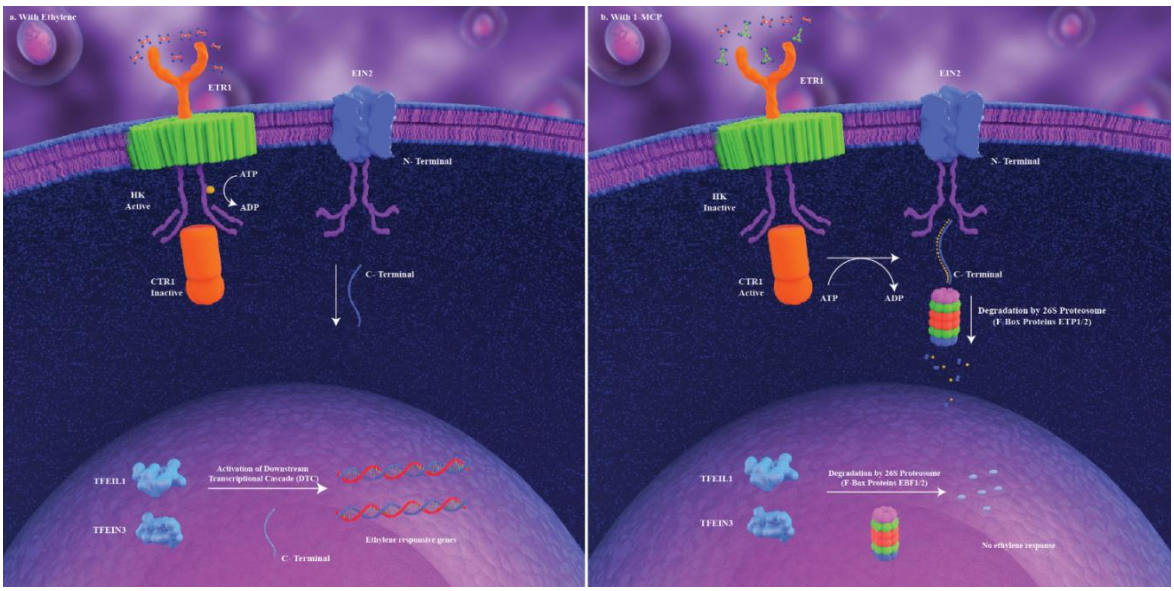


Figura 2-23: Efecto del etileno (a) y del 1-MCP (b) en la activación de la expresión de los genes de respuesta al etileno. En presencia de etileno (a) la HK está activa, produciendo la inactivación de la actividad quinasa de CTR1. La ausencia de la fosforilación de EIN2 resulta en la ruptura del extremo c-terminal de EIN2 y su posterior localización en el núcleo, donde puede activar la cascada transcripcional corriente abajo promovida por los factores de transcripción TFEIN3 y TFEIL1. En presencia de 1-MCP (b) la HK está inactiva, produciendo la activación de la actividad quinasa de CTR1, la cual fosforila el extremo c-terminal de EIN2 marcándolo para la degradación por parte del proteosoma 26S (proteínas F-box ETP1/2) y evitando así su localización nuclear. De esta manera, los factores de transcripción TFEIN3 y TFEIL1 son también marcados para la degradación por parte del proteosoma 26S (proteínas F-box EBF1/2) inhibiendo la expresión de los genes de respuesta al etileno.

El 1-MCP también regula la biosíntesis de etileno a través de la inhibición del proceso autocatalítico (Blankenship y Dole, 2003). Dal Cin et al. (2006) y Yang et al. (2013) reportan que el 1-MCP redujo de forma significativa la síntesis de etileno y la expresión del gen *ACS* en frutos de manzana, resultados que los atribuyen a la reducida expresión de los genes Md-ETR1 y Md-ERS1. Interesantemente, debido a la similitud química entre el 1-MCP y el ácido 1-aminociclopropano 1-carboxílico (1-ACC; precursor inmediato de la biosíntesis de etileno), es posible que el 1-MCP también disminuya la biosíntesis del etileno mediante inhibición competitiva de la enzima ACC oxidasa (ACO), la cual cataliza

la conversión de 1-ACC en etileno (Cara y Giovannoni, 2008). Al respecto, Chiriboga et al. (2012), mencionan que aunque la inhibición de la producción de etileno por 1-MCP ha sido bien descrita, el sitio exacto en la ruta de biosíntesis de etileno en la que el 1-MCP está implicado aún no está claramente definido. Al parecer es mediante la represión de la expresión y la actividad de *ACO* (Chiriboga et al., 2012), tal como lo reportan Yang et al. (2013) para frutos de manzana.

Por lo anterior y teniendo en cuenta que las modificaciones fisiológicas y bioquímicas inducidas por el 1-MCP y el etileno no son bien conocidas en los frutos de uchuva, el objetivo de esta investigación fue estudiar la regulación de algunas respuestas fisiológicas del fruto de uchuva bajo la aplicación poscosecha de etileno y 1-MCP.

2.6.4 Materiales y métodos

Ubicación

Los frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo Colombia fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada (Boyacá, Colombia) ubicado a 2630 msnm con temperatura ambiental promedio de 14°C. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Poscosecha de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con 3 tratamientos, estos fueron: etileno (etefon, 1000 µL L^{-1}), 1-metilciclopropeno (1-MCP; 1 µL L^{-1}), y un control sin aplicación. Para la aplicación de etileno se hizo inmersión de los frutos en EthrelTM (I.A. Acido-2-cloroetil-fosfónico) por 10 minutos. Para el 1-MCP (Rohm and Haas), los frutos fueron puestos en una cámara hermética de 2 L junto con el 1-MCP, las condiciones de aplicación se realizaron de acuerdo a Herrera (2007). Los frutos fueron expuestos al tratamiento por 24 h a temperatura ambiente. Después de los tratamientos, todos los frutos, incluyendo los del control fueron empacados en termoformados de polietilentereftalato (PET) y fueron dejados a temperatura ambiente (20°C, 75% HR). Cada tratamiento tuvo 4 repeticiones,

para un total de 12 unidades experimentales (UE). Cada UE estuvo compuesta por 125g de frutos sin cáliz, cosechados en estado pintón con los siguientes valores de color: L*=65,85, a*=10,66, b*=52,6 y IC=3,10. Se realizaron mediciones de las variables a los 1, 6 y 11 días después de cosecha.

Cuantificación de compuestos volátiles, color instrumental y firmeza

Los compuestos volátiles mayoritarios analizados fueron octanoato de etilo, butanoato de etilo, decanoato de etilo y butanoato de butilo, para lo cual se realizó microextracción en fase sólida con espacio de cabeza HS-SPME. Para la identificación de compuestos volátiles se utilizó un cromatógrafo de gases Agilent Technologies 7890A acoplado a un espectrómetro de masas Agilent Technologies 5975C, los espectros obtenidos fueron comparados con aquellos de la librería NIST 8. Complementariamente se utilizó el índice de Kovats, que se calculó usando la serie homóloga de n-alcanos bajo las mismas condiciones de operación.

Para la cuantificación del color se realizaron tres lecturas en la zona ecuatorial de cada fruto de parámetros del sistema CIELab L*, a* y b*, con colorímetro digital Konica-Minolta CR-410. A partir de estos parámetros se calculó el índice de color (IC), IC= (1000 x a*)/(L* x b*). La firmeza se determinó mediante lectura en la zona ecuatorial con un penetrómetro digital PCE-PTR200 con aproximación 0,05 N.

Extracción y purificación parcial de las enzimas HK y ACC oxidasa

La extracción y purificación parcial de las enzimas HK y ACC oxidasa fue realizada mediante la metodología establecida por Dupille y Zacarías (1996). Para obtener el extracto enzimático crudo se pesó aproximadamente 1,0 g de tejido vegetal de uchuva y se trituró con nitrógeno líquido, hasta conseguir un polvo homogéneo. Se adicionaron 10 mL de buffer Tris-HCl 0,5 M (pH 7,5) con 15% de glicerol, 30 mM de ascorbato de sodio, 5 mM de ditiotreitol (DTT) y 5% de polivinilpolipirrolidona (PVPP), se agitó durante 60 min a 4 °C y luego se centrifugó a 4,000 x g y 4 °C durante 30 min. Para realizar el fraccionamiento del extracto enzimático crudo por cromatografía de exclusión por tamaño, se activó el gel de filtración Sephadex G-25M (distribución de tamaño de partícula de 20 –

80 μm) con 15 mL del buffer de extracción a 4 °C. Una alícuota de 3,0 mL del extracto enzimático crudo fue eluída a través del gel de filtración con el buffer de extracción a un flujo de 1,0 mL min^{-1}. Se recogieron 60 fracciones de 1 mL cada una y a cada fracción se le determinó la concentración de proteína por el método de Bradford (Bradford, 1976) empleando albúmina sérica bovina (BSA) como patrón y la actividad de las enzimas ACC oxidasa y HK.

Ensayo de actividad enzimática in vitro

La determinación de la actividad de la enzima ACC oxidasa fue realizada mediante la metodología establecida por Dupille y Zacarías (1996). En un vial de vidrio de 5 mL se adicionaron 300 μL de una solución que contenía 1-ACC 1,5 mM, $FeSO_4$ 255 μM, ascorbato de sodio 30 mM y $NaHCO_3$ 100 mM, seguido de la adición de 400 μL de agua desionizada y 300 μL del extracto enzimático parcialmente purificado. El vial fue sellado herméticamente con un sello de silicona y el medio de reacción se incubó a 30 °C durante 30 min. Después de este tiempo, el etileno acumulado en 500 μL del espacio de cabeza fue analizado por cromatografía de gases mediante la metodología establecida por Fiserová *et al.* (2008). Se empleó un cromatógrafo de gases Agilent 6820 con un detector de ionización con llama (FID). Se empleó una columna capilar de Alumina Agilent J&W de 30 m x 0,53 mm x 0,25 μm. Las condiciones cromatográficas fueron las siguientes: temperatura del inyector de 70 °C, temperatura del horno de 50 °C y temperatura del detector FID de 250 °C. Se utilizó helio como gas de arrastre a un flujo de 7,0 mL min^{-1} y los gases de combustión del detector FID fueron aire seco e hidrógeno con flujos de 200 y 20 mL min^{-1}, respectivamente. Para la cuantificación se empleó un patrón de etileno (AGA, Colombia) con una concentración de 100 ppm en nitrógeno. La actividad de la enzima ACC oxidasa fue expresada como los μmol de etileno generados por minuto por mg de proteína (μmol C_2H_4 min^{-1} mg^{-1} proteína). La concentración de proteína del extracto enzimático parcialmente purificado fue determinada mediante el método de Bradford linealizado por Zor y Selinger (1996).

La determinación de la actividad de la enzima HK fue realizada por cromatografía líquida de alta eficiencia en fase reversa con detector de índice de refracción (RID) termostatado a 40 °C. Se mezclaron 500 μL de una solución que contenía histidina 1,0 mM, KCl 50 μM, $MnCl_2$ 10 mM y ATP 1 mM, seguido de la adición de 200 μL de buffer de extracción y 300 μL del extracto enzimático parcialmente purificado. El medio de reacción se incubó a 30 °C durante 45 min, la reacción se detuvo por adición de 500 μL de ácido tricloroacético (TAC) al 1% con EDTA 0,5 mM y se centrifugó a 6000 rpm y 4 °C durante 60 min (Gamble *et al.*, 1998).

Para la detección de la histidina consumida durante la reacción, se empleó un cromatógrafo líquido de alta eficiencia Shimadzu LC-20AT con un detector RID y un loop de inyección de 20 μL. La elución isocrática se realizó con la fase móvil amino acid analysis Eluent A Concentrate ACCQ Tag (Waters) compuesta por acetonitrilo con ácido fórmico 0,2% pH 4,95 a un flujo de 1,0 mL min^{-1}. Se empleó una columna de fase reversa RP-18 Phenomenex de 250 mm x 4,6 mm x 5 μm a temperatura ambiente (20 °C). La actividad de la enzima HK fue expresada como los μmol de histidina consumidos por minuto por mg de proteína (μmol HisP min^{-1} mg^{-1} proteína). La concentración de proteína del extracto enzimático parcialmente purificado fue determinada mediante el método de Bradford linealizado por Zor y Selinger (1996).

Determinación de la inhibición cinética del 1-MCP sobre la actividad de las enzimas ACC oxidasa y HK

Se realizó *in vitro* con el extracto enzimático de frutos de uchuva obtenido como se explicó anteriormente y aplicando dos sustratos, 1-ACC para la enzima ACO e Histidina para la enzima HK. En un experimento se construyeron perfiles cinéticos con seis concentraciones del sustrato 1-ACC (0, 20, 40, 60, 80, y 100 μM), en otro experimento los perfiles cinéticos se realizaron con seis concentraciones de Histidina (0, 20, 40, 60, 80, y 100 μM). En los dos experimentos se aplicaron diferentes concentraciones de 1-MCP que fueron 0, 20, 40, 60, 80, y 100 μM. Las aplicaciones se hicieron por triplicado. Posteriormente se midió la actividad de la enzima ACO y HK como se reportó en el

apartado anterior. Con estos datos se calculó la gráfica de los dobles recíprocos de Lineweaver Burk para calcular constantes cinéticas (Km, Vmax, Ki) y establecer el mecanismo de inhibición (competitiva, no competitiva o acompetitiva).

Estudios teóricos

La estructura de cada enzima fue obtenida del banco de datos de proteinas (http://www.rcsb.org/pdb). Las enzimas buscadas fueron ETR1 del receptor de etileno de *Arabidopsis Thaliana* (pdb codigo 1DCF), y ACC oxidasa de *Petunia hybrida* (EC 1.14.17.4, pdb código 1W9Y).

La estructura del etileno, 1-ACC y 1-MCP se optimizaron completamente utilizando la teoría funcional de la densidad (DFT) con el funcional B3LYP, como se implementó en GAMESS (General Atomic and Molecular Electronic Structure System) versión mayo 1 de 2012 (Schmidt *et al*., 1993) y el conjunto de bases 6-311 (d,p). Los efectos del disolvente se simularon mediante la colocación de soluto en un medio acuoso dieléctrico de simulación, usando el modelo IEF-PCM (Cossi et al., 1998). La optimización geométrica y los cálculos de energía se realizaron en este medio.

El protocolo básico de docking fue llevado a cabo usando la configuración predeterminada proporcionada por AutoDock Tools (**ADT**) de acuerdo con Neuhaus (2010). Las enzimas y sustratos fueron convertidos al formato pdbqt en ADT. Se utilizó el algoritmo genético lamarckiano con un tamaño de población de 150 dockings y 5 millones de evaluaciones energéticas. Todos los otros parámetros, como por ejemplo, tasa de cruce y la tasa de mutación, se llevaron a cabo con la configuración predeterminada. El tamaño de la cuadrícula para especificar el espacio de búsqueda se fijó en 21 x 21 x 21 $Å^3$ en una posición centrada con un punto de espaciamiento de la cuadrícula de 0,375 Å. El Autodck 4,0 fue lanzado de ADT en el sistema operativo Devian-Linux y los registros del docking fueron analizados en la interfaz gráfica de usuario de ADT. La energía de acoplamiento fue definida como la suma las energías intermoleculares e internas. Para un docking representativo, la orientación o posición con la más baja energía libre estimada (AG) de

unión corresponde a la energía de acoplamiento y los sistemas de energía libre sin acoplar fueron escogidos en cada cálculo. La energía libre de unión fue expresada como kcal mol^{-1}.

Análisis de datos

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey ($P<0,05$). Se utilizó el software estadístico Statgraphics.

2.6.5 Resultados y discusión

Respuestas fisiológicas del fruto de uchuva

Dentro de los compuestos volátiles analizados, cuyos perfiles HS-SPME-GC-MS se presentan en la figura 2-24, el octanoato de etilo fue el compuesto volátil de mayor abundancia en los frutos de uchuva, junto con el butanoato y el decanoato de etilo presentaron el mismo comportamiento, pues en el testigo y con etileno la concentración de estos compuestos volátiles fue alta, siendo mayor con etileno, después del día 6 los volátiles disminuyeron en estos dos tratamientos. Con 1-MCP la concentración en el día 6 fue casi nula, no obstante después se observó un incremento. El butanoato de etilo, mostró un comportamiento similar, con la diferencia de que no disminuyó después del día 6 en ningún tratamiento (Figura 3). En general se encontró que los esteres evaluados en los frutos de uchuva incrementan su concentración con la aplicación de etileno, mientras que con 1-MCP disminuyen. Estos resultados concuerdan con lo encontrado en manzana y melón, donde la producción de volátiles fue inhibida por la aplicación de 1-MCP, o acelerada por tratamientos con etileno (Defilippi et al., 2005; Yahyaoui et al., 2002).

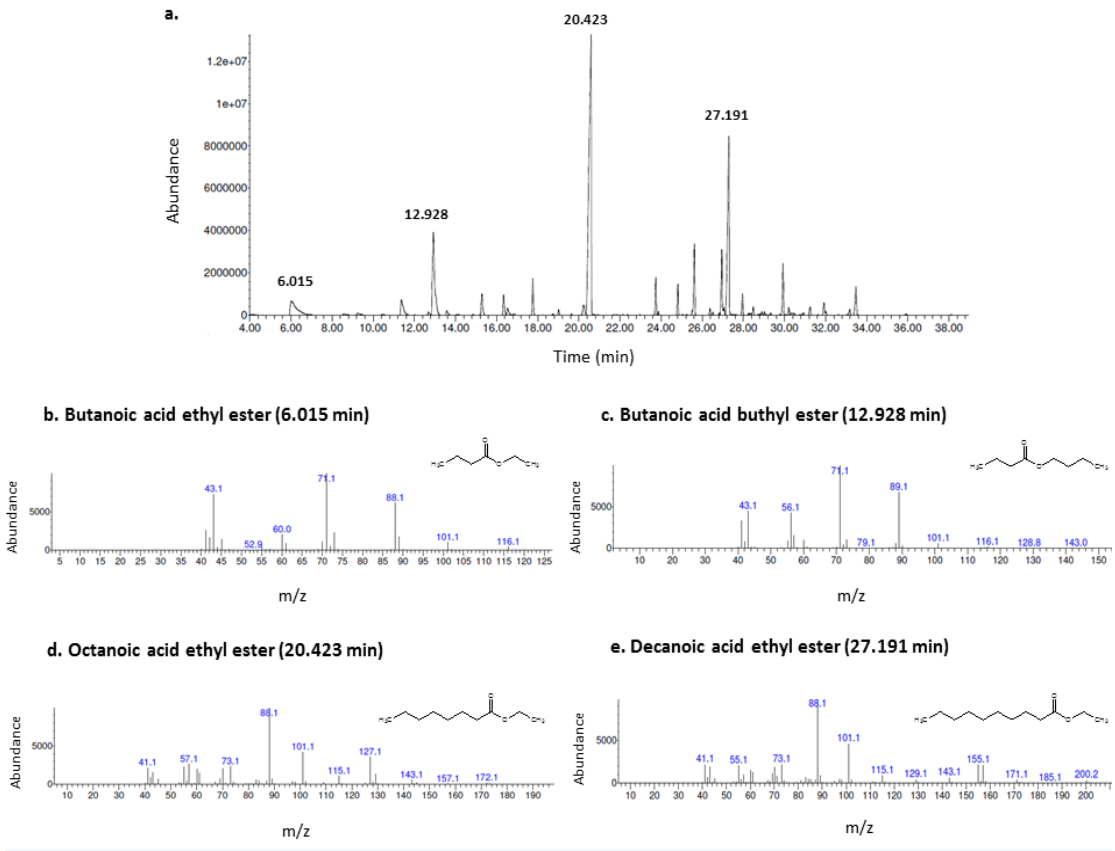


Figura 2-24: Perfil HS-SPME-GC-MS de los volátiles obtenidos del fruto de uchuva (a). Espectro de masas del butanoato de etilo (b), butanoato de butilo (c) octanoato de etilo (d) y decanoato de etilo (e).

Estudios previos han reportado el papel del etileno en la inducción de esteres volátiles en frutos climatéricos (Flores et al., 2002; Beekwilder et al., 2004; Defilippi et al., 2004), en particular en el control de la enzima alcohol acil transferasa (Yahyaoui et al., 2002; Defilippi et al., 2005), enzima que cataliza el último paso en la biosíntesis de esteres mediante la acetilación de alcoholes, es decir, que trasfiere un grupo acil-CoA a un alcohol, y puede ser considerado como el último punto de control en la emisión de estos compuestos (Pérez y Sanz, 2008). También se ha reportado que el etileno regula el paso de la reducción de ácidos grasos y aldehídos y, parcialmente, el paso de esterificación en la vida de esteres alifáticos, lo cual puede indicar que las enzimas aldehído deshidrogenasas implicadas en esta vía son etileno dependientes (Flores et al., 2002), y posiblemente explicaría el incremento de esteres en presencia de etileno y la disminución en presencia de 1-MCP en los frutos de uchuva.

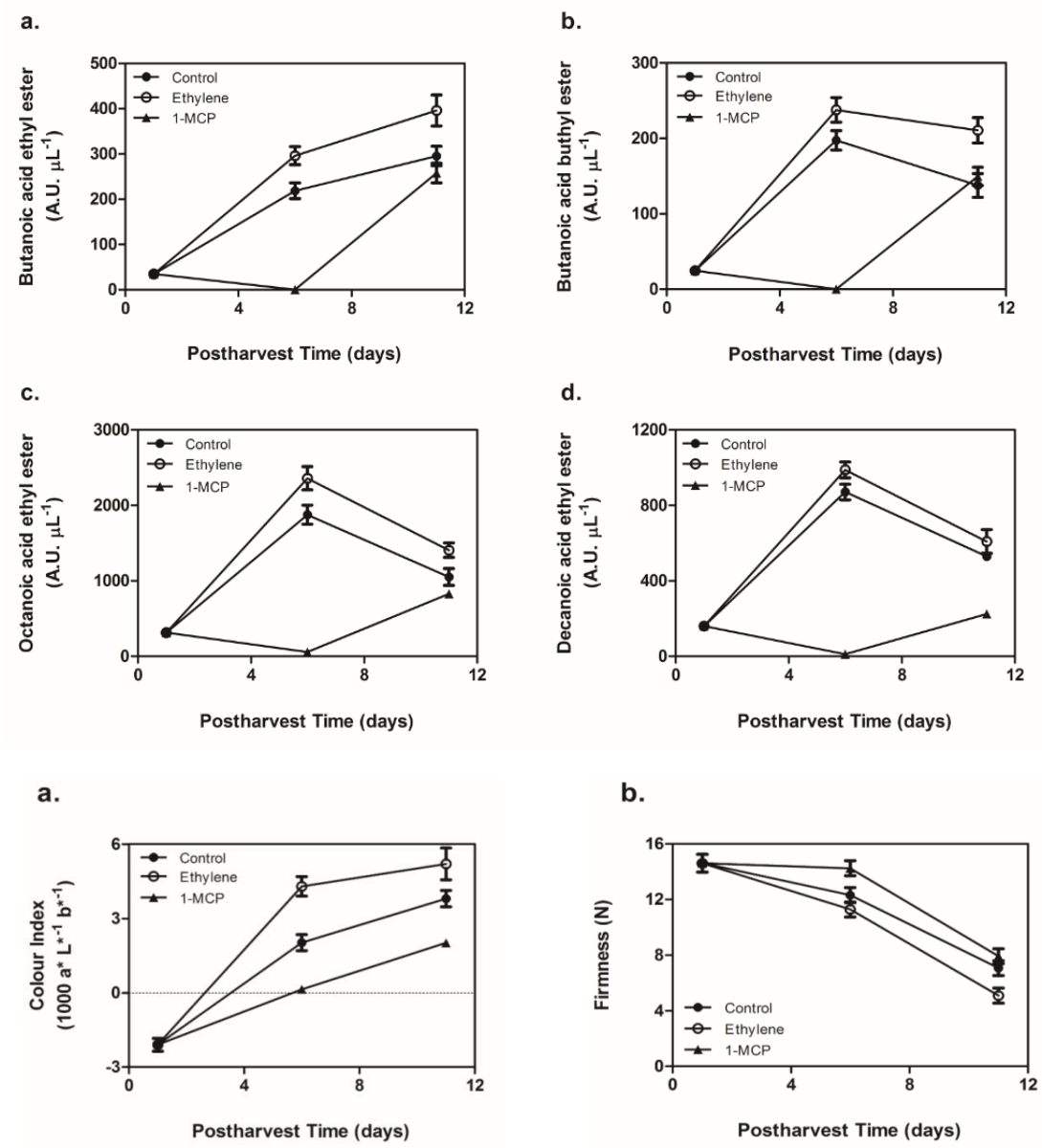


Figura 2-25: Efecto del etileno y del 1-MCP sobre la emisión de los volátiles butanoato de etilo (a), butanoato de butilo (b) octanoato de etilo (c) y decanoato de etilo (d), sobre el color (a) y la firmeza (b) del fruto de uchuva durante la maduración. Las barras verticales indican el error estándar (n=4).

El IC de los frutos de uchuva incrementó continuamente durante el almacenamiento, pero este cambio fue significativamente más bajo en los frutos con 1-MCP, en comparación con el etileno y el testigo (Figura 2-25). Estudios demuestran que el 1-MCP disminuye la actividad de la enzima clorofilasa, y por tanto, la pérdida de clorofila es menor (Watkins, 2006; Sun et al., 2012). Gutiérrez et al. (2008) reportan que el 1-MCP retrasa el cambio de

color en frutos de uchuva, lo cual coincide con lo encontrado en este estudio. Con relación al efecto del etileno, se ha encontrado que acelera la degradación de la clorofila e interviene en la expresión de genes que codifican para carotenoides y otros compuestos (Rodrigo y Zacarías, 2007), en el caso de la uchuva, el pigmento predominante en la maduración es el beta-caroteno (Fischer et al., 2000).

La firmeza de los frutos de uchuva disminuyó durante la poscosecha. Con diferencias significativas, la pérdida de firmeza fue menor con la aplicación de 1-MCP y mayor con el tratamiento de etileno (Figura 2-25). La principal causa de pérdida de firmeza en frutos es la actividad de enzimas que hidrolizan polisacáridos estructurales y de reserva. En frutos de uchuva la actividad poligalacturonasa (PG), pectinmetilesterasa y algunas glicosidasas al parecer están relacionadas con la pérdida de firmeza del fruto, donde la PG correlaciona con la presencia de etileno en el fruto (Majumder y Mazumdar, 2002), esto puede indicar la posible relación que hay entre la presencia de etileno y la pérdida de firmeza de los frutos de uchuva, que a su vez, explicaría la menor pérdida de firmeza con el tratamiento de 1-MCP. Resultados similares también fueron encontrados en uchuva por Gutiérrez et al. (2008).

Actividad de la enzima HK

La actividad de la enzima HK fue significativamente mayor en los frutos de uchuva tratados con etileno, seguida del control y con menor actividad en los frutos con aplicación de 1-MCP (Figura 2-26). Cuando el etileno es percibido por los receptores, la señal de etileno se envía a través de una secuencia de eventos bioquímicos que regulan la expresión de genes relacionados con la actividad de enzimas implicadas en la maduración de frutos (Lacey y Binder, 2014; Binder, 2008; Kesari *et al*., 2007). Experimentos genéticos sugieren que la unión del etileno al receptor ETR1 activa la HK (Hall et al., 2012), por esta razón, se piensa que el incremento de la actividad HK es un indicativo de la unión entre el etileno y el receptor, lo cual explicaría el aumento de la HK en frutos de uchuva en presencia de etileno.

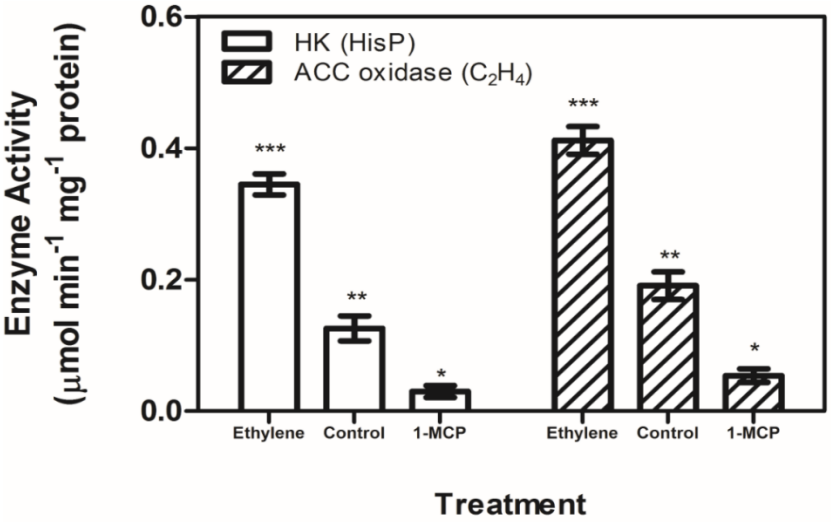


Figura 2-26: Efecto de la aplicación de etileno y 1-MCP en la actividad de las enzimas HK y ACC oxidasa extraídas del fruto de uchuva (*Physalis peruviana*). Las unidades de actividad enzimática son μmol HisP min^{-1} mg^{-1} proteína para HK y μmol C_2H_4 min^{-1} mg^{-1} proteína para ACC oxidasa. Asteriscos diferentes indican diferencias significativas, establecidas con la prueba de diferencias mínimas significativas de Fisher LSD ($p<0.05$).

Por el contrario, cuando el 1-MCP se une irreversiblemente a los receptores de etileno la actividad de la HK en los frutos de uchuva disminuye y no se genera respuesta a etileno. Al respecto, la abundancia y la actividad de los receptores son afectadas por la estabilidad de la proteína (Kevany et al., 2007), y por cambios a nivel de fosforilación (Kamiyoshihara et al., 2012). En concordancia, otros estudios reportan que la aplicación de 1-MCP disminuyó los niveles de mRNA de receptores de etileno en frutos de ciruela (El-Sharkawy et al., 2007) y manzana (Yang et al., 2013).

Actividad de la enzima ACC oxidasa

Con diferencias significativas, se observó mayor actividad de la enzima ACO con la aplicación de etileno, mientras que los frutos tratados con 1-MCP presentaron la menor actividad de esta enzima (Figura 2-27). En frutos de manzana y durazno, el etileno climatérico en la maduración es acompañado por un incremento en la acumulación de transcriptos de ACS y ACO y los genes implicados son inducidos por etileno y participan en la síntesis autocatalítica de esta hormona (Dal Cin et al., 2006). En concordancia, el aumento de la actividad ACO observada en los frutos de uchuva con aplicación exógena de etileno, puede indicar la presencia de biosíntesis autocatalítica de etileno en esta

especie, por tratarse de un fruto climatérico (Valdenegro et al., 2012), pues según Woodson et al. (1992), el incremento en la transcripción de genes de ACO generan un incremento en la síntesis de etileno.

Por el contrario, el 1-MCP al disminuir la acción del etileno, también disminuye la expresión y la actividad de *ACO* (Chiriboga et al., 2012), tal como se encontró en frutos de manzana (Yang et al., 2013), como consecuencia, se disminuye la biosíntesis de etileno. De esta manera, es posible pensar que los frutos de uchuva tratados con 1-MCP producen menor cantidad de etileno y potencialmente pueden tener mayor vida poscosecha, lo cual coincide con lo reportado por Valdenegro et al. (2012) y Gutiérrez et al. (2008).

Determinación de la inhibición cinética del 1-MCP sobre la actividad de las enzimas ACC oxidasa y HK

En la figura 2-27 se presenta la cinética de la inhibición de la actividad de las enzimas ACO y HK por la acción del 1-MCP. La actividad de la ACO aumentó de forma logarítmica en función de la concentración del sustrato 1-ACC, siendo mayor la actividad ACO en la mayor dosis de 1-ACC (100 µM), sin embargo, la actividad ACO disminuyó a medida que la concentración de 1-MCP aumentó de 0 a 100 µM (Figura 2-27a y b), este resultado se confirma con lo reportado en la figura 2-27e, donde el valor de Vmaxapp permaneció constante con la adición de 1-MCP pero el Km incrementó de forma lineal en función del incremento del 1-MCP.

La cinética de la enzima HK indicó que la actividad de esta se incrementó con el aumento del sustrato, en este caso la histidina, sin embargo, el incremento fue mayor cuando la histidina pasó de 0 a 20 µM. En relación al efecto del 1-MCP, se encontró que la actividad HK disminuyó notablemente con el aumento del 1-MCP de 0 a 20 µM, después de 60 µM hasta 100 µM, la inhibición de HK fue parecida (figura 2-27c), sin embargo, en la figura 1d, se observó que la inhibición de HK fue proporcional a la dosis del 1-MCP. Así mismo, se encontró que el Km permaneció constante en función de la dosis de 1-MCP, mientras que la VmaxApp disminuyó (Figura 2-27f).

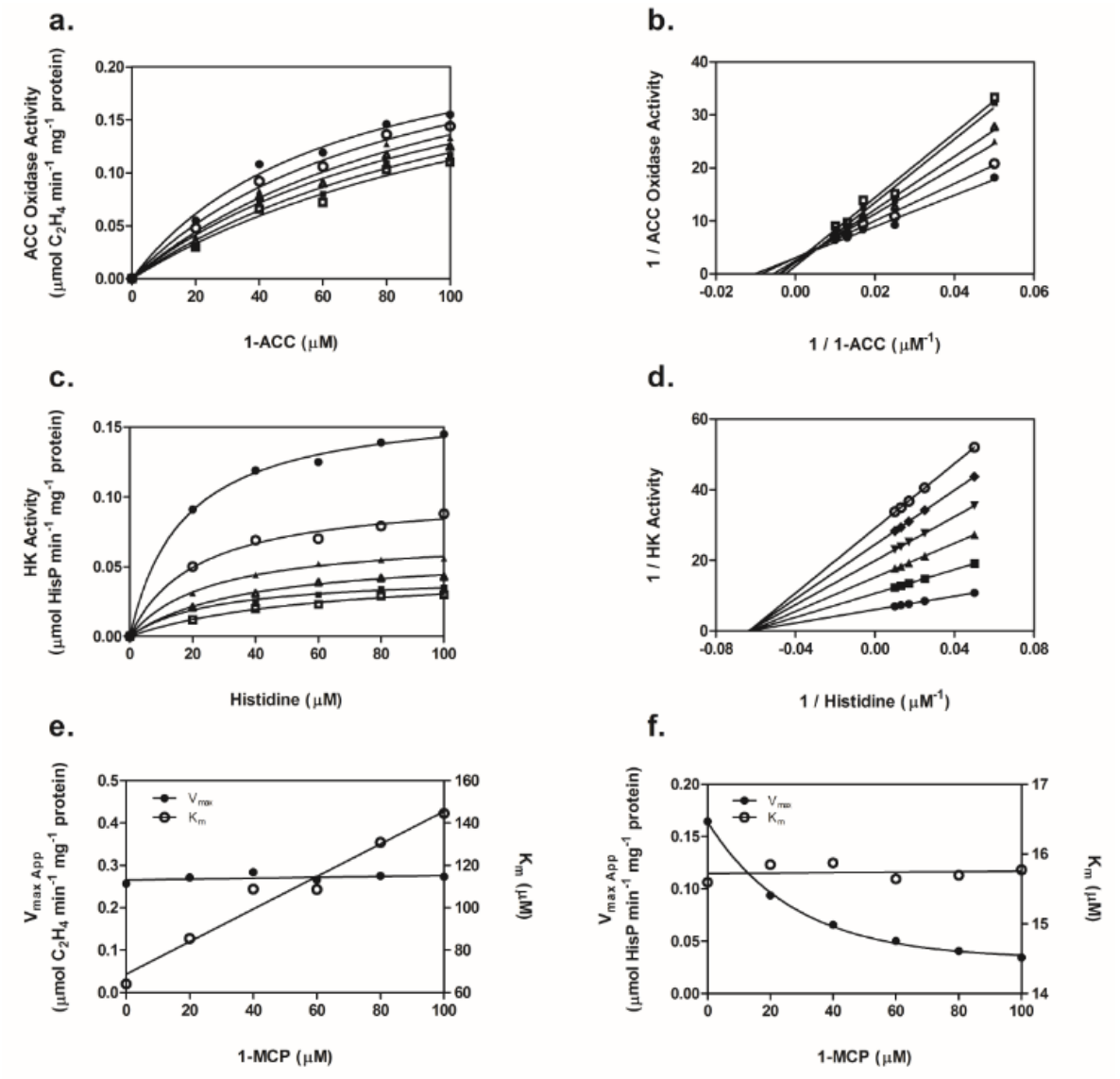


Figura 2-27: Experimentos *in vitro* para la determinación del efecto cinético de la concentración del 1-MCP sobre la actividad de las enzimas ACC oxidasa (a y b) y HK (c y d). Efecto de la concentración de 1-MCP sobre la V_{maxapp} y K_m de la ACC oxidasa (e) y HK (f). Se observa que el 1-MCP se comporta como un inhibidor competitivo de la ACC oxidasa y como un inhibidor no competitivo de la HK. Las concentraciones de 1-MCP empleadas fueron 0 (●), 20 (○), 40 (▲), 60 (△), 80 (■), y 100 µM (□).

De acuerdo con los mecanismos y leyes de velocidad de la inhibición del 1-MCP sobre la ACO y la HK. La inhibición del 1-MCP sobre la enzima ACC oxidasa es competitiva, debido a que el 1-MCP (inhibidor) se une reversiblemente al sitio activo de la ACO formando un complejo (EI) similar al complejo ES pero catalíticamente inactivo.

Respecto a la HK, la inhibición que genera el 1-MCP es no competitiva, debido a que el 1-MCP se une irreversiblemente a la enzima (EI) y al complejo ES (ESI) en un sitio diferente al sitio activo, afectando la estructura tridimensional de la enzima y evitando la correcta orientación del sustrato (His) en el sitio activo. Sin embargo, es importante mencionar que la HK hace parte del receptor membranal del etileno (Lacey y Binder, 2014), y es a este receptor al cual se une de forma irreversible el 1-MCP (Blankenship y Dole, 2003), y en consecuencia, la HK se inactiva (Figura 2-23), bloqueando la cascada de transducción de señales que conllevan a la expresión de genes relacionados con la respuesta al etileno (In et al., 2013).

Se evaluó la afinidad relativa entre el sustrato (etileno para ETR1 y 1-ACC para ACC oxidasa) y el inhibidor (1-MCP) para cada enzima. En los dos casos, el inhibidor (1-MCP) interactúa más fuertemente (es más afín) que los respectivos sustratos. Para el ETR1, el inhibidor (1-MCP) es 4 veces más afín que el sustrato (etileno), mientras que para ACC oxidasa, el inhibidor (1-MCP) es 8 veces más afín que el sustrato (1-ACC; Figura 2-28 y 2-29). Por tanto, es posible que el 1-MCP sea más efectivo (el doble) actuando sobre la ACC oxidasa que sobre el ETR1. La alta afinidad (y a su vez, la alta capacidad de inhibición) del 1-MCP por la ACC oxidasa se puede explicar debido a la gran semejanza estructural que existe entre el sustrato (1-ACC) y el inhibidor (1-MCP) de esta enzima. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Blankenship y Dole (2003), quienes afirman que la afinidad del 1-MCP por los receptores es 10 veces mayor a la del etileno.

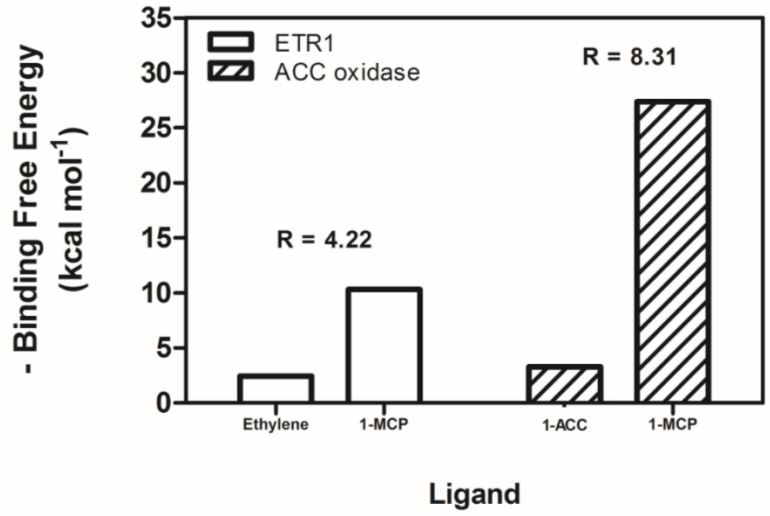


Figura 2-28: Energía libre de la unión del etileno y del 1-MCP al receptor ETR1 y del 1-ACC y el 1MCP a la ACC oxidasa.

De otra parte, los sustratos (izquierda) y el inhibidor (derecha) acoplaron exactamente en el mismo sitio, sugiriendo que ese sitio es el sitio activo de la enzima y además que es el sitio de acción del inhibidor (1-MCP). Esto aplica para las dos enzimas (arriba ETR1, abajo ACC oxidasa) porque los resultados fueron similares.

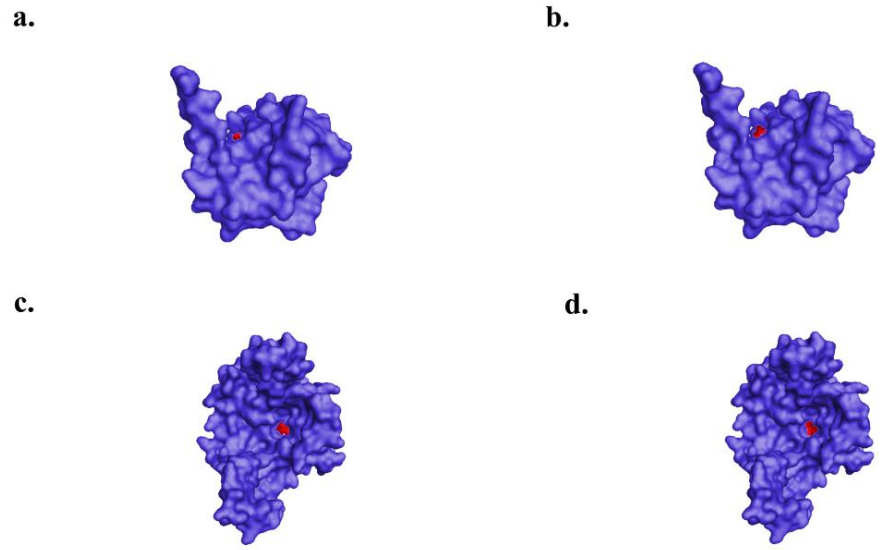


Figura 2-29: Esquema de la unión entre el receptor ETR1 y etileno (a), receptor ETR1 y 1-MCP (b), ACO y 1-ACC (c) y ACO y 1-MCP.

En el caso de la ACC oxidasa, el resultado del docking (teórico) coincide con el resultados de la cinética de la enzima (experimental). En los ensayos experimentales, el perfil cinético observado (figuras 2-27a, b y c) para la ACC oxidasa sugiere que el 1-MCP es un

inhibidor competitivo de esta enzima. Esto coincide con el dato teórico porque debido a la semejanza estructural existente entre el inhibidor (1-MCP) y el sustrato (1-ACC), estos acoplaron en el mismo sitio activo de la enzima (Figuras 2-27c (1-ACC) y 2-27d (1-MCP)), lo que es muy característico de la inhibición competitiva. Aunque tanto 1-ACC (sustrato) y 1-MCP (inhibidor) acoplaron en el mismo lugar (inhibición competitiva), el 1-MCP tuvo mayor afinidad (Figura 2-29). Esto significa que apenas el fruto es sometido a un tratamiento con 1-MCP, este será muy efectivo porque podrá desplazar fácilmente (competir) al etileno y al 1-ACC, de los sitios activos del receptor ETR1 y de la enzima ACC oxidasa, respectivamente.

Estos resultados comprueban la afinidad que presentan el 1-MCP por el receptor ETR1, y que al unirse al receptor inhibe la unión con etileno, esto conlleva a que los respuesta fisiológicas dependientes de etileno no se presenten. De otra parte, hay una fuerte evidencia de que el 1-MCP puede unirse reversiblemente al sitio activo de la ACO porque químicamente es muy parecido al 1-ACC, de esta manera, se genera una inhibición competitiva y como resultado no se produce etileno.

De esta manera, el 1-MCP es un compuesto químico que no solo ocupa los receptores del etileno, sino que también tendría la capacidad de inhibir la ruta de biosíntesis de etileno, como consecuencia, presentaría dos niveles de control de etileno en productos agrícolas, lo cual, hace que este producto sea uno de los más importantes para retrasar los procesos inducidos por etileno en la poscosecha de productos agrícolas.

2.6.6 Conclusiones

El tratamiento con 1-MCP produjo efectos opuestos al etileno en los frutos de uchuva. La aplicación de 1-MCP induce una disminución y/o inhibición de los parámetros relacionados con la síntesis y percepción de etileno, lo cual proporciona evidencia adicional de que la regulación de procesos fisiológicos y bioquímicos como el cambio de color, la pérdida de firmeza, la emisión de esteres volátiles, la actividad ACO y HK, son procesos que depende de la producción de etileno. Los estudios de cinética enzimática y

química teórica permiten dar una aproximación de que el 1-MCP no actúa solo a nivel de receptor, sino que también puede inhibir competitivamente la síntesis de etileno.

2.6.7 Referencias

Allouche, A.R. 2010. Gabedit: a graphical user interface for computational chemistry softwares. *Journal of Computational Chemistry*. 32 (1): 174 – 182.

B.P. Hall, S.N. Shakeel, M. Amir, N.U. Haq, X. Qu, G.E. Schaller. 2012. Histidine kinase activity of the ethylene receptor ETR1 facilitates the ethylene response in Arabidopsis Plant Physiol. 159, 682–695.

Barry, C y J. Giovannoni. 2007. Ethylene and FruitRipening. J PlantGrowthRegul. 26,143–159.

Binder, B. 2008. The ethylene receptors: complex perception for a simple gas. Plant Sci. 175, 8-17.

Blankenship, S.M., y Dole, J.M. 2003. 1-Methylcyclopropene: a review. Postharv. Biol. Technol. 28, 1–25.

Bouzayen, M., A. Latché. P. Nath y J. Pech. 2010. Mechanism of Fruit Ripening. Capitulo 16. En: Pua, E y M. Davey. 2010. Plant Developmental Biology – Biotechnological Perspectives. Volume 1. Ed: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 319-339p.

Bradford, M.M. (1976). A rapid sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*. 72: 248 – 254.

Chen, Y., N. Etheridge y E. Schaler. 2005. Ethylene signal transduction. Annals of Botany 95, 901–915.

Chiriboga, M.A., I. Recasens, W. Schotsmans, E. Dupille y C. Larrigaudiere. 2012. Cold-induced changes in ACC metabolism determine softening recovery in 1-MCP treated ‘conference’ pears. Postharvest Biology and Technology 68, 78–85.

Cossi, M., V. Barone, B. Mennucci, J. Tomasi, 1998. Ab-initio Study of Ionic Solutions by a Polarizable Continuum Dielectric Model, Chemical Physics Letters, 286, 253-260.

Dal Cin, V., F. Massimo, A. Botton y P. Tonutti. 2006. The ethylene biosynthetic and signal transduction pathways are differently affected by 1-MCP in apple and peach fruit. Postharvest Biology and Technology 42, 125–133.

Defilippi, B.G., Kader, A.A., y Dandekar, A.M. 2005. Apple aroma: alcohol acyltransferase, a rate limiting step for ester biosynthesis, is regulated by ethylene. Plant Sci. 168, 1199–1210.

Defilippi, B.G.; Dandekar, A.M.; Kader, A.A. 2004. Impact of suppression of ethylene action or biosynthesis on flavor metabolites in apple (*Malus domestica* Borkh) fruits. J. Agric. Food Chem. 52, 5694–5701.

Dupille, E.; Zacarías, L. (1996). Extraction and biochemical characterization of wound-induced ACC oxidase from citrus peel. *Plant Science*. 114: 53 – 60.

El-Sharkawy, I., Kim, W.S., El-Kereamy, A., Jayasankar, S., Svircev, A.M., Brown, D.C.W., 2007. Isolation and characterization of four ethylene signal transduction elements in plums (*Prunus salicina* L.). J. Exp. Bot. 58, 3631–3643.

Fischer, G., A. Herrera y P.J. Almanza. 2011. Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) En: Yahia, E.M. (ed.). Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits. Acai to citrus. Cambridge: Woodhead Publishing.

Fischer, G.; Ebert, G. y Lüdders P. Provitamin A carotenoids, organic acids and ascorbic acid content of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) ecotypes grown at two tropical altitudes, Acta Hort , 2000. Vol. 531, 263-267.

Fiserová, H.; Mikusová, Z.; Klems, M. (2008). Estimation of ethylene production and 1-aminocyclopropene-1-carboxylic acid content in plants by means of gas chromatography. *Plant, Soil and Enviromental*. 53 (2): 55 – 60.

Flores, F.; El-Yahyaoui, F.; De Billerbeck, G.; Romojaro, F.; Latche, A.; Bouzayen, M.; Pech, J.C.; Ambid, C. Role of ethylene in the biosynthetic pathway of aliphatic ester aroma volatiles in Charentais Cantaloupe melons. J Exp Bot 53: 201–206. 2002.

Friesner, R.A. (2005). *Ab initio* quantum chemistry: methodology and applications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 102 (19): 6648 – 6653.

Gamble, R.L.; Coonfield, M.L.; Schaller, G.E. 1998. Histidine kinase activity of the ETR1 ethylene receptor from *Arabidopsis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 95 (6): 7825 – 7829.

Gutiérrez, M.S., G.D. Trinchero, A.M. Cerri, F. Vilella y G.O. Sozzi. 2008. Different responses of goldenberry fruit treated at four maturity stages with the ethylene antagonist 1-methylcyclopropene. Postharvest Biol. Technol. 48, 199–205.

Herzberg, G. (1966). Electronic spectra and electronic structure of polyatomic molecules III. Van Nostrand. New York.

Hubert, D. 2008. Suppression of ethylene responses through application of 1-methylcyclopropene: a powerful tool for elucidating ripening and senescence mechanisms in climacteric and nonclimacteric fruits and vegetables. HortScience 43(1), 106-111.

In, B.C., J. Strablea, B.M. Binder, T.G. Falbel y S.E. Patterson. 2013. Morphological and molecular characterization of ethylene binding inhibition in carnations. Postharv. Biol. Technol. 86, 272–279.

Kamiyoshihara, Y., Tieman, D.M., Huber, D.J., Klee, H.J. 2012. Ligand-induced alterations in the phosphorylation state of ethylene receptors in tomato fruit. Plant Physiol. 160, 488-497.

Kesari, R., P. Trivedi y P. Nath. 2007. Ethylene-induced ripening in banana evokes expression of defense and stress related genes in fruit tissue. Postharv. Biol. Technol. 46, 136-143.

Kevany, B.M., Tieman, D.M., Taylor, M.G., Cin, V.D., Klee, H.J., 2007. Ethylene receptor degradation controls the timing of ripening in tomato fruit. Plant J. 51, 458–467.

Khan, A.N. 2006. Ethylene action in plants. Springer. Berlin, Heidelber, Germany. 206 p.

Klee, H y J. Giovannoni. 2011. Genetics and Control of Tomato Fruit Ripening and Quality Attributes. Annu.Rev. Genet. 45, 41–59.

Lacey, R. y B. Binder. 2014. How plants sense ethylene gas — The ethylene receptors. Journal of Inorganic Biochemistry 133, 58–62.

Majumder, K. y B. Mazumdar. 2002. Changes of pectic substances in developing fruits of cape-gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in relation to the enzyme activity and evolution of ethylene. Sc. Hortic. 96, 91-101.

Martínez-Romero, D., F. Guillén, S. Castillo y P. Zapata. 2009. Effect of ethylene concentration on quality parameters of fresh tomatoes stored using a carbón-heat hybrid ehylene scruber. Postharvet Biology and Technology, 51, 206-211.

Mworia, E.G., T. Yoshikawa, N. Yokotani, T. Fukuda, K. Suezawa, K. Ushijima, R. Nakano, Y. Kubo. 2010. Characterization of ethylene biosynthesis and its regulation during fruit ripening in kiwifruit, Actinidia chinensis 'Sanuki Gold'. Postharvest Biology and Technology 55,108–113

NIST. (2013). http://webbook.nist.gov/chemistry/ (Consultada el 06 de Marzo de 2013).

Novoa R., M. Bojacá, A. Galvis y G. Fischer. 2006. La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12°C (*Physalis peruviana* L.). Agron. Colomb. 24 (1), 77-86.

Pérez, A.G., y Sanz, C. (2008). Formation of Fruit Flavour. In: Fruit and Vegetable Flavour. B Bruckner, W S Grant (eds). Cambridge, England. pp:41-70.

Rodrigo, M.J., y Zacarias, L. (2007). Effect of postharvest ethylene treatment on carotenoid accumulation and the expression of carotenoid biosynthesis genes in the flavedo of orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) fruit. Postharvest Biol. Technol. 43, 14–22.

Schmidt, M.W.; Baldridge, K.K.; Boatz, J.A.; Elbert, S.T.; Gordon, M.S.; Jensen, J.H.; Koseki, S.; Matsunaga, N.; Nguyen, K.A.; Su, S.; Windus, T.L.; Dupuis, M.; Montgomery, J.A. (1993). General atomic and molecular electronic structure system. *Journal of Computational Chemistry*. 14 (11): 1347 – 1363.

Serek, M., Woltering, E.J., Sisler, E.C., Frello, S., y Sriskandarajah, S. (2006). Controlling ethylene responses in flowers at the receptor level, Biotechnology Advances 24,368–381.

Sun, B., H. Yan, N. Liu, J. Wei y Q. Wang. 2012. Effect of 1-MCP treatment on postharvest quality characters, antioxidants and glucosinolates of chinese kale. Food Chem. 131(2), 519-526.

Superfruit. 2011. Uchuva - the superfruit. En: http://www.uchuvasuperfruit.com; consulta: 13 de agosto de 2011.

Valdenegro, M., L. Fuentes, R. Herrera y M.A. Moya-León. 2012. Changes in antioxidant capacity during development and ripening of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit and in response to 1-methylcyclopropene treatment. Postharv. Biol. Technol. 67,110-117.

Watkins, C. 2006. The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables, Biotechnol. Adv. 24, 389-409.

Woodson, W.R., Park, K.Y., Drory, A., Larsen, P.B., Wang, H., 1992. Expression of ethylene biosynthetic pathway transcripts in senescing carnation flowers. Plant Physiology 99, 526–532.

Yahyaoui, F.E., Wongs-Aree, C., Latché, A., Hackett, R., Grierson, D., y Pech, J.C. (2002). Molecular and biochemical characteristics of a gene encoding an alcohol acyltransferase involved in the generation of aroma volatile esters during melon ripening. Eur. J. Biochem. 269, 2359–2366.

Yang, X., J. Song. L. Campbell-Palmer. S. Fillmore y Z. Zhang. 2013. Effect of ethylene and 1-MCP on expression of genes involved in ethylene biosynthesis and perception during ripening of apple fruit. Postharvest Biology and Technology. 78, 55–66.

Zor, T.; Selinger, Z. (1996). Linearization of the Bradford protein assay increases its sensitivity: theoretical and experimental studies. *Analytical Biochemistry*. 236: 302 – 308.

3. Caracterizar el efecto del 1-metilciclopropeno como inhibidor de la acción del etileno en el comportamiento poscosecha del fruto de uchuva

3.1 Comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (Physalis peruviana L.): Efecto de diferentes dosis y tiempos de exposición al 1-metilciclopropeno

Postharvest behavior of fruit cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.): Effect of different doses and exposure times at 1-methylcyclopropene

Helber Enrique Balaguera-López, Claudia Andrea Martínez Cárdenas y Aníbal Herrera Arévalo

3.1.1 Resumen

El cultivo de uchuva es una alternativa de producción para la economía de muchos países. El fruto es climatérico y se considera altamente perecedero con baja vida poscosecha. El objetivo fue evaluar el efecto de diferentes dosis y tiempos de exposición al 1-metilciclopropeno (1-MCP) sobre el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con arreglo factorial de tratamientos de 3x3+1, donde el primer factor fueron las dosis de 1-MCP (0,3; 1 y 3 µL L^{-1}) y el segundo factor correspondió al tiempo de tratamiento con 1-MCP (2, 12 y 24 h), más un testigo absoluto. Los frutos fueron almacenados a temperatura ambiente (16°C) y humedad relativa del 70% durante 15 días. Los resultados indicaron

que a medida que se incrementó la dosis y el tiempo de exposición al 1-MCP, el efecto sobre la maduración de los frutos de uchuva fue mayor. La aplicación de 3 µL L^{-1} de 1-MCP durante 24 h generó significativamente una menor producción de etileno, menor concentración interna de etileno, menor pérdida de firmeza, pérdida de peso y de acidez total titulable, en comparación con frutos sin aplicación. Este mismo tratamiento también produjo menores cambios en el índice de color, en el aumento en los sólidos solubles totales y en la relación de madurez. El 1-MCP se convierte en una herramienta útil con potencial para conservar la calidad de los frutos de uchuva durante la etapa de poscosecha.

Palabras clave: inhibidor de la acción del etileno, producción de etileno, maduración, fruto perecedero.

3.1.2 Abstract

The crop of cape gooseberry is an alternative production for the economy of many countries. The climacteric fruit is highly perishable and are considered low postharvest life. The objective was to evaluate the effect of different doses and exposure times at 1-methylcyclopropene (1-MCP) on postharvest behavior of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruit. It was used an experimental design completely randomized with factorial arrangement of treatments of 3x3 + 1, where the first factor were doses of 1-MCP (0.3, 1 and 3 µL L^{-1}) and the second factor corresponded to the time treatment with 1-MCP (2, 12 and 24 h), plus an absolute control. The fruits were stored at room temperature (16 °C) and relative humidity of 70% for 15 days. The results indicated that as the dose and duration of exposure to 1-MCP increased, the effect on fruit ripening cape gooseberry was higher. The application of 3 µL L^{-1} of 1-MCP for 24 h resulted in a significantly lower production of ethylene, lower internal ethylene concentration, less loss of firmness, loss of weight and total acidity compared to fruits without application. This treatment also produced minor changes in the color index, in the increase the soluble solids and maturity ratio. The 1-MCP becomes a useful tool with the potential to preserve the quality of the fruits of gooseberry during postharvest stage.

Key words: inhibitor of ethylene action, ethylene production, ripening, perishable fruit.

3.1.3 Introducción

El cultivo de uchuva (*Physalis peruviana* L.), es una alternativa de producción para la economía de muchos países, debido a que presenta buenas perspectivas e interés en los mercados internacionales, lo cual se deriva de las características nutricionales y propiedades medicinales que posee el fruto (Gastelum, 2012). Y que además le han permitido ser incluida en la lista de los "Superfrutos" (Superfruit, 2011; Fischer et al., 2011). Colombia es el mayor productor de uchuva a nivel mundial (Novoa et al., 2006), para el año 2013 presentó una producción de 12.873 t, en una área de 880 ha, con un rendimiento de 14,6 t ha^{-1} (Agronet, 2014). El ecotipo colombiano ha sobresalido en el mercado mundial por su dulce sabor, aroma y color brillante característico (Galvis et al., 2005), que son comercializados en mercados nacionales y también exportados a Norte América y Europa (Fischer et al., 2011; García *et al*., 2008).

El etileno regula la maduración y senescencia de productos agrícolas a nivel molecular, bioquímico y fisiológico (Kesari *et al.*, 2007), debido a que estimula la expresión de genes que codifican para las enzimas relacionadas con los cambios durante la maduración y/o senescencia (Jiang y Fu, 2000). El etileno tiene un papel doble en la poscosecha, por un lado, ocasiona que los frutos adquieran características organolépticas óptimas para su consumo, pero también es responsable de la senescencia de los tejidos, generando efectos desfavorables en la calidad (Bapat *et al*., 2010). Al respecto, la uchuva es un fruto que presenta un comportamiento climatérico (Gutiérrez et al., 2008; Novoa et al., 2006), con aumento en la síntesis de etileno (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008) y se considera altamente perecedero con baja vida poscosecha.

El etileno debe unirse a receptores del retículo endoplasmático, desencadenando una secuencia de transducción de señales que conllevan a la expresión de genes relacionados con enzimas que actúan durante la maduración (Jiang et al., 2004; Jiang y Fu, 2000; Bapat et al., 2010), dentro de las cuales se encuentra las enzimas que participan en la biosíntesis del etileno en un proceso autocatalítico (Giovannoni, 2004; Klee y Giovannoni, 2011). El 1-MCP es una olefina cíclica que ocupa los receptores del etileno de manera irreversible,

bloqueando la cascada de transducción de señales que conllevan a la expresión de genes relacionados con la respuesta al etileno (In et al., 2013). La afinidad del 1-MCP por los receptores es 10 veces mayor a la del etileno y actúa a más bajas concentraciones (Blankenship y Dole, 2003). A temperatura y presión estándar, es un gas (Blankenship y Dole, 2003), que no presenta olor, no es tóxico, además, es de fácil aplicación y altamente eficaz para proteger a muchas especies agrícolas de la acción del etileno, incluyendo, frutos, vegetales, flores cortadas y plantas en maceta (Serek *et al*., 2006; Watkings, 2006; Huber, 2008).

El 1-MCP está aprobado como seguro para humanos y ambiente por la EPA (Environmental Protection Agency) y registrado como un químico GRAS (generally recognized as safe) por la FDA en 2004. Este compuesto reduce las pérdidas por desórdenes fisiológicos en frutos, no solo en frutos climatéricos sino también en frutos no climatéricos (Youn-Moon, P. 2012). A temperatura y presión estándar el 1-MCP es un gas. En recientes formulaciones comerciales éste es acomplejado por α-ciclodextrina para producir un polvo soluble en agua, así como para mantenerlo seco (Nanthachai et al., 2007). El método de aplicación en general es volatilizar el 1-MCP, mezclando el polvo soluble y dispersándolo alrededor de los frutos. La maduración de banano es retrasada por la aplicación de 1-MCP a concentraciones de 0,01 µL L^{-1} por 24 h, además incrementando las concentraciones se logra un efecto por un periodo de tiempo más largo (Nanthachai et al., 2007).

El 1-MCP disminuye la producción de etileno (Ma *et al*., 2009; Cerqueira *et al*., 2009; Choi *et al*., 2008; Zhang *et al*., 2012), debido a que afecta su síntesis autocatalítica al reduce la expresión de genes que codifican para las enzimas ACS y ACO (Yang *et al.*, 2013; Klee y Giovannoni, 2011; Zhang *et al.*, 2012). A su vez, el 1-MCP también afecta la señalización del etileno, debido a que disminuye la expresión de genes que codifican para receptores de etileno (Owino *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2013). El 1-MCP puede retrasar la pérdida de firmeza (Villalobos *et al*., 2011; Choi *et al.*, 2008). También se ha reportado que el 1-MCP puede disminuir el contenido de azúcares y degradación de ácidos orgánicos en diferentes frutos (Singh y Pal, 2008; Zhang *et al*., 2009; Deaquiz *et al*., 2014;

Dussan *et al.*, 2011), entre otros. Además, el 1-MCP afecta la acumulación de licopeno en tomate (Zhang *et al*., 2009), y retrasa el desarrollo de color en frutos de pera (Villalobos *et al*., 2011) y tomate (Zhang *et al*., 2009).

La concentración de 1-MCP necesaria para bloquear la acción del etileno varía de acuerdo con la especie, cultivar, estado de maduración, capacidad de producción de nuevos receptores, tiempo y temperatura de exposición (Watkins, 2006). Las dosis óptimas varían entre especies, pero Blankenship y Dole (2003) reportan diferentes concentraciones y temperaturas para la aplicación de 1-MCP, las cuales se encuentran entre 0,1 µL L^{-1} a 100 µL L^{-1} a 20-25 °C por 6 a 24 h. Sin embargo, la concentración recomendada para productos de uso comercial (EthylBloc® y ™SmartFresh) está entre 100 a 500 µL L^{-1}, alrededor de 1.000 veces mayor, probablemente debido a una alta posibilidad de pérdidas del 1-MCP (Serek *et al*., 2006).

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes dosis y tiempos de exposición al 1-metilciclopropeno sobre el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.).

3.1.4 Materiales y métodos

Para el estudio, se utilizaron frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo Colombia en el grado 3 según Icontec 4580 (Icontec, 1999) completamente sanos y con tamaño homogéneo. Los cuales fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada (departamento de Boyacá, Colombia). El experimento y los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de Poscosecha de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

En un diseño experimental completamente al azar, se hizo un arreglo factorial de tratamientos de 3x3+1, donde el primer factor fueron las dosis de 1-MCP (0,3; 1 y 3 µL L^{-1}) y el segundo factor correspondió al tiempo de tratamiento con 1-MCP (2, 12 y 24 h), más un testigo absoluto, los 10 tratamientos tuvieron 4 repeticiones y las 40 UE estuvieron

compuestas por 125g de frutos empacados en cajas plásticas de PET. Los frutos fueron dejados a temperatura ambiente (16°C) y humedad relativa del 70% durante 15 días.

Semanalmente se hicieron mediciones de: índice de color (IC=(1000 x a*)/(L* x b*)), calculado a partir de parámetros del sistema CIELab L*, a* y b*, se realizaron tres lecturas en el diámetro ecuatorial de cada fruto con colorímetro digital Minolta CR 410 (marca Konica Minolta, Hong Kong); firmeza del fruto (N): mediante la utilización de un Texturómetro digital (marca Lloyd LS1, Bognor Regis, Sussex Occidental, Reino Unido) con celda de carga de 1 KN, punzón cilíndrico de 3mm y software Nexygen plus; pérdida de peso (%)=$((P_1-P_2)/P_1)$x100, dónde: P_1=peso de frutos a tiempo inicial y P_2=peso de frutos a tiempo final; sólidos solubles totales (SST): se hizo a través de mediciones de grados Brix con un refractómetro digital (marca Hanna, Woonsocket, U.S.A.) de rango 0 a 85% con precisión 0,1 °Brix; la acidez total titulable (ATT) se determinó con titulador automático 916 Food Ti-Touch 120 (marca Metrohm, Herisau, Suiza); la relación de madurez (RM) se calculó como la relación SST/ATT.

Producción de etileno (µL C_2H_4 kg^{-1} h^{-1}): se pesaron aproximadamente 100 g de frutos de uchuva que fueron puestos en cámaras herméticas de vidrio de 500 cm^3 durante 1 hora, al cabo de este tiempo se extrajo una muestra de 0,3 mL de gas y fue inyectada en el cromatógrafo de gases (CG) Agilent Technologies 7890A (Agilent Technologies, Santa Clara, CA), equipado con un detector de ionización de llama (FID, por su siglas en inglés). Se utilizó una columna HP-PLOT (30m x 0,55mm x 40µm). Las condiciones cromatográficas fueron las siguientes: temperatura del inyector de 70 °C, temperatura del horno de 50 °C y temperatura del detector FID de 250 °C. Se empleó helio como gas de arrastre a un flujo de 7.0 mL min^{-1} y los gases de combustión del detector FID fueron aire seco e hidrógeno con flujos de 300 y 40 mL min^{-1}, respectivamente. Para la cuantificación se realizó curva de calibración con un patrón de etileno (AGA, Bogotá). Para la concentración interna de etileno (CIE, µL L^{-1}) se tomó un mL de muestra del interior de los frutos e inmediatamente se inyectó en el cromatógrafo de gases.

Se realizó un análisis de varianza factorial (Anova) para determinar las diferencias estadísticas, luego se llevó a cabo la prueba de rango múltiple de Tukey (5%), utilizando el software SAS v. 9.2 (Cary, N.C).

3.1.5 Resultados y discusión

Producción de etileno

Se observó una disminución de los 3 a los 6 ddc, luego se presentó un aumento drástico a los 9 ddc, para luego descender hasta los 12 ddc. Se presentaron diferencias estadísticas significativas desde los 3 a los 9 ddc. En general se observó que las dosis de 1 y 3 µL L^{-1} disminuyeron representativamente la producción de etileno durante todo el almacenamiento Figura 3-1A). Respecto a la concentración interna de etileno (CIE), se presentaron diferencias estadísticas en todos los puntos de muestreo, se encontró que a mayor dosis de 1-MCP, la CIE fue menor, por tanto, con 3 µL L^{-1} la CIE presentó los valores más bajos, con 0,3 µL L^{-1} de 1-MCP se obtuvo una CIE similar a la de los frutos testigo (Figura 3-1B). Disminución en la producción de etileno con aumento en la dosis de 1-MCP también fueron encontrados en uchuva por Gutiérrez et al. (2008).

Los receptores actúan como reguladores negativos de la vía de señalización del etileno, por lo tanto una alta abundancia de receptores que no están ocupados con etileno o que se encuentran unidos con 1-MCP pueden suprimir las respuestas al etileno (Jung y Watkins, 2014). Estudios reportan que el 1-MCP disminuye la producción de etileno (Choi *et al*., 2008; Zhang *et al*., 2012), debido a que afecta su síntesis autocatalítica al disminuir la expresión de genes que codifican para las enzimas ACS y ACO (Yang *et al.*, 2013; Klee y Giovannoni, 2011; Zhang *et al.*, 2012). Similar a lo encontrado en uchuva, en frutos de ciruelo japonés (*Prunus salicina* Lindl. cv. Tegan Blue), la aplicación de 1-MCP disminuyó la producción de etileno (Khan y Zhing, 2007).

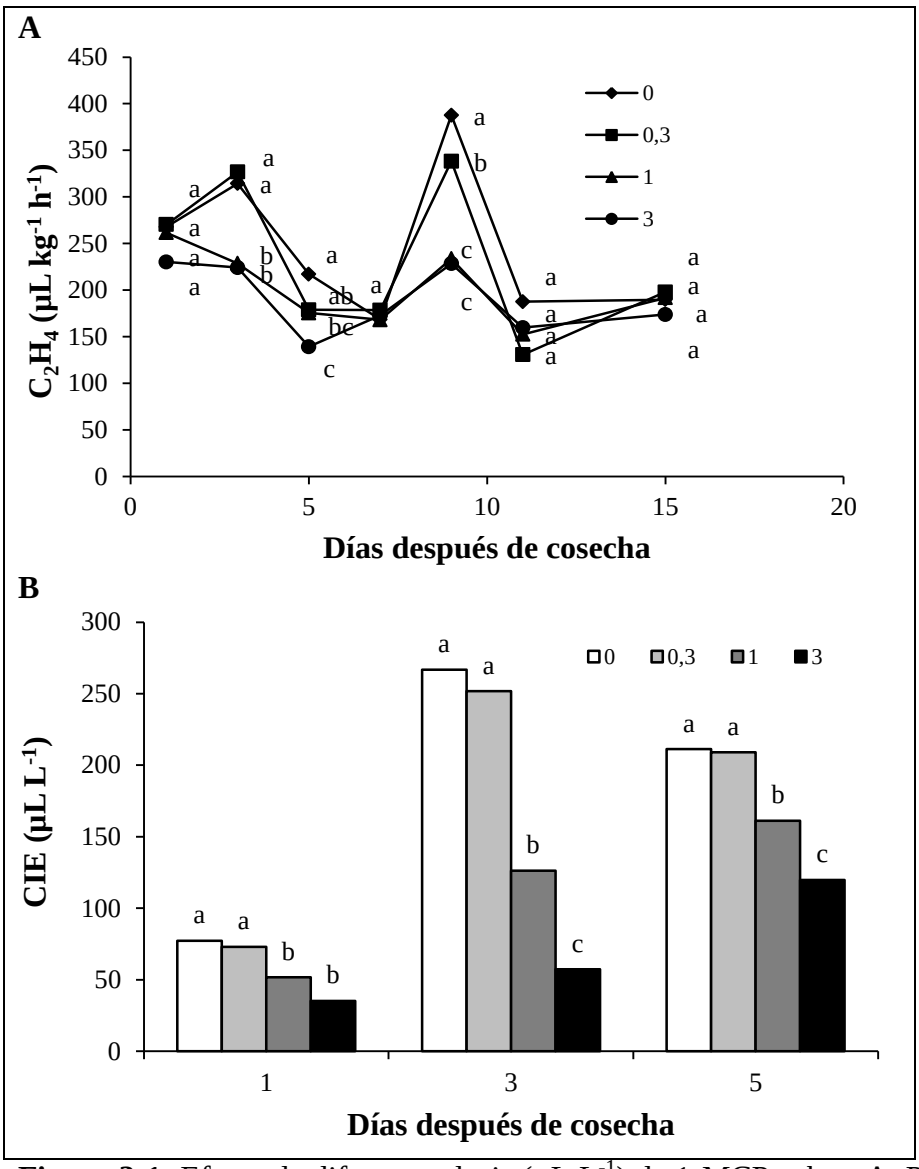


Figura 3-1: Efecto de diferentes dosis (µL L^{-1}) de 1-MCP sobre: A. Producción de etileno y B. concentración interna de etileno (CIE) de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

Las respuestas de los frutos climatéricos al 1-MCP pueden ser muy variables, por ejemplo aplicaciones antes del inicio de la maduración pueden resultar en una maduración incompleta o no adecuada, mientras que para otros frutos no hay problema. Para banano y aguacate la aplicación de 1-MCP después del inicio de la maduración no tiene ningún efecto favorable. Uno de los factores que influencia esto es la CIE de los frutos al momento de la aplicación (Huber et al., 2010). Zhang et al. (2009) proponen que un menor retraso de la maduración en tomate por 1-MCP se asoció con mayor CIE en el fruto en el

momento de tratamiento. En frutos de uchuva, aunque hay respuesta al 1-MCP, el retraso en la maduración no es tan notorio como en otros frutos, donde la producción de etileno se inhibe casi por completo (Choi et al., 2008). Esto puede ser debido al alto valor de CIE en el momento de la aplicación del 1-MCP (Figura 3-1B), ya que según Serek *et al*. (2006), el etileno endógeno compite con el 1-MCP por los receptores. Resultados similares fueron encontrados en frutos de manzana (Jung y Watkins, 2014).

De otra parte, los niveles encontrados de etileno en los frutos de uchuva son muy altos, tal como lo reportan Trinchero et al. (1999). Esta característica puede ser un indicativo de la alta perecibilidad del fruto de uchuva. Diferentes estudios indican que el etileno puede estar asociado a distintos procesos durante la maduración de los frutos de uchuva, como por ejemplo, el ablandamiento, la actividad antioxidante, el cambio de color, entre otros (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008; Majumder y Mazumdar, 2002; Trinchero et al., 1999). Por esta razón, varios procesos asociados con la maduración en los frutos de uchuva se ven afectados con la aplicación de 1-MCP.

Color de la epidermis

El IC incrementó en función del almacenamiento. Sin embargo, este incremento fue significativamente mayor en los frutos testigo y menor (4,62) con la aplicación de 3 µL L^{-1} de 1-MCP durante 24 h. Al hacer el análisis de varianza factorial también se encontró que a nivel de dosis con 3 µL L^{-1} de 1-MCP ($P \leq 0,01$), y a nivel de tiempo con 24 h ($P \leq 0,01$) se obtuvo el menor IC (Figuras 3-2A, 3-3A y 3-4A).

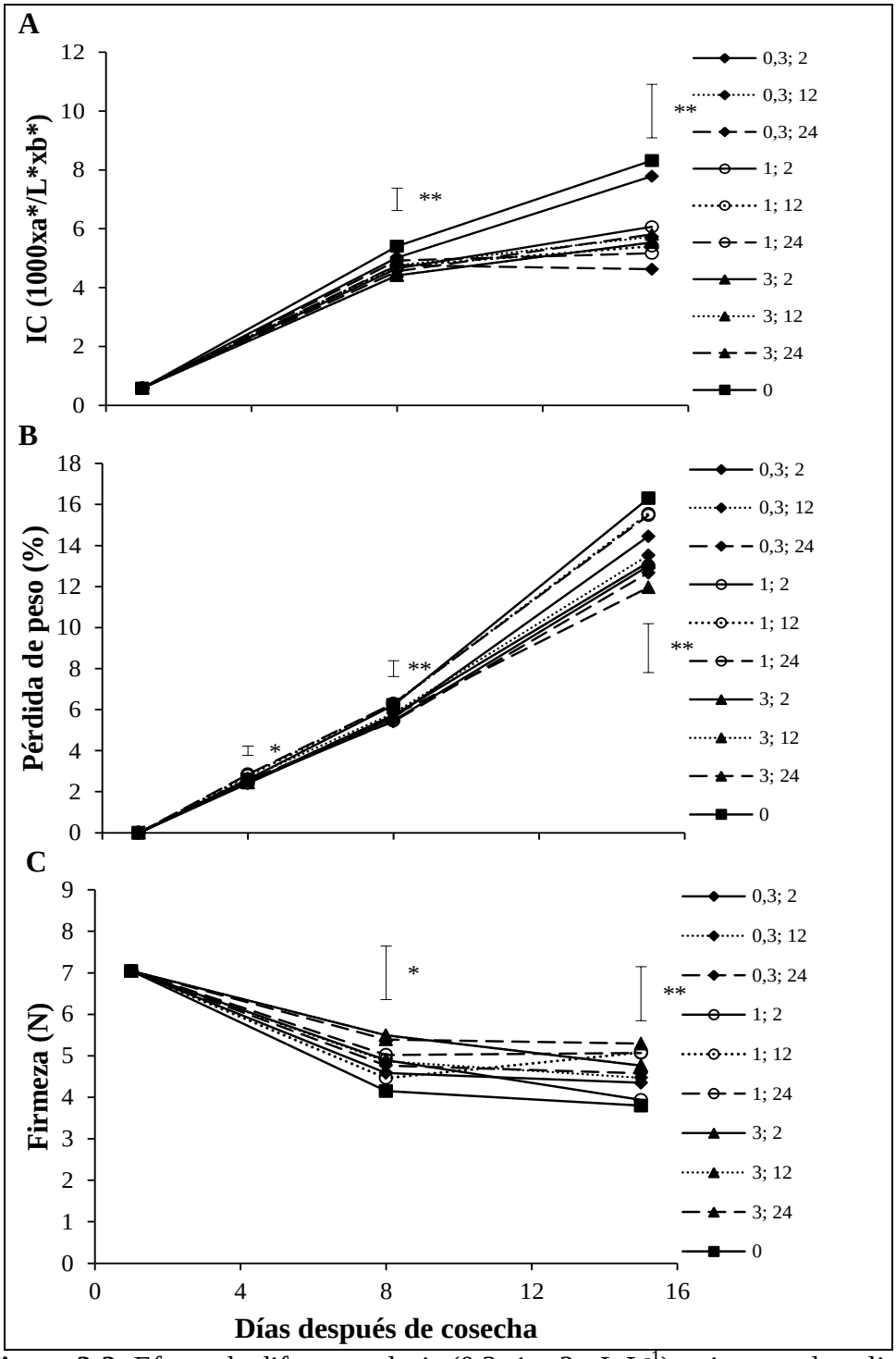


Figura 3-2: Efecto de diferentes dosis (0,3; 1 y 3 µL L^{-1}) y tiempos de aplicación (2, 12 y 24 h) de 1-metilciclopropeno sobre el cambio en: A. El índice de color, B. La pérdida de peso y C. La firmeza de frutos de uchuva durante el almacenamiento. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias.

En los frutos de uchuva, el cambio de color del fruto se debe a la degradación de clorofila y a la acumulación de carotenoides en plástidos (Trinchero *et al*., 1999). Como los valores de IC son positivos, el cambio de color se debe a la acumulación de carotenoides, principalmente β-caroteno (Fischer *et al*., 2000). Además, el cambio de color en uchuva está relacionado con la presencia de etileno (Valdenegro *et al*., 2012; Gutiérrez *et al*., 2008), por lo que frutos de uchuva con 3 µL L^{-1} de 1-MCP durante 24 h que produjeron significativamente menor cantidad de etileno presentaron también menor IC. Al respecto, frutos de tomate tratados con 1-MCP (21,7µmol m^{-3}, por 9 h) mostraron baja acumulación de licopeno y el cambio de color fue menor (Zhang et al., 2009). Gutiérrez et al. (2008) reportan que el 1-MCP (5 µL L^{-1} por 20 h) retrasó el cambio de color en frutos de uchuva, principalmente en frutos pintones, lo cual concuerda con lo encontrado en este estudio.

Pérdida de peso

Incrementó a medida que el tiempo de almacenamiento fue mayor. Se presentaron diferencias estadistas en todos los puntos de muestreo. El anava factorial indicó que hubo diferencias entre dosis y entre tiempos. El testigo presentó las mayores pérdidas de peso, mientras que a nivel de dosis con 3 µL L^{-1} de 1-MCP ($P \leq 0,05$), y a nivel de tiempo con 24 h ($P \leq 0,05$) se obtuvieron las pérdidas de peso más bajas (Figuras 3-2B). A nivel de tratamientos, la combinación de los factores mencionados generó la respuesta más favorable, mientras que los frutos sin aplicación tuvieron la mayor pérdida de peso (Figura 3-3B y 3-4B).

Teniendo en cuenta que las principales causas de pérdida de peso en los productos agrícolas cosechados son la respiración y la transpiración (Kader, 2002), la mayor exposición de los frutos de uchuva al 1-MCP (3 µL L^{-1} de 1-MCP por 24 h) estarían disminuyendo la tasa respiratoria y las pérdidas de agua por transpiración, y de esta manera se estaría alargando la vida poscosecha de los frutos, ya que según Kader (2002), la pérdida de agua es la causa principal del deterioro del fruto porque conduce a la disminución directa del peso fresco y la calidad, y se aceleran los procesos de maduración y senescencia. Chiabrando y Giacalone (2011) obtuvieron menor pérdida de peso con la

aplicación de 0,3 µLL^{-1} por 24h de 1-MCP en frutos de arándano sin generar cambios indeseables en los atributos de calidad. En col china 10 µLL^{-1} de 1-MCP con 24 h de exposición redujeron significativamente la pérdida de firmeza y de peso e incrementaron la duración poscosecha (Sun *et al*., 2012).

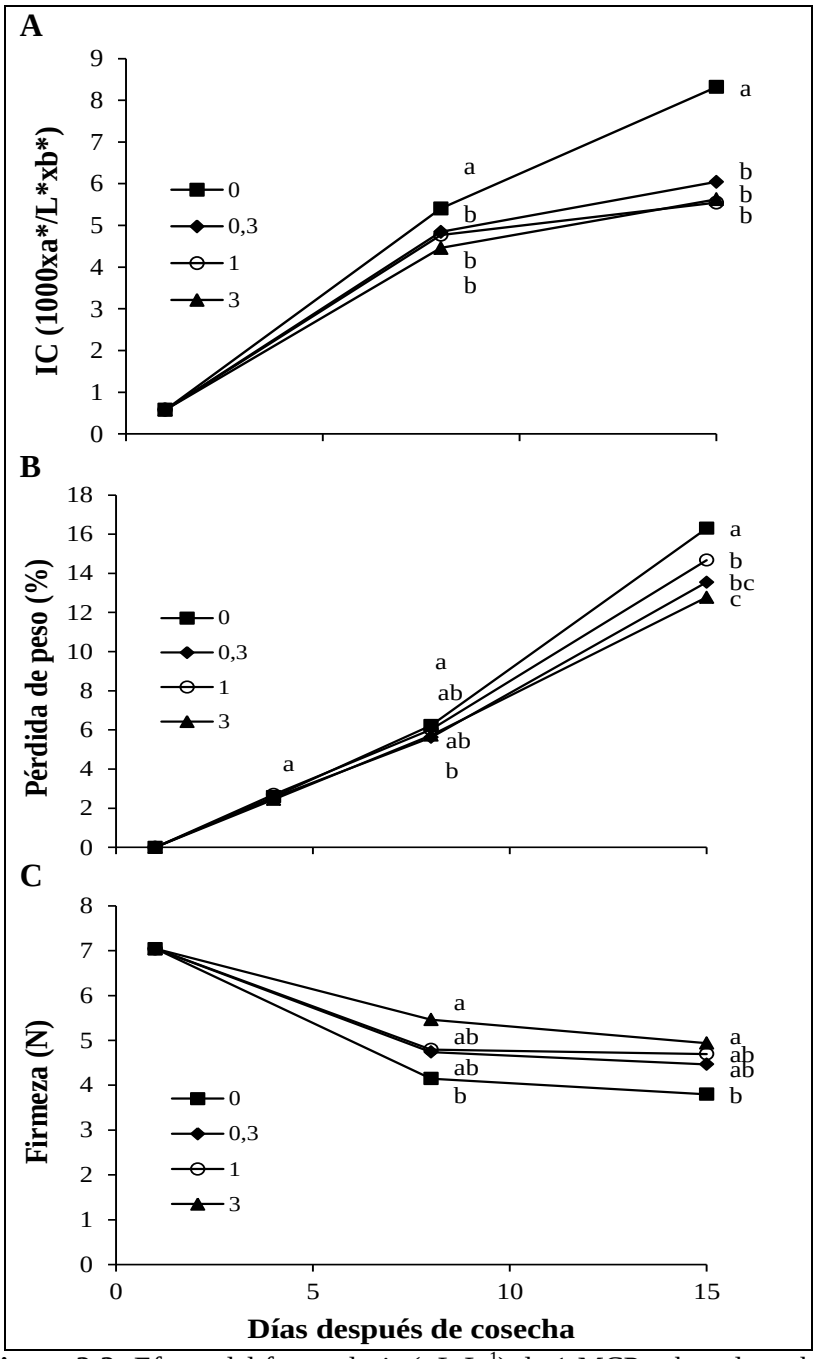


Figura 3-3: Efecto del factor dosis (µL L^{-1}) de 1-MCP sobre el cambio en: A. El índice de color, B. La pérdida de peso y C. La firmeza de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

De otra parte, la tasa de absorción de 1-MCP en frutos completos es muy lenta consumiendo aproximadamente el 20% del 1-MCP en el espacio de cabeza, después de 6h (Huber et al., 2010), por esta razón, a medida que se aumentó el tiempo de tratamiento hasta 24 h se redujo en mayor proporción la pérdida de peso en los frutos de uchuva. Los resultados encontrados confirman que la efectividad del 1-MCP depende de la interacción entre la concentración y el tiempo, entre otros factores (Blankenship y Dole, 2003; Watkins, 2006).

Firmeza

Con diferencias estadísticas en todos los puntos de muestreo, los frutos de uchuva con 3 µL L^{-1} de 1-MCP y 24 h, presentaron la menor pérdida de firmeza durante todo el almacenamiento, por el contrario, los frutos testigo fueron los más blandos (Figura 3-2C). A nivel de factores se encontraron los mismos resultados (Figuras 3-3C y 3-4C). La mayor dosis (600 nL L^{-1}) y el mayor tiempo de tratamiento (24 h) de 1-MCP también generaron el mejor comportamiento de la firmeza en frutos de guayaba (Singh y Pal, 2008).

En frutos de uchuva se reporta que la actividad de enzimas como la poligalacturonasa (PG), pectinmetilesterasa y algunas glicosidasas al parecer están relacionadas con la pérdida de firmeza del fruto (Trinchero *et al.*, 1999), además, Majumder y Mazumdar (2002) encontraron que la PG correlaciona con la presencia de etileno en el fruto, esto puede indicar la posible relación que hay entre la presencia de etileno y la pérdida de firmeza de los frutos de uchuva. En este orden de ideas, el 1-MCP al unirse a los receptores de etileno bloquea la cascada de transducción de señales que conllevan a la expresión de genes relacionados con la respuesta al etileno (In et al., 2013), en este caso las enzimas involucradas con la degradación de polisacáridos de la pared celular, siendo más notorio este proceso cuando los frutos de uchuva se someten a la mayor dosis y tiempo de exposición al tratamiento de 1-MCP.

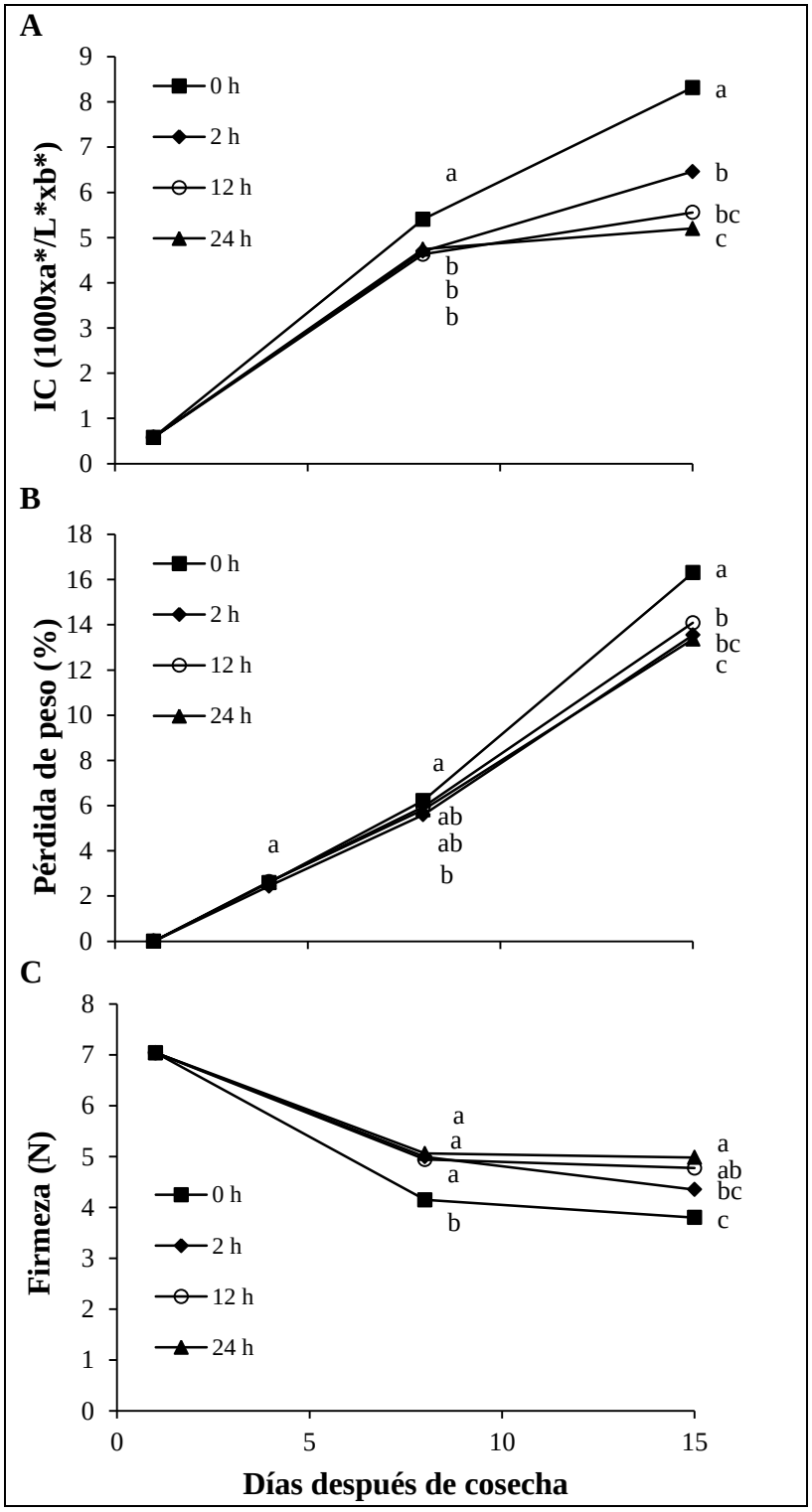


Figura 3-4: Efecto del factor tiempo de aplicación (h) de 1-MCP sobre el cambio en: A. El índice de color, B. La pérdida de peso y C. La firmeza de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

Al respecto, en frutos de guayaba, la mayor dosis de 1-MCP (900 nLL^{-1}) generó los mayores valores de firmeza al final del almacenamiento (Cerqueira *et al*., 2009), en pera con 0,3 μLL^{-1} de 1-MCP se disminuyó la pérdida de firmeza (Villalobos et al., 2011). Khan y Singh (2007) encontraron que con 1-MCP se retrasó la pérdida de firmeza y se disminuyó la actividad de las enzimas exo-PG, endo-PG, pectin esterasa y endo-β-1,4-glucanasa.

Sólidos solubles totales

Aumentaron durante el experimento, tal como lo encontraron Fischer y Martínez (1999). Tanto a nivel de factores individuales como a nivel de interacciones, se encontró que los frutos con 3 $\mu L\ L^{-1}$ de 1-MCP y 24 h presentaron la menor acumulación de SST, la respuesta contraria fue obtenida en los frutos del tratamiento testigo (Figuras 3-5A, 3-6A y 3-7A).

El aumento de los SST de los frutos de uchuva se debe posiblemente a la hidrólisis del almidón y de los polisacáridos de la pared celular que dan origen a azúcares solubles (Kays, 2004; Menéndez *et al*., 2006), con la aplicación de 1-MCP estos procesos metabólicos que aumentan los SST son más lentos, al parecer porque están regulados por etileno. Estos resultados indican que el 1-MCP en dosis de 3 $\mu L\ L^{-1}$ de 1-MCP por 24 h estarían retrasando el proceso de maduración de los frutos de uchuva al inhibir la acción del etileno.

Singh y Pal (2008) encontraron que en guayabas "Safed", el tratamiento con 1-MCP disminuyó el incremento de SST. No obstante, en uchuva, Gutiérrez et al. (2008) no encontraron efecto significativo del 1-MCP sobre los SST con dosis hasta de 5 $\mu L\ L^{-1}$, al parecer, factores como el estado de madurez y los niveles endógenos de etileno pueden afectar la respuesta de este retardante de madurez (Valdenegro et al., 2012; Zhang *et al*., 2009). Marín *et al*. (2009) también encontraron niveles más bajos de SST con la aplicación de 1-MCP en frutos de manzana.

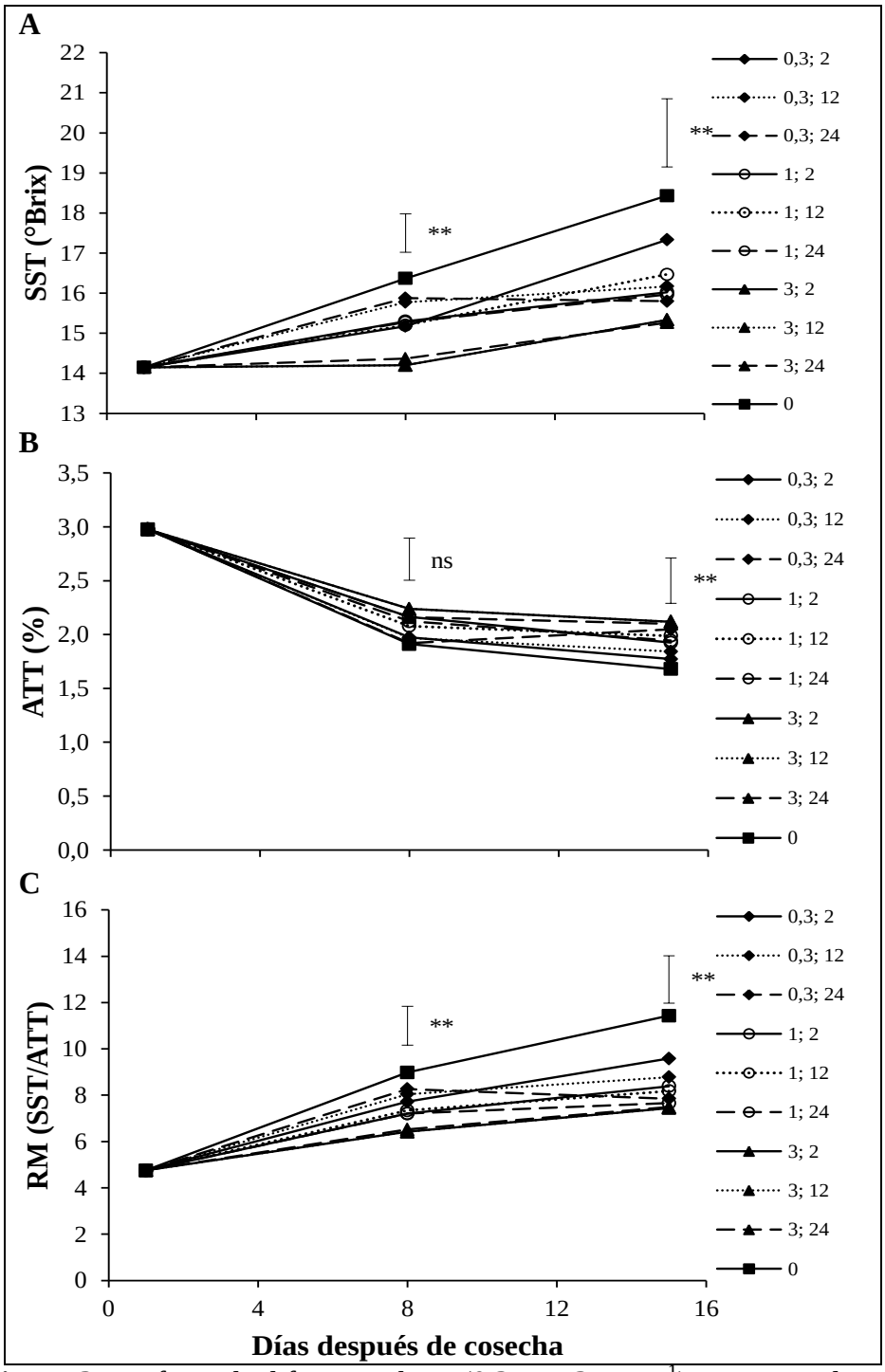


Figura 3-5: Efecto de diferentes dosis (0,3; 1 y 3 µL L^{-1}) y tiempos de aplicación (2, 12 y 24 h) de 1-metilciclopropeno sobre el cambio en: A. Sólidos solubles totales (SST), B. Acidez total titulable (ATT) y C. La relación de madurez (RM) de frutos de uchuva durante el almacenamiento. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos

promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias.

Acidez total titulable

Se observó una continua disminución de la ATT, con diferencias estadísticas en el día 15. Se encontró que la mayor diminución de la ATT estuvo en frutos de uchuva sin tratamiento, por el contrario, con la aplicación de 3 µL L^{-1} de 1-MCP y con un tiempo de 24 h se logró obtener frutos con la mayor ATT. Al realizar el análisis por factores también se encontró mejor respuesta con la dosis de 3 µL L^{-1} de 1-MCP, y el mejor tiempo fue 24 h (Figuras 3-5B, 3-6B y 3-7B).

En muchos frutos, la ATT disminuye en función del proceso de maduración, tal como se encontró para frutos de uchuva por Fischer y Martínez (1999), este comportamiento se debe a que los ácidos orgánicos son utilizados como sustratos respiratorios (Kader, 2002) o pueden ser transformados en azúcares mediante gluconeogénesis, de esta manera el 1-MCP estaría retrasando la pérdida de la ATT al disminuir la acción del etileno, pues esta hormona puede estar regulando la disminución del contenido de ácidos orgánicos durante la maduración (Kays, 2004) y según Marín *et al*. (2009) el 1-MCP puede afectar el metabolismo de carbohidratos. En frutos de tomate, Zhang *et al*. (2009) observaron que el 1-MCP retrasó la disminución de la ATT, resultados similares fueron encontrados en frutos de manzana (Marín *et al*., 2009).

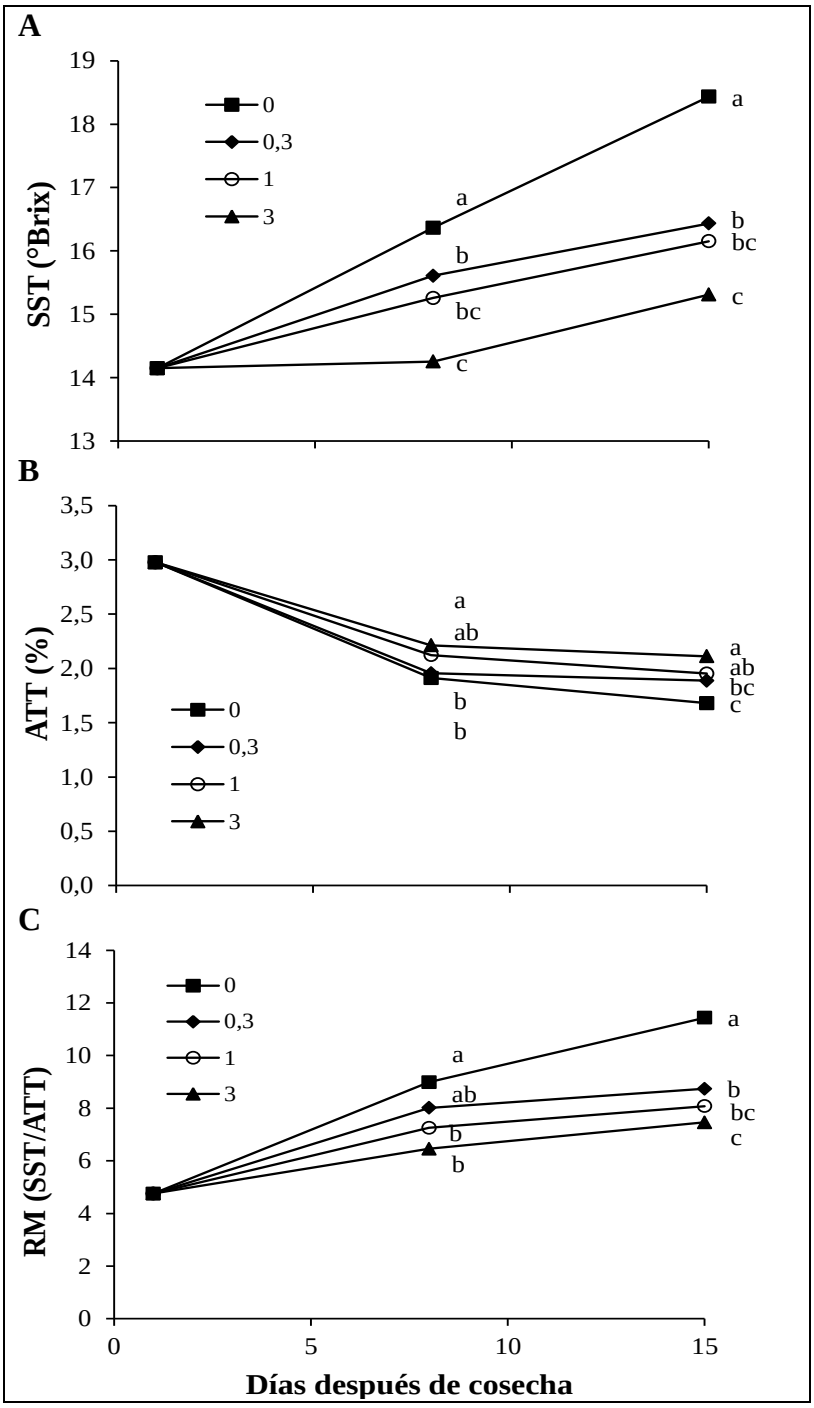


Figura 3-6: Efecto del factor dosis (µL L^{-1}) de 1-MCP sobre el cambio en: A. Sólidos solubles totales (SST), B. Acidez total titulable (ATT) y C. La relación de madurez (RM) de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

Relación de madurez

Se presentaron diferencias estadísticas significativas en todos los puntos de muestreo y se vio un aumento en función del tiempo de almacenamiento. Los frutos que presentaron mayor incremento de la RM fueron los pertenecientes al testigo, por su parte, con la aplicación de 3 µL L^{-1} de 1-MCP y con un tiempo de 24 h, los frutos presentaron el menor incremento de la RM. Estos mismos factores de manera independiente también generaron la menor RM durante todo el almacenamiento (Figuras 3-5C, 3-6C y 3-7C).

La relación de madurez es un indicativo del grado de maduración de los frutos (Osterloh *et al*., 1996). El incremento de la concentración de azúcares solubles y la disminución del contenido de ácidos orgánicos dependen de la producción de etileno (Kays, 2004), así, la relación de SST/ATT en uchuva es favorecida por la aplicación de etileno (Valdenegro et al., 2012), por tanto, el 1-MCP al inhibir la acción del etileno, se retrasa el incremento de la RM, indicando que se retrasa la maduración de los frutos de uchuva. En frutos de pitahaya, la aplicación de 600 mg L^{-1} por 24 h retrasó la RM y se incrementó la vida poscosecha (Deaquiz et al., 2014). Valdenegro et al. (2012) también encontraron menor RM en frutos de uchuva con aplicación de 1-MCP en dosis de 0,2 µL L^{-1} por 12 h.

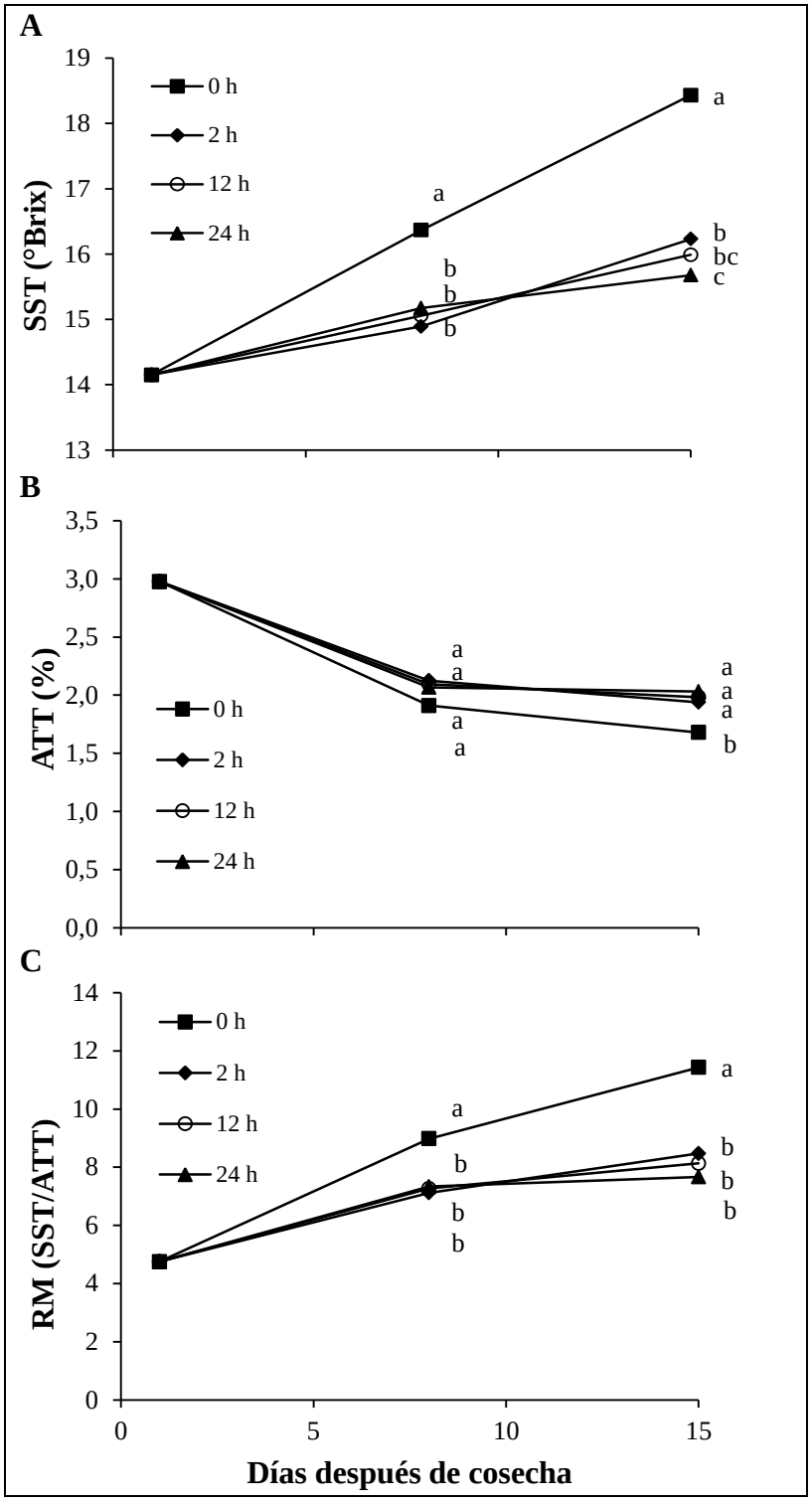


Figura 3-7: Efecto del factor tiempo de aplicación (h) de 1-MCP sobre el cambio en: A. Sólidos solubles totales (SST), B. Acidez total titulable (ATT) y C. La relación de madurez (RM) de frutos de uchuva durante el almacenamiento. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

3.1.6 Conclusiones

La aplicación de 3 µL L^{-1} de 1-MCP durante 24 h retrasa el proceso de maduración de los frutos de uchuva, lo cual se evidenció en una menor producción de etileno, menor concentración interna de etileno, menor pérdida de firmeza, de peso y de acidez. Con este tratamiento también se retrasó el índice de color, el aumento en los sólidos solubles totales y la relación de madurez. La concentración interna de etileno encontrada en los frutos de uchuva es alta, lo cual disminuye la eficiencia del 1-MCP.

3.1.7 Bibliografía

Agronet, 2014. Producción nacional por producto, Uchuva. Disponible en: http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/ReportesAjax/VerReporte.aspx. Consulta: 13 de noviembre de 2014.

Balaguera-López, H.E., L.V. Ramírez y A. Herrera. 2014. Fisiología y bioquímica del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) durante la maduración y poscosecha. pp. 113-131. En: Carvalho, C.P. y D.A. Moreno (eds.). *Physalis peruviana*: fruta andina para el mundo. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo-CYTED, Limencop SL, Alicante, España.

Bapat, V. A., P.K. Trivedi, A. Ghosh, V. A. Sane, T. R. Ganapathi y P. Nath. 2010. Ripening of fleshy fruit: Molecular insight and the role of ethylene. Biotechnol. Adv. 28, 94-107.

Blankenship, S. y J. Dole. 2003. 1-Methylcyclopropene: a review. Postharv. Biol. Technol. 28, 1-25.

Cerqueira, T., A. Jacomino, F. Sasaki y L. Amorim. 2009. Controle do amadurecimento de goiabas ‘kumagai’ tratadas com 1-metilciclopropeno. Rev. Bras. Frutic. 31(3), 687-692.

Chiabrando, V. y Giacalone, 2011. Shelf-life extension of highbush blueberry using 1-methylcyclorpopene stored under air and controlled atmosphere. Food chemistry, 126, 1812-1816.

Choi, S., P. Tsouvaltzis, C. Lim y D.J. Hubert. 2008. Suppression of ripening and induction of asynchronous ripening in tomato and avocado fruits subjected to complete or partial exposure to aqueous solutions of 1-methylcyclopropene. Postharv. Biol. Technol. 48, 206-214.

Deaquiz, Y., J. Álvarez-Herrera y G. Fischer. 2014. Ethylene and 1-MCP affect the postharvest behavior of yellow pitahaya fruits (*Selenicereus megalanthus* Haw.). Agron. Colomb. 32(1), 44-51.

Dussan, S., L. Serna y A. Perenguez. 2011. Efecto de la aplicación de 1-Metilciclopropeno sobre algunas propiedades físico-químicas y organolépticas del fruto de la granadilla. Acta Agron. 60(3), 237-244.

Fischer, G. y O. Martínez 1999. Calidad y madurez de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en relación con la coloración del fruto, Agron Colomb, 16(1-3), 35-37.

Fischer, G., A. Herrera y P.J. Almanza. 2011. Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) En: Yahia, E.M. (ed.). Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits. Acai to citrus. Cambridge: Woodhead Publishing.

Fischer, G.; Ebert, G. y Lüdders P. 2000. Provitamin A carotenoids, organic acids and ascorbic acid content of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) ecotypes grown at two tropical altitudes, Acta Hort, 531, 263-267.

Galvis, J.A., Fischer G. y Gordillo O. 2005. Cosecha y poscosecha de la uchuva. pp. 165-190. En: Fischer G., D. Miranda, W. Piedrahita y J. Romero (ed.). Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en Colombia, Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

García, H.R., A. C. Peña y C. García. 2008. Manual de práctica de cosecha y acondicionamiento de la uchuva con fines de exportación, Corpoica, Bogotá.

Gastelum, D. Demanda nutrimental y manejo agronómico de *Physalis peruvianum* L. 2012. 74 f. Tesis (Maestría en Ciencias). -Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, Texcoco, 2012.

Gutiérrez, M.S., G.D. Trinchero, A.M. Cerri, F. Vilella y G.O. Sozzi. 2008. Different responses of goldenberry fruit treated at four maturity stages with the ethylene antagonist 1-methylcyclopropene. Postharvest Biol. Technol. 48, 199–205.

Huber, D.J., Hurr B.M., Lee J.S., Lee, J.H. 2010. 1-Methylcyclopropene sorption by tissues and cell-free extracts from fruits and vegetables: evidence for enzymatic 1-MCP metabolism. Postharvest Biol Technol 56,123–130

Hubert, D. 2008. Suppression of ethylene responses through application of 1-methylcyclopropene: a powerful tool for elucidating ripening and senescence mechanisms in climacteric and nonclimateric fruits and vegetables. HortScience 43(1), 106-111.

In, B.C., J. Strablea, B.M. Binder, T.G. Falbel y S.E. Patterson. 2013. Morphological and molecular characterization of ethylene binding inhibition in carnations. Postharv. Biol. Technol. 86, 272–279.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec]. 1999. Frutas frescas. Uchuva. Especificaciones. Norma Técnica Colombiana NTC 4580. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá. 15 p.

Jiang, Y. y J. Fu. 2000. Ethylene regulation of fruit ripening: Molecular aspects. Plant. Growth. Regul. 30,193-200.

Jiang, Y., D. Joyce., W. Jiang y W. Lu. 2004. Effects of chilling temperatures on ethylene binding by banana fruit. Plant Growth Regulation. 43, 109–115.

Jung, S y C. Watkins. 2014. Internal ethylene concentrations in apple fruit at harvest affect persistence of inhibition of ethylene production after1-methylcyclopropene treatment. Postharvest Biol. Technol. 96, 1-6.

Kader, A.A., Arpaia, M.L., 2002. Postharvest handling systems: subtropical fruits. In: Kader, A.A. (Ed.), Postharvest Technology of Horticultural Crops; Third edition, publication number 3311. Regents of the University of California, Division of Agricultural and Natural Resources, Oakland, CA, pp. 375–384.

Kays, S. 2004. Postharvest biology. Exon Press (Athens, Georgia). 568 p.

Kesari, R., P. Trivedi y P. Nath. 2007. Ethylene-induced ripening in banana evokes expression of defense and stress related genes in fruit tissue. Postharv. Biol. Technol. 46, 136-143.

Khan, A y Z. Singh. 2007. 1-MCP regulates ethylene biosynthesis and fruit softening during ripening of 'Tegan Blue' plum. Postharvest Biol. Technol. 43, 298-306.

Klee, H y J. Giovannoni. 2011. Genetics and Control of Tomato Fruit Ripening and Quality Attributes. Annu. Rev. Genet. 45, 41–59.

Ma, G., R. Wang, C. Wang, M. Kato, K. Yamawaki, F. Qin y H. Xu. 2009. Effect of 1-methylcyclopropene on expression of genes for ethylene biosynthesis enzymes and ethylene receptors in post-harvest broccoli. Plant Growth. Regul. 57, 223-232.

Majumder, K.; Mazumdar. B. 2002. Changes of pectic substances in developing fruits of cape-gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in relation to the enzyme activity and evolution of ethylene. Scientia Horticulturae 96, 91–101.

Marin, A., A. Colonna, K. Kudo, e. Kupferman y J. Mattheis. 2009. Measuring consumer response to "Gala" apples treated with 1-methylcyclopropene (1-MCP). Postharvest Biol. Technol. 51, 73-79.

Menéndez, O., Lozano, S. E., Arenas, M., Bermúdez, K., Martínez A., Jiménez, A., Cambios en la actividad de α-amilasa, pectinmetilesterasa y poligalacturonasa durante la maduración del maracuyá amarillo (*Passiflora edulis* Var. Flavicarpa Degener)., Interciencia, Vol. 31, No. 10, 2006, pp. 728-733.

Nanthachai, N., B. Ratanachinakorn. M. Kosittrakun y R. Beaudry. 2007. Absorption of 1-MCP by fresh produce. Postharvest Biology and Technology. 43, 291–297.

Novoa R., M. Bojacá, A. Galvis y G. Fischer. 2006. La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12°C (*Physalis peruviana* L.). Agron. Colomb. 24 (1), 77-86.

Osterloh, A., G. Ebert, W.H. Held, H. Schulz y E. Urban. 1996. Lagerung von Obst und Südfrüchten. Verlag Ulmer, Stuttgart. 253 p.

Owino, W., R. Nakano, Y. Kubo y A. Inaba. 2002. Differential regulation of genes encoding ethylene biosynthesis enzymes and ethylene response sensor ortholog during ripening and response to wounding avocados. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 127(4), 520-527.

Serek, M., E.J. Woltering, E.C. Sisler, S. Frello y S. Sriskandarajah. 2006. Controlling ethylene responses in flowers at the receptor level. Biotechnol. Adv. 24, 368-381.

Singh, S. y R. Pal. 2008. Response of climacteric-type guava (*Psidium guajava* L.) to postharvest treatment with 1-MCP. Postharv. Biol. Technol. 47(3), 307-314.

Sun, B. H. Yan, N. Liu, J. Wei y Q. Wang. 2011. Effect of 1-MCP treatment on postharvest quality characters, antioxidants and glucosinolates of chinese kale. Food Chemistry. 131 (2), 519-526.

Superfruit. 2011. Uchuva - the superfruit. En: http://www.uchuvasuperfruit.com; consulta: 13 de agosto de 2011.

Trinchero, G.; Sozzi, G.; Cerri, A.M.; Vilella, F.; Fraschina, A. 1999. Ripening-related changes in ethylene production, respiration rate and cell-wall enzyme activity in goldenberry (*Physalis peruviana* L.), a solanaceous species. Postharvest Biol. Technol. 16, 139–145.

Valdenegro, M., L. Fuentes, R. Herrera y M.A. Moya-León. 2012. Changes in antioxidant capacity during development and ripening of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit and in response to 1-methylcyclopropene treatment. Postharv. Biol. Technol. 67,110-117.

Villalobos, M., W. Biasi, E. Mitcham y D. Holcroft. 2011. Fruit temperature and ethylene modulate 1-MCP response in Bartlee pears. Postharv. Biol. Technol. 60, 17-23.

Watkins, C. 2006. The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables, Biotechnol. Adv. 24, 389-409.

Yang, X., J. Song, L. Campbell-Palmer, S. Fillmore y Z. Zhang. 2013. Effect of ethylene and 1-MCP on expression of genes involved in ethylene biosynthesis and perception during ripening of apple fruit. Postharv. Biol. Technol. 78, 55-66.

Youn-Moon, P. 2012. 1-MCP Application for Horticultural Commodities in Korea: Practical Potential and Future Task. Hort. Environ. Biotechnol. 53(6), 441-446.

Zhang, L., L. Jiang, Y. Shi, H. Luo, R. Kang y Z. Yu. 2012. Post-harvest 1-methylcyclopropene and ethephon treatments differently modify protein profiles of peach fruit during ripening. Food. Res. Int. 48, 609-619.

Zhang, Z., D.J. Huber, B.M. Hurr y J. Rao. 2009. Delay of tomato fruit ripening in response to 1-methylcyclopropene is influenced by internal ethylene levels. Postharvest Biol. Technol. 54, 1-8.

4. Efecto de la refrigeración en el comportamiento poscosecha del fruto de uchuva

4.1 La refrigeración afecta el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) tratados con 1-metilciclopropeno

Cooling affects postharvest behavior of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits treated with 1-methylcyclopropene

Helber Enrique Balaguera-López[1,3], Lorenzo Zacarías[2] y Aníbal Herrera Arévalo[1]

[1] Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. [2] Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (IATA), Valencia España [3]Autor para correspondencia E-mail: hebalagueral@unal.edu.co.

4.1.1 Resumen

Los frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L., familia solanaceae) son altamente perecederos con limitada vida útil. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la refrigeración sobre el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva tratados con 1-metilciclopropeno. Se utilizó un diseño completamente al azar con 6 tratamientos, correspondientes a 3 temperaturas de almacenamiento (2°C, 6°C y ambiente (16°C)), y la aplicación o no de 1-metilciclopropeno (1-MCP; 3 µL L^{-1}). Se hicieron dos experimentos independientes, uno para frutos con cáliz y otro para frutos sin cáliz. Los frutos fueron almacenados por 35d, con dos periodos de shelf-life (a 16°C, HR 60-70%), a los 20 y 35 d. Se encontró que los frutos sin refrigeración tuvieron una duración de 21 d. Durante los 35d de almacenamiento refrigerado, los frutos a 2°C con 1-MCP presentaron significativamente menor tasa respiratoria, índice de color y sólidos solubles totales,

mayor firmeza y acidez total titulable. El almacenamiento a 6°C también generó un efecto favorable en la conservación de los frutos de uchuva. En los dos periodos de shelf-life se generó un cambio drástico en los parámetros evaluados. No se observaron síntomas típicos de daños por frío pero si hubo un incremento representativo de la incidencia de patógenos y la tasa respiratoria, especialmente con el almacenamiento a 2°C. Los frutos con cáliz presentaron un mejor comportamiento en este periodo. Para los frutos sin cáliz es más conveniente almacenar a 6°C con 1-MCP previo al shelf-life, mientras que los frutos con cáliz pueden refrigerarse a 2°C con aplicación de 1-MCP, pero la duración del shelf-life para todos los frutos debe ser menor a 6d.

Palabras clave: vida en anaquel, daños por frío, cáliz.

4.1.2 Abstract

The fruits of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L., Solanaceae family) are highly perishable with a limited shelf life. The objective of this research was to evaluate the effect of cooling on postharvest behavior of fruits of cape gooseberry treated with 1-methylcyclopropene. A completely randomized design was used with 6 treatments, corresponding to 3 storage temperatures (2°C, 6°C and ambient (16°C)) and the application or not of 1-methylcyclopropene (1-MCP, 3 µL L^{-1}). Two separate experiments, one for fruits with calyx and one for fruit without calyx were made. The fruits were stored for 35d, with two periods of shelf-life (at 16 °C, 60-70% RH) at 20 and 35 d. It was found that the fruit without refrigeration lasted 21 d. During the 35 d of refrigerated storage, the fruit at 2 °C with 1-MCP had significantly lower respiratory rate, color index and total soluble solids, higher firmness and titratable acidity. The storage at 6 °C also produced a favorable effect on the conservation of cape gooseberry fruits. The two periods of shelf-life caused a drastic change in the parameters evaluated. Typical symptoms of chilling injury were not observed but there was a representative increase in the incidence of pathogens and respiratory rate, especially with the storage at 2 °C. The fruits with calyx performed better in this period. For fruit without calyx is more convenient to store at 6 °C with 1-MCP prior to shelf-life, while the fruits with calyx can store at 2 °C with application of 1-MCP, but the duration of the shelf-life for all fruit should be less than 6 d.

Key words: shelf-life, chilling injury, calyx.

4.1.3 Introducción

Novoa et al. (2006) mencionan que Colombia es el mayor productor de uchuva del mundo. El ecotipo colombiano ha sobresalido en el mercado mundial por su dulce sabor, aroma y color brillante característico (Galvis et al., 2005). Para el año 2013, Colombia presentó una producción de 12.873 t, en una área de 880 ha, para un rendimiento de 14,6 t ha^{-1}, siendo el mayor productor el departamento de Boyacá, seguido en su orden de Antioquia, Cundinamarca y Nariño (Agronet, 2014). Los frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) son considerados como "Superfrutos" por sus propiedades funcionales y medicinales (Superfruit, 2011; Fischer et al., 2011). Son frutos muy apetecidos por sus características organolépticas, que son comercializados en mercados nacionales y también exportados a países como Estados unidos, Canadá, Holanda, Alemania, Bélgica, Luxemburgo y Francia (Fischer et al., 2011; García *et al*., 2008).

Sin embargo, la uchuva es un fruto altamente perecedero con limitada vida útil, que presenta un comportamiento climatérico (Gutiérrez et al., 2008; Novoa et al., 2006), con aumento en la síntesis de etileno (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008; Majumder y Mazumdar, 2002). Por tanto, se hace necesario la evaluación de diferentes tecnologías como la refrigeración y el 1-metilciclopropeno (1-MCP) para conservar la calidad del fruto por más tiempo. Al respecto, las pérdidas en calidad y cantidad entre el momento de cosecha y consumo afectan la rentabilidad de las producciones hortofrutícolas. Se estima que la magnitud de las perdidas poscosecha en países del trópico pueden superar el 50% de la producción (Paliyath et al., 2008).

El etileno tiene una importante función en los procesos de maduración y senescencia de los productos agrícolas, generando efectos deseables (maduración más rápida y uniforme) o indeseables en los mismos (aceleración de la maduración y la senescencia, se reduce la vida útil), según sea el caso. Diferentes estudios indican que el etileno puede estar

acelerando distintos procesos durante la maduración de los frutos de uchuva, como por ejemplo, el ablandamiento, la actividad antioxidante, el cambio de color, entre otros (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008; Majumder y Mazumdar, 2002; Trinchero et al., 1999). Serek et al. (2006) y Watkins (2006) mencionan que el 1-MCP es altamente eficaz para proteger a muchas especies agrícolas de la acción del etileno. El 1-MCP ocupa los receptores de etileno en la membrana, por tanto, evita la unión del etileno con su receptor y su acción (Serek et al., 2006). En frutos de uchuva se ha encontrado que la aplicación de 1-MCP disminuye la producción de etileno y la tasa respiratoria (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008).

Asimismo, el almacenamiento a bajas temperaturas es la posibilidad más importante de desacelerar el proceso de deterioro de los frutos (Téllez et al., 2007). La conservación refrigerada bajo condiciones óptimas permite reducir las pérdidas cualitativas y cuantitativas debidas a desórdenes fisiológicos y enfermedades, retrasar la maduración y senescencia y prolongar la vida comercial de los productos hortofrutícolas en general, con calidad idónea para consumo en fresco o industrial (Paull, 1999 y Martínez-Jávega, 1997). El correcto uso de la refrigeración, es una de las formas más eficaces en el mantenimiento de la calidad de las frutas (Kader, 2008), sin embargo muchos frutos de origen tropical y subtropical presentan sensibilidad a las bajas temperaturas que se manifiesta por diferentes alteraciones y manchas en la piel, conocidas generalmente como lesión o daño por frío y que pueden causar una alta pérdida de calidad comercial (Martínez- Jávega, 1997).

En uchuva se han realizado estudios de almacenamiento a temperaturas de 12°C (Novoa et al., 2006), 7°C (Lanchero et al., 2007) y 1,5°C (Alvarado et al., 2004), los autores resaltan la importancia de la refrigeración para la conservación poscosecha de esta especie, pero no se reporta la presencia de daños por frio ni tampoco la evaluación de periodos de vida en anaquel o “shelf-life” después de la refrigeración, debido a que los frutos en la mayoría de los casos después de refrigerados deben ser sacados a temperatura ambiente para ser comercializados. Por tanto, la calidad de la fruta puede disminuir gradualmente durante el almacenamiento a baja temperatura y luego se puede disminuir rápidamente cuando las

frutas se retiran posteriormente a las condiciones de vida de anaquel a temperatura ambiente (Jiang et al., 2003).

De otra parte, en Colombia y en Estados Unidos, los consumidores prefieren los frutos sin cáliz, mientras que las exportaciones a Europa y Canadá se realizan con el cáliz. Debido al hecho de que las condiciones y requisitos para la exportación a Europa y los Estados Unidos son diferentes, las condiciones especiales en la cosecha, manejo poscosecha y comercialización son necesarios para cada uno de estos dos mercados importantes del mundo (García *et al*., 2008). Según Fischer et al. (1997), el cáliz protege al fruto durante el cultivo de la radiación y de problemas fitosanitarios, además de la protección mecánica. Después de la cosecha el cáliz provee a los frutos protección contra daños mecánicos y patógenos, reduce la producción de etileno y pérdida de peso, ofreciendo una prolongación en vida poscosecha, importante con relación a frutos sin cáliz (Fischer et al., 1997; Balaguera-López et al., 2014).

De acuerdo con lo expuesto, esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la refrigeración sobre el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) tratados con 1-metilciclopropeno.

4.1.4 Material y métodos

Se recolectaron frutos de uchuva ecotipo Colombia en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá, ubicado a 2630 msnm con temperatura ambiental de 12°C. Los frutos fueron cosechados en estado pintón con un IC=1,37, SST=13,37°Brix y ATT=2,78%, con tamaño homogéneo y en buenas condiciones fitosanitarias y de calidad.

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 6 tratamientos, correspondientes a 3 temperaturas de almacenamiento (2°C, 6°C y ambiente (16°C)), y la aplicación o no de 1-metilciclopropeno (1-MCP; 3 µL L^{-1}). Cada tratamiento tuvo cuatro réplicas. Se hicieron dos experimentos independientes, uno para frutos con cáliz y otro

para frutos sin cáliz. Cada una de las 24 unidades experimentales estuvo compuesta por 125g de frutos.

El 1-MCP (Rohm and Haas), se pesó en un vaso de precipitado, que se ubicó dentro de una cámara hermética de 20L junto con los frutos, por medio de una septa se inyectó agua caliente (45-50°C). La disolución del 1-MCP en el agua caliente generó la liberación al espacio de cabeza del 1-MCP gaseoso. Los frutos fueron expuestos al tratamiento por 12 h a temperatura ambiente. Después de los tratamientos, todos los frutos fueron empacados en termoformados de polietilentereftalato (PET) y almacenados a las temperaturas seleccionadas. La humedad relativa fue del 90%. Con el fin de conocer el comportamiento de los frutos de uchuva durante el periodo de vida en estante o shelf-life, se sacaron frutos a los 20 y 35 días de almacenamiento y se dejaron una semana a temperatura ambiente (16°C, HR 60-70%).

Periódicamente se hicieron mediciones poscosecha así: se calculó la tasa respiratoria: aproximadamente 100 g de frutos fueron puestos a temperatura ambiente en una cámara hermética de 2 L, en la cámara fue ubicado un sensor infrarrojo de CO_2, el cual se conectó a un equipo de captura de datos marca Labquest. Cada 4 segundos y durante 5 minutos se registraron los valores de CO_2, con estos valores se calculó la pendiente, que correspondió a la tasa respiratoria, se tuvo en cuenta el peso de los frutos y el volumen de la cámara para convertir los datos a mg de CO_2 kg^{-1} h^{-1}. El color se midió a partir de parámetros del sistema CIELab L*, a* y b*, con colorímetro digital marca Minolta, con estos datos se calculó el índice de color mediante la siguiente ecuación: IC= (1000 x a*)/(L* x b*)); firmeza del fruto (N): mediante la utilización de un Texturómetro digital marca Lloyd LS1 con celda de carga de 1 KN, punzón cilíndrico de 3mm y software Nexygen plus; Pérdida de peso (%): a una muestra de aproximadamente 100g de frutos se le realizó medición de la masa fresca en balanza de precisión con aproximación de 0,001 g; Sólidos solubles totales (SST): se hizo a través de mediciones de grados Brix con un refractómetro digital marca Hanna de rango 0 a 85% con precisión 0,1 °Brix. La acidez total titulable (ATT) se determinó con titulador automático 916 Food Ti-Touch 120 (marca Metrohm, Herisau, Suiza); la relación de madurez (RM) se calculó como la relación SST/ATT.

Para la extracción y cuantificación de carotenoides: se pesó aproximadamente 1g de pulpa, se agregaron 5 mL de acetona, se agitó en vórtex durante 1 min y luego se centrifugó durante 10 min a 4000 rpm. Después se vertió el sobrenadante en un balón de 25 mL, al pelet nuevamente se le agregó acetona, se agitó en vórtex y luego se llevó a centrifuga, este procedimiento se repitió 3 veces. El sobrenadante obtenido se llevó a volumen de 25mL con acetona, se determinó la absorbancia en espectrofotómetro a 450 nm. La cuantificación se realizó mediante curva de calibración con diferentes concentraciones de β-caroteno. El total de carotenoides se expresó como µg de β-caroteno/g PF (peso fresco). Se calculó el porcentaje de incidencia de enfermedades, para lo cual se tuvo en cuenta el número total de frutos y el número de frutos que presentaron crecimiento de hongos y/o bacterias por infección natural. Se determinó la permeabilidad de la membrana se pesó 0,3g de epidermis, el material se lavó y se puso en tubos falcon con 10 mL de agua desionizada. Los tubos se incubaron a 30°C en baño de María durante 2 horas, al cabo de este tiempo se realizó la medición de la conductividad eléctrica inicial (CE_1), posteriormente, las muestras se incubaron a 100°C durante 15 minutos y se midió nuevamente la conductividad eléctrica (CE_2), don estos datos se calculó la liberación de electrolitos, L.E (%)= (CE_1/ CE_2) x 100.

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y a la prueba de comparación múltiple de promedios de Tukey ($P \leq 0,05$).

4.1.5 Resultados y Discusión

Fase de almacenamiento

Tasa respiratoria: tanto para frutos con cáliz como sin cáliz, a medida que se disminuyó la temperatura de refrigeración se redujo la tasa respiratoria, incluso a 2°C la tasa respiratoria fue cercana a cero hasta los 26 ddc para frutos con cáliz y hasta los 23 ddc en frutos sin cáliz, después de este punto, la tasa respiratoria aumento hasta los 35 ddc. Además, se encontró que los frutos dejados a temperatura ambiente tuvieron menor duración poscosecha con 21 días (Figura 4-1). En concordancia, el almacenamiento

refrigerado de frutos de uchuva a 7°C permite alcanzar tiempos de vida útil mayores a 40 días (García et al., 2014). Al respecto, Alvarado et al. (2004) sometieron frutos de uchuva a 1,5°C durante 16 días, los resultados mostraron que los frutos prolongaron su vida útil en poscosecha, debido a que durante el tratamiento de frío, los frutos poseen una actividad metabólica muy baja, lo cual retarda notablemente los procesos normales que implican un avance en madurez. La refrigeración es la técnica más empleada a nivel mundial, se utiliza con el fin de disminuir o frenar la tasa respiratoria, conservándose así la calidad del fruto y retardando su senescencia; ya que con esta disminución de la respiración, se reduce la actividad tanto metabólica y enzimática del fruto (Pereira et al., 2013). Estudios realizados por Parra-Coronado et al. (2008) sobre frutos de ciruela, permitieron determinar que la respiración se relaciona con la temperatura, teniéndose que las bajas temperaturas inhiben la respiración, lo cual coincide con lo que se encontró para los frutos de uchuva.

De otra parte, Barry y Giovannoni (2007) mencionan que el etileno tiene una estrecha relación con la tasa respiratoria de los frutos. Por lo que aplicaciones de 1-MCP resultan efectivas para disminuir la tasa respiratoria de diferentes frutos, tal como se reporta para tomate (Choi et al., 2008) y guayaba (Cerqueira et al., 2009), entre otros. Los resultados encontrados coinciden con lo reportado para frutos de uchuva en estudios anteriores, donde la aplicación de 1-MCP disminuye notablemente la tasa respiratoria (Valdenegro et al., 2012; Gutiérrez et al., 2008). Teniendo en cuenta que la tasa respiratoria tiene una relación directa con la perecibilidad de los frutos, ala refrigeración junto con la aplicación de 1-MCP puede convertirse en una alternativa viable para mejorar la conservación de los frutos de uchuva, tanto en frutos con cáliz como en frutos sin cáliz.

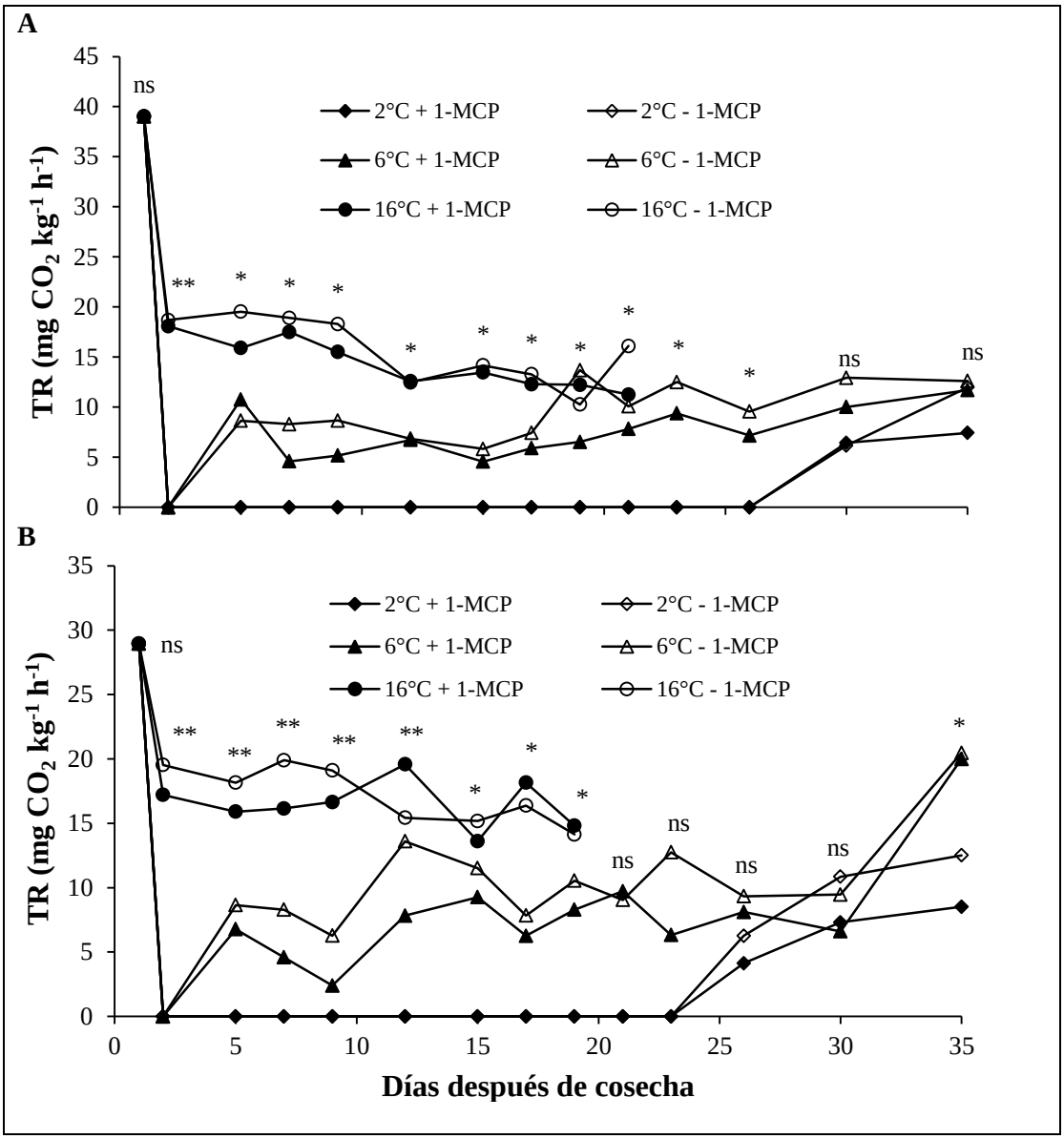


Figura 4-1: Tasa respiratoria de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. ** Diferencias estadísticas al 1%, *Diferencias estadísticas al 5%, ns: no hay diferencias estadísticas de acuerdo con el análisis de varianza.

Color epidermis: en frutos con cáliz, el cáliz presentó valores de IC de -7,45 al inicio del almacenamiento, este valor se fue haciendo menos negativo para todos los tratamientos, siendo mayor el valor de IC a los 21 ddc en los frutos almacenados a 16°C sin 1-MCP. A los 35 ddc los frutos a 6°C sin 1-MCP presentaron el mayor valor de IC del cáliz (1,69), mientras que durante todo el almacenamiento, el menor IC del cáliz se obtuvo en frutos refrigerados a 2°C+1-MCP con un valor de -0,78 (Figura 4-2A). Este mismo tratamiento

también generó el menor IC en la epidermis de frutos con y sin cáliz, donde el IC siempre fue positivo y continuamente aumentó hasta el final del almacenamiento (Figura 4-2B y C). Resultados favorables de la refrigeración y aplicación de 1-MCP sobre la disminución del cambio de color también fue observado en frutos de pera "japonesa" (*Pyrus pyrifolia* Nakai) (Itai et al., 2011).

Los resultados muestran que durante el almacenamiento, el cáliz disminuyó la coloración verde y adquirió una tonalidad café, al parecer por la degradación de clorofilas (Taiz y Zeiger, 2006). Al respecto, Ligarreto et al. (2005) mencionan que el cáliz al madurar adquiere una textura parecida a la del pergamino y su color se vuelve "pajizo". Fischer et al. (2011) afirman que el cambio de color del cáliz y el fruto presentan sincronía, situación que concuerda con lo encontrado en este estudio, pues la tendencia general de cambio de color en cáliz y en epidermis fue similar (Figura 4-2).

Los cambios de color del fruto de uchuva se deben a la degradación de la clorofila y a la acumulación de carotenoides en plástidos (Trinchero *et al*., 1999), principalmente β-caroteno (Fischer *et al*., 2000). Además, el cambio de color en uchuva está relacionado con la presencia de etileno (Valdenegro *et al*., 2012; Gutiérrez *et al*., 2008). Es posible que el menor IC en refrigerados a 2°C+1-MCP se deba a una menor acumulación de carotenoides, como resultado de un proceso de maduración más lento. Gutiérrez et al. (2008) reportan que el 1-MCP retrasa el cambio de color en los frutos de uchuva, principalmente en frutos pintones, lo cual coincide con lo encontrado en este estudio. Varios estudios muestran que aplicaciones de 1-MCP disminuyen la actividad de la enzima clorofilasa y la pérdida de clorofila (Watkins, 2006; Sun et al., 2012). Frutos de tomate tratados con 1-MCP mostraron baja acumulación de licopeno y el cambio de color fue más lento (Zhang et al., 2009). Adicionalmente, es posible que en uchuva la refrigeración también disminuya la actividad enzimática relacionada con los cambios de color, en frutos de tomate se encontró que el almacenamiento refrigerado retrasó el cambio de color expresado como ángulo Hue, lo cual se debió a la menor acumulación de carotenoides (Rugkong et al., 2011).

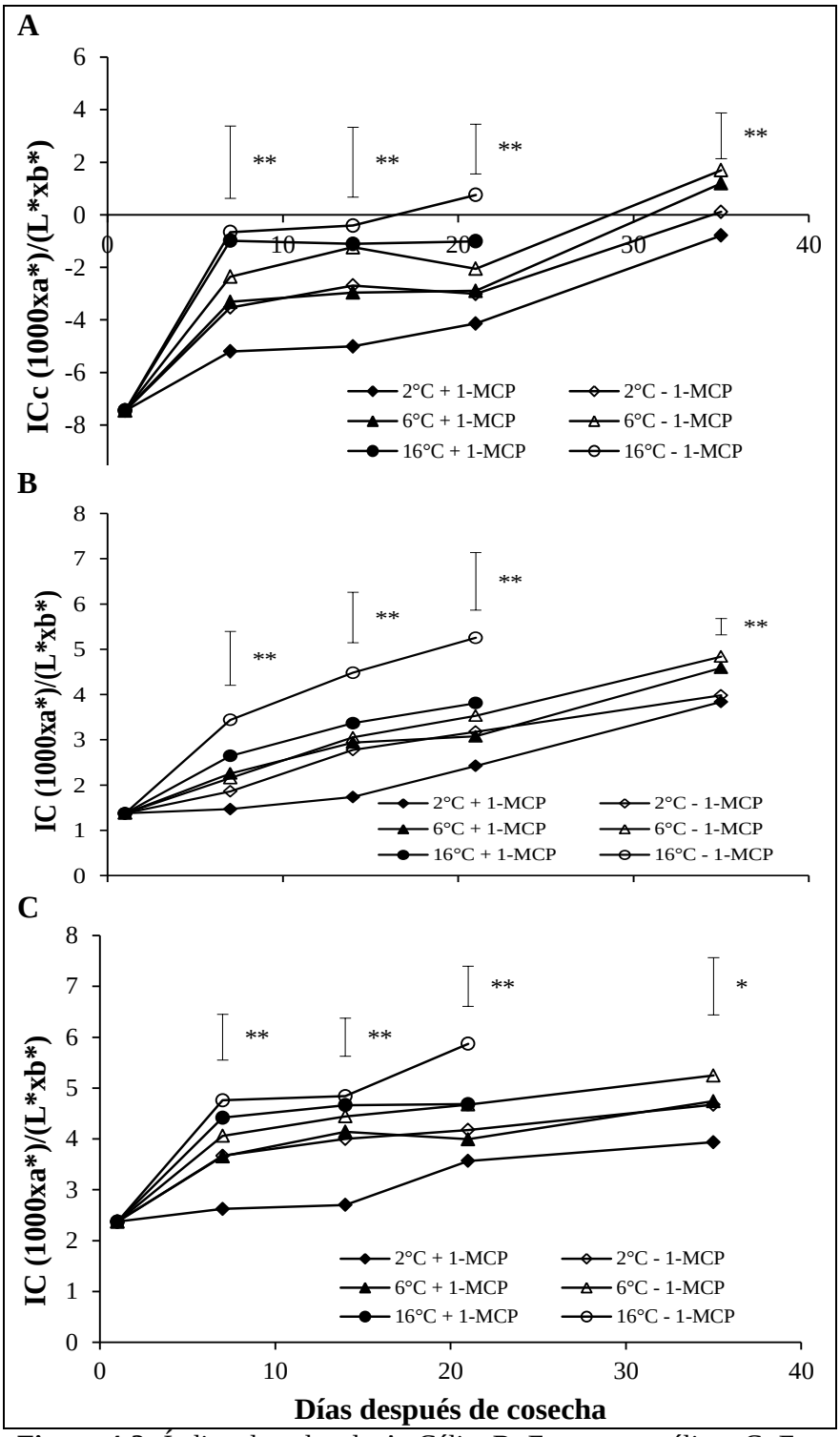


Figura 4-2: Índice de color de A. Cáliz, B. Frutos con cáliz y C. Frutos sin cáliz almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias.

Pérdida de peso

Se presentó un aumento continuo de la pérdida de peso, en los frutos con cáliz la pérdida de peso es mayor en los primeros días de almacenamiento, luego la velocidad de pérdida fue menor, principalmente bajo refrigeración. El cáliz puede ser considerado como un órgano de intercambio gaseoso, tal como lo reportan Kitagawa y Glucina (1984) para frutos de caqui (*Diospyros kaki* Thunb.), por esta razón, en los primeros días de almacenamiento, la pérdida de peso en los frutos con cáliz depende más del cáliz que del fruto, pero cuando el cáliz ya está seco, la pérdida de peso se debe casi que en su totalidad a los frutos (Balaguera-López et al., 2014). Se presentaron diferencias estadísticas en todos los muestreos, excepto a los 35 ddc. Se observó mayor pérdida de peso en los frutos almacenados a temperatura ambiente (11,65%), mientras que con la refrigeración a 6°C sin 1-MCP se obtuvo la menor pérdida de peso (Figura 4-3). en frutos sin cáliz se observaron diferencias estadísticas en todos los puntos de muestreo. A los 21 ddc, los frutos dejados a temperatura ambiente y sin 1-MCP perdieron el mayor porcentaje de peso (12,74%), que fue cerca de 5 veces mayor a la obtenida en frutos bajo refrigeración. A los 35 ddc, los frutos refrigerados a 2°C con 1-MCP presentaron la menor pérdida de peso con solo 3,52% (Figura 4-3).

La pérdida de peso de los productos agrícolas cosechados está principalmente asociada con la respiración y las pérdidas de humedad por traspiración a través de la epidermis (Kader, 2002). Esta pérdida es irreparable y los frutos tienen que recurrir al agua que poseen en el momento de la transpiración (Landwehr y Torres, 1995). La pérdida de agua trae como consecuencia una disminución de peso a lo largo del tiempo (Alvarado et al., 2004). No obstante, la temperatura de almacenamiento determina la transpiración de los tejidos (Hernández-Muñoz et al., 2008). A menor temperatura, la pérdida de agua es menor manifestándose en baja disminución del peso fresco y en las características de apariencia y calidad, tal como se encontró en este estudio. La refrigeración también disminuyó la pérdida de peso en frutos de tomate (Javanmardi y Kubota, 2006) y curuba (Téllez et al., 1999; 2007). El 1-MCP tiene la capacidad de reducir la acción del etileno (Serek et al., 2006), en consecuencia, los proceso de degradación del fruto son más lentos y las procesos de respiración y transpiración disminuyen. Por tanto, los frutos de uchuva con 1-MCP y

con refrigeración (2 o 6°C) presentan menor posibilidad de perder peso por respiración y transpiración, que a su vez es un indicativo de que pueden presentar un buen comportamiento poscosecha.

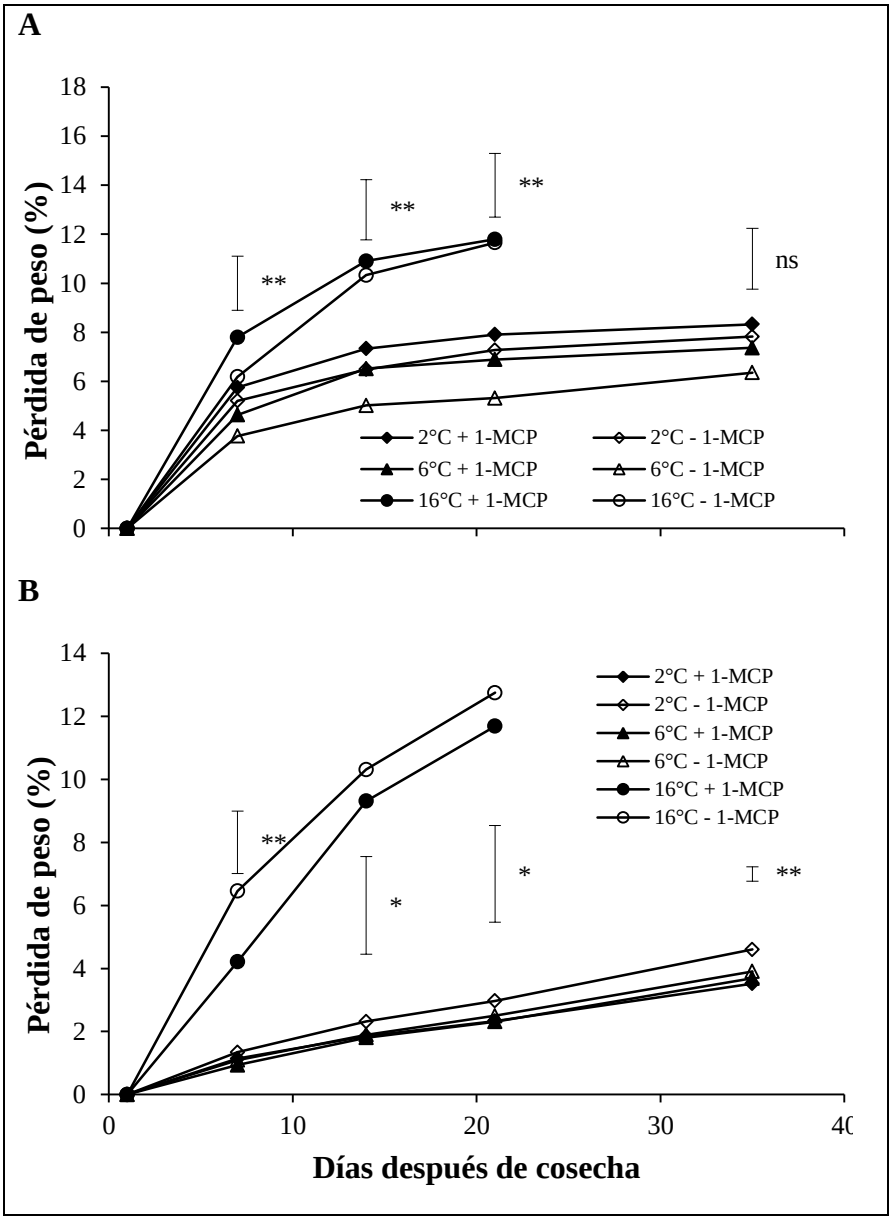


Figura 4-3: Pérdida de peso de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias.

Similar a los resultados obtenidos en este estudio, Chiabrando y Giacalone (2011) obtuvieron menor pérdida de peso con la aplicación de 1-MCP en frutos de arándano sin generar cambios indeseables en los atributos de calidad. Carrillo et al. (2011) encontraron que el 1-MCP (1 μLL^{-1}) junto con almacenamiento a 7°C redujo la pérdida de peso en frutos de arazá.

Carotenoides totales

Se presentaron diferencias estadísticas significativas, a los 20 ddc se en los frutos con cáliz, la refrigeración a 2°C con y sin aplicación de 1-MCP y la refrigeración a 6°C con 1-MCP generaron frutos de uchuva con el menor contenido de carotenoides totales, y el mayor contenido de carotenoides fue obtenido en frutos almacenados a 16°C sin 1-MCP. Por su parte, a los 35 ddc, los frutos con 1-MCP a 2 o 6°C presentaron la menor concentración de carotenoides totales (Figura 4-4A). En frutos sin cáliz también hubo diferencias estadísticas significativas. A los 20 y 35 ddc se obtuvo menor acumulación de carotenoides totales en frutos almacenados a 2°C con 1-MCP (Figura 4-4B).

Fischer et al. (2000) reportan que el β-caroteno es el principal carotenoide del fruto de uchuva, se ha encontrado que incrementa su concentración hasta que el fruto adquiere la coloración naranja y se convierte en un buen indicativo del grado de madurez (Fischer y Martínez, 1999). La refrigeración tiene gran influencia sobre la disminución en la síntesis de carotenoides (Javanmardi y Kubota, 2006), en tomate se determinó que la refrigeración disminuyó la síntesis de cartotenoides como licopeno y fitoeno como resultado de la menor expresión de los genes *PSY1* (fitoeno sintasa), *CRTISO* (carotenoide isomerasa), *GGPPS2* (geranilgeranil pirofosfato sintasa 2), *DXS* (xilulosa 5-fosfato sintasa) (Rugkong et al., 2011), varias de estas enzimas también están involucradas en la síntesis de β-caroteno, lo cual explicaría la disminución en la síntesis de este carotenoide en uchuva.

De otra parte, en frutos de naranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck) var. Navelate, el etileno aumentó el contenido total de carotenoides en la piel, porque interviene en la expresión de genes que codifican para la síntesis de estos pigmentos (Rodrigo y Zacarías, 2007), es posible que en frutos de uchuva, el proceso de carotenogénesis también esté regulado por

etileno, por esta razón, la aplicación de 1-MCP redujo la síntesis de carotenoides, resultados similares fueron observados en frutos de tomate, donde el 1-MCP retrasó significativamente la acumulación de licopeno (Choi et al., 2008). Sin embargo, los mejores resultados en la disminución de la acumulación de carotenoides se dieron cuando el 1-MCP se acompañó de refrigeración a 2°C.

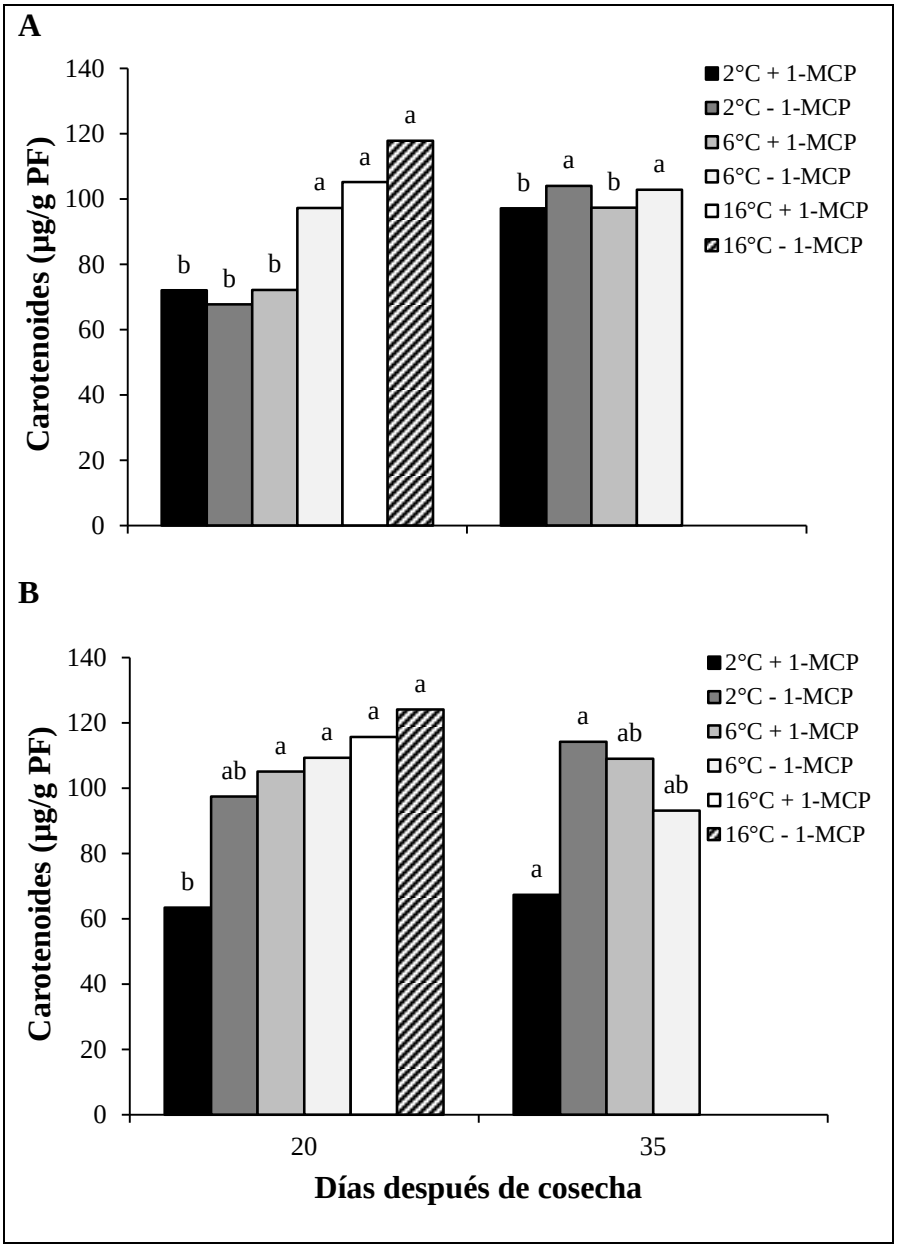


Figura 4-4: Carotenoides totales de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. Promedios seguidos de letras diferentes presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (≤0,05).

Firmeza

Se observó disminución continua de la firmeza. Se presentaron diferencias significativas en todos los puntos de muestreo. Tanto para frutos con cáliz como sin cáliz, la mayor pérdida de firmeza se obtuvo en los frutos a temperatura ambiente sin 1-MCP, por su parte, los frutos almacenados a 2°C con adición de 1-MCP presentaron la mayor firmeza durante todo el almacenamiento (Figura 4-5).

Se sabe que una de las principales causas de pérdida de firmeza en frutos es la actividad de enzimas que hidrolizan polisacáridos estructurales y de reserva (Kays, 2004), en uchuva la actividad poligalacturonasa, pectinmetilesterasa y algunas glicosidasas al parecer están relacionadas con la pérdida de firmeza del fruto (Majumder y Mazumdar, 2002). Se ha encontrado que la depolimerización de pectinas y el xiloglucano están regulados por la presencia de etileno (Nishiyama et al., 2007; Pech et al., 2008), en uchuva la PG correlaciona con la presencia de etileno en el fruto (Majumder y Mazumdar, 2002), lo cual indica la probable relación que hay entre la presencia de etileno y la pérdida de firmeza de los frutos de uchuva. En concordancia, frutos de tomate tratados con 1-MCP fueron más firmes y la actividad poligalacturonasa (PG) fue suprimida (Choi y Huber, 2008), al igual que la enzima celulasa (Feng et al., 2000). Una menor pérdida de firmeza en frutos de uchuva con la aplicación de 1-MCP también fue encontrada por Gutiérrez et al. (2008).

Osterloh et al. (1996) afirman que una elevada disminución de la firmeza del fruto, obedece a un alto metabolismo y una maduración acelerada, derivada de altas temperaturas. En consecuencia, en tomate se encontró que los genes relacionados con degradación de la pared celular PG (poligalacturonasa), PE1 (pectin metilesterasa 1), TBG4 (β-galactosidasa 4), LeExp1 (expansina1), y XTH5 (xiloglucano endotransglucosilasa/hidrolasa 5) tuvieron menor expresión relativa a bajas temperaturas (Rugkong et al., 2011). Lo anterior muestra la importancia que tiene la refrigeración para mantener la firmeza de los frutos de uchuva. Itai et al. (2011) también reportaron que la

refrigeración y aplicación de 1-MCP retrasaron la pérdida de firmeza en frutos de pera "japonesa".

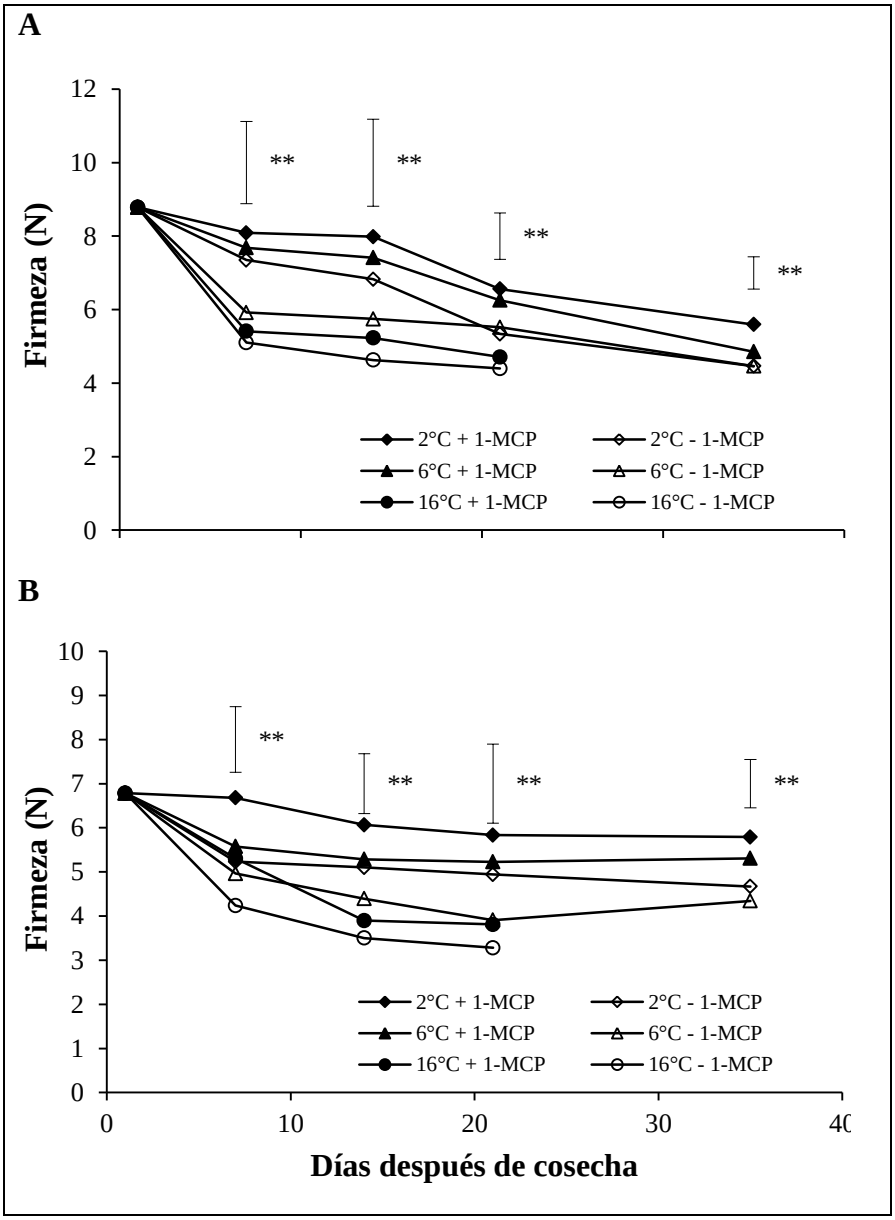


Figura 4-5: Frmeza de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias.

Sólidos solubles totales

Los SST aumentaron en función del tiempo de almacenamiento. En frutos con cáliz se presentaron diferencias estadísticas a los 14 y 35 ddc, mientras que en frutos sin cáliz hubo diferencias en todos los puntos de muestreo. Con cáliz y sin cáliz, los frutos hasta el día 21 ddc presentaron el mayor contenido de SST y a los 35 ddc fueron los frutos refrigerados a 6°C sin 1-MCP, por el contrario, durante todo el almacenamiento, los SST más bajos se obtuvieron en frutos con 1-MCP y almacenados a 6°C (Figura 4-6).

A medida que los frutos maduran, parte de los polisacáridos de reserva se transforman en azúcares simples como glucosa, fructosa y sacarosa, debido probablemente a un aumento en la actividad de las enzimas hidrolasas del almidón (Kays, 2004; Paliyath et al., 2008), generando aumento en los contenidos de SST. Con la refrigeración y el 1-MCP el aumento de los SST es menor porque se retrasó el proceso de maduración. En frutos de pera también se encontró un menor aumento del contenido total de azúcares con la refrigeración y el 1-MCP. El efecto favorable de las bajas temperaturas sobre los SST ha sido también reportado por Getinet et al. (2008) en tomate y por Téllez et al. (2007) en frutos de curuba. Asimismo, Marin *et al*. (2009) mencionan que el 1-MCP puede afectar el metabolismo de carbohidratos, tal como se evidencia en este estudio. Por su parte Singh y Pal (2008) encontraron que en guayabas "Safed", el tratamiento con 1-MCP disminuyó el incremento de SST. No obstante, se esperaba mayor respuesta con la aplicación de 1-MCP y la refrigeración, lo cual se debió posiblemente a que las bajas temperaturas pueden disminuir la afinidad o interacción del 1-MCP con los receptores de etileno, o tal vez se disminuye la solubilidad del 1-MCP en el citoplasma, tal como lo sugieren algunos estudios (Mir et al., 2001; Villalobos et al., 2011).

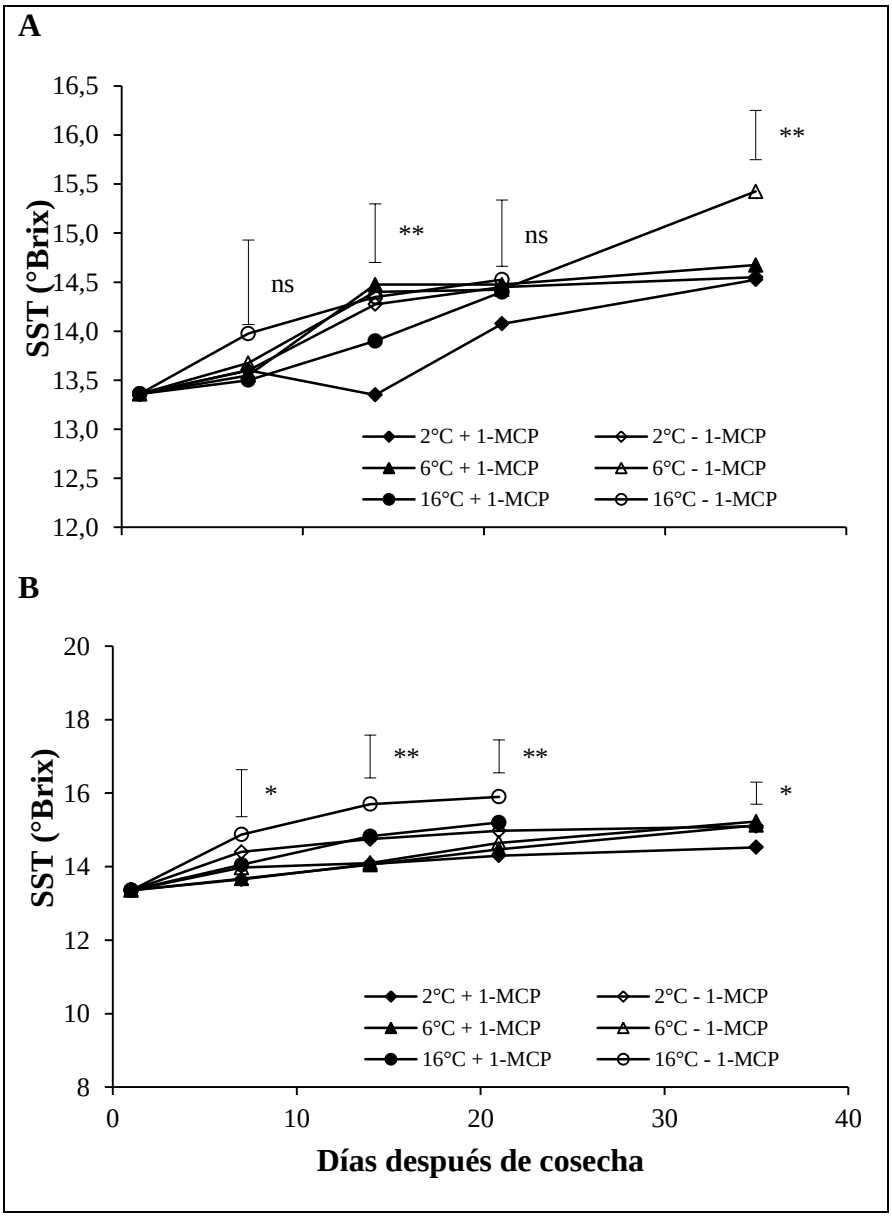


Figura 4-6: Sólidos solubles totales de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias.

Acidez total titulable

La ATT disminuyó de forma continua. Sin embargo, la disminución de manera general fue más lenta en frutos con aplicación de 1-MCP y que se refrigeraron a 2°C, mientras que los frutos sin refrigeración y sin 1-MCP mostraron la mayor diminución de la ATT, este comportamiento fue similar para frutos con cáliz y sin cáliz (Figura 4-7).

Los ácidos orgánicos son, después de los carbohidratos, el depósito energético más importante para el fruto (Osterloh et al., 1996). De esta manera, la acidez disminuye porque los ácidos orgánicos son sustratos respiratorios (Kader, 2008) y/o son convertidos en azúcares mediante el proceso de gluconeogénesis (Paliyath et al., 2008). Teniendo en cuenta que la refrigeración y el uso del 1-MCP disminuyeron la tasa respiratoria en los frutos de uchuva (Figura 4-7), y que Pereira et al., (2013) mencionan que con la disminución de la respiración, se reduce la actividad tanto metabólica y enzimática del fruto, es posible afirmar que en este estudio, la disminución de la ATT es menor debido a que posiblemente el consumo de ácidos orgánicos en la respiración es menor. Al respecto, Zhang et al. (2009) observaron que el 1-MCP retrasó la disminución de la ATT en frutos de tomate, mientras que la refrigeración lo hizo en frutos de curuba (Téllez et al., 2007).

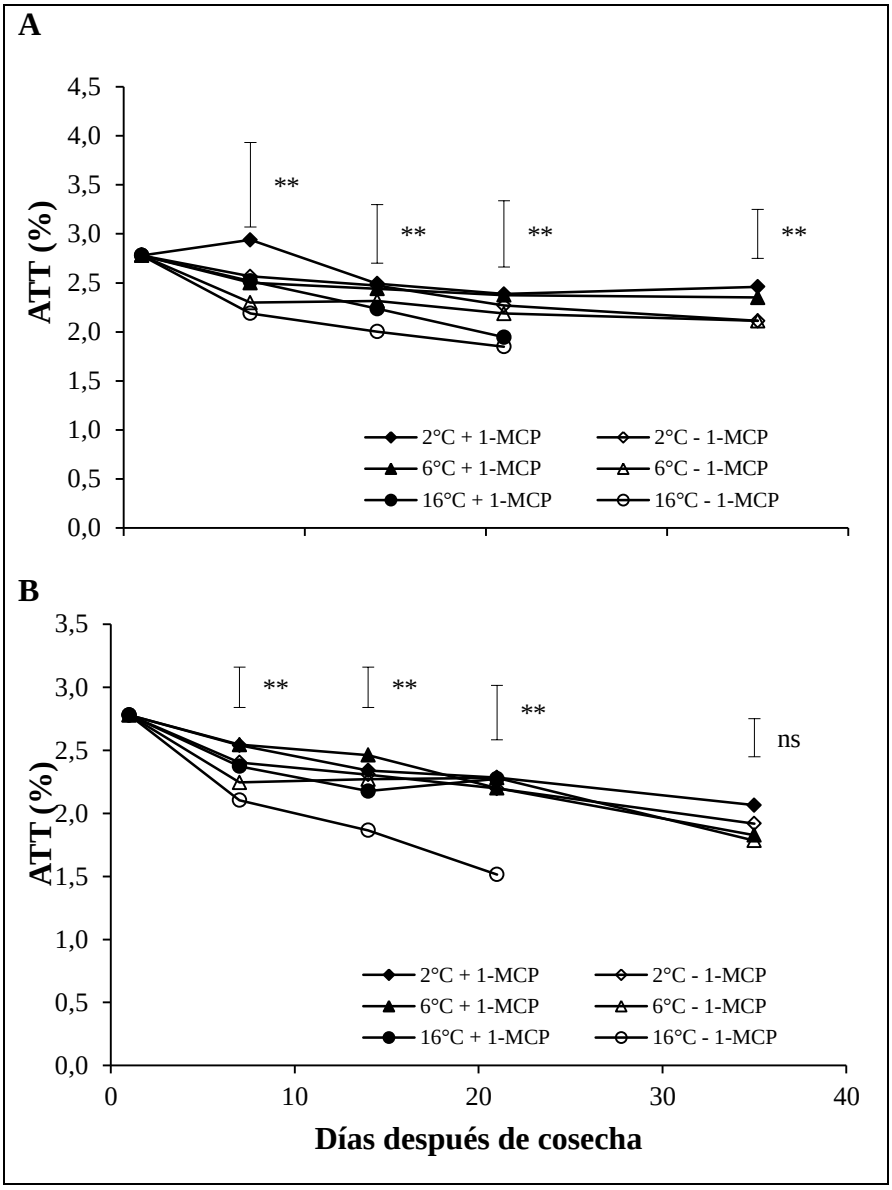


Figura 4-7: Acidez total titulable de frutos de uchuva almacenados a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. A. Frutos con cáliz y B. Frutos sin cáliz. La barra representa el valor estadístico de diferencia mínima significativa (LSD) para comparar los promedios, de acuerdo con la prueba de Tukey. Si las diferencias entre dos promedios en cada punto de muestreo son mayores al LSD, habrá diferencias a un α de 0,05. ** diferencias estadísticas al 1%, * diferencias estadísticas al 5%, ns no hay diferencias.

Fase de shelf-life

Tasa respiratoria

En los primeros 3 días de almacenamiento se observó un aumento representativo de la tasa respiratoria en todos los tratamientos y periodos de shelf-life, tanto para frutos con cáliz como sin cáliz. Además, la tasa respiratoria fue superior en el primer periodo de shelf-life (20d). Respecto a los tratamientos, en frutos con cáliz la refrigeración a 2°C generó mayor tasa respiratoria en los dos periodos de shelf-life (Figura 4-8). Por su parte, en frutos sin cáliz, el uso del 1-MCP disminuyó significativamente la tasa respiratoria (Figura 4-9).

Los resultados encontrados indican que en uchuva es necesario mantener una cadena de frío desde el proceso poscosecha hasta el periodo de anaquel, para prolongar la vida útil del producto, tal como lo menciona Alvarado et al. (2004), pues si se interrumpe la refrigeración, la tasa respiratoria incrementa de forma representativa, de esta manera, los frutos con más alta tasa respiratoria maduran más rápido y son más perecederos. No obstante, los frutos con cáliz tienen un mejor comportamiento en el periodo de shelf-life y soportan más fácilmente los cambios drásticos de temperatura. En concordancia, Alvarado et al. (2004) encontraron que frutos de uchuva con cáliz presentaron valores de intensidad respiratoria más bajos, lo que se traduce en un menor deterioro fisiológico. Aumentos de la tasa respiratoria en la fase de shelf-life también fueron encontrados en frutos de arazá refrigerados y tratados con 1-MCP, sin embargo, con el 1-MCP la tasa respiratoria fue menor (Carrillo et al., 2011).

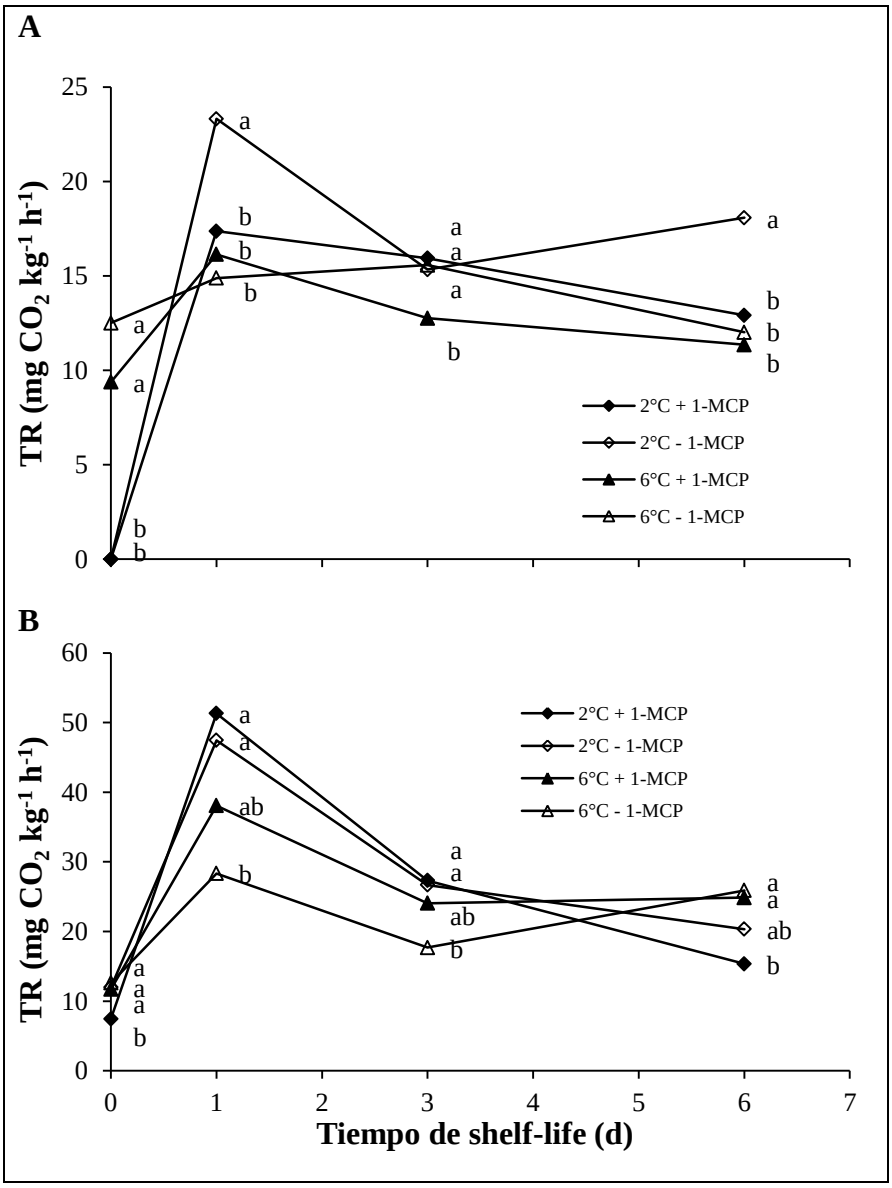


Figura 4-8: Cambio en la tasa respiratoria de frutos de uchuva con cáliz durante el tiempo de "shelf-life", después de ser almacenados durante 20 (A) y 35 (B) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

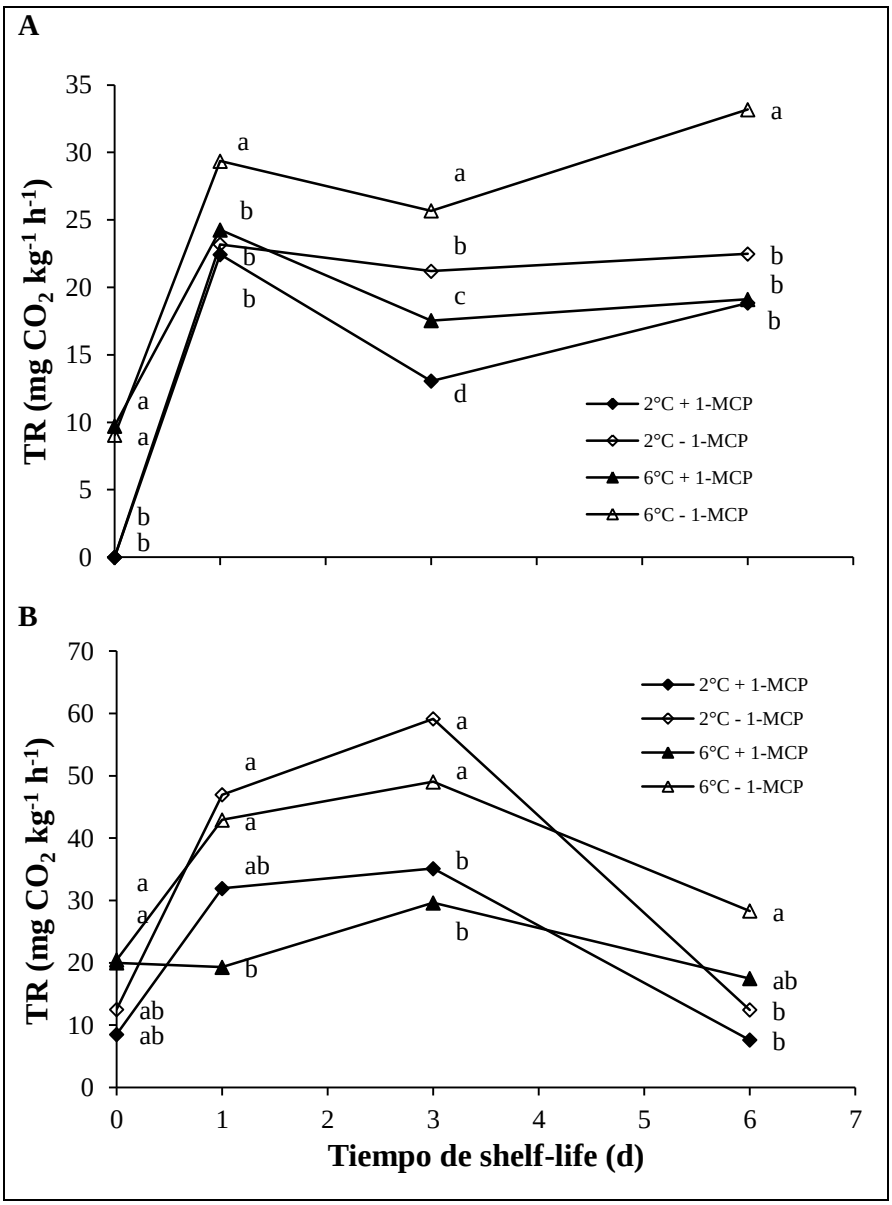


Figura 4-9: Cambio en la tasa respiratoria de frutos de uchuva sin cáliz durante el tiempo de "shelf-life", después de ser almacenados durante 20 (A) y 35 (B) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

Pérdida de peso

Se presentó un aumento lineal de la pérdida de peso en todos los casos. Se encontró que hubo menor pérdida de peso en el segundo periodo de shelf-life (35d) y en los frutos con

cáliz. Con relación a los tratamientos, a los 6 días se observó que en los frutos con cáliz la refrigeración a 6°C sin 1-MCP generó la menor pérdida de peso en los dos periodos de shelf-life (Figura 4-10). En los frutos sin cáliz, la menor pérdida de peso se debió a la refrigeración a 6°C con 1-MCP (Figura 4-11). Carrillo et al., (2011) encontraron que la refrigeración y el 1-MCP disminuyeron la pérdida de peso de frutos de arazá en el periodo de shelf-life en comparación con el testigo.

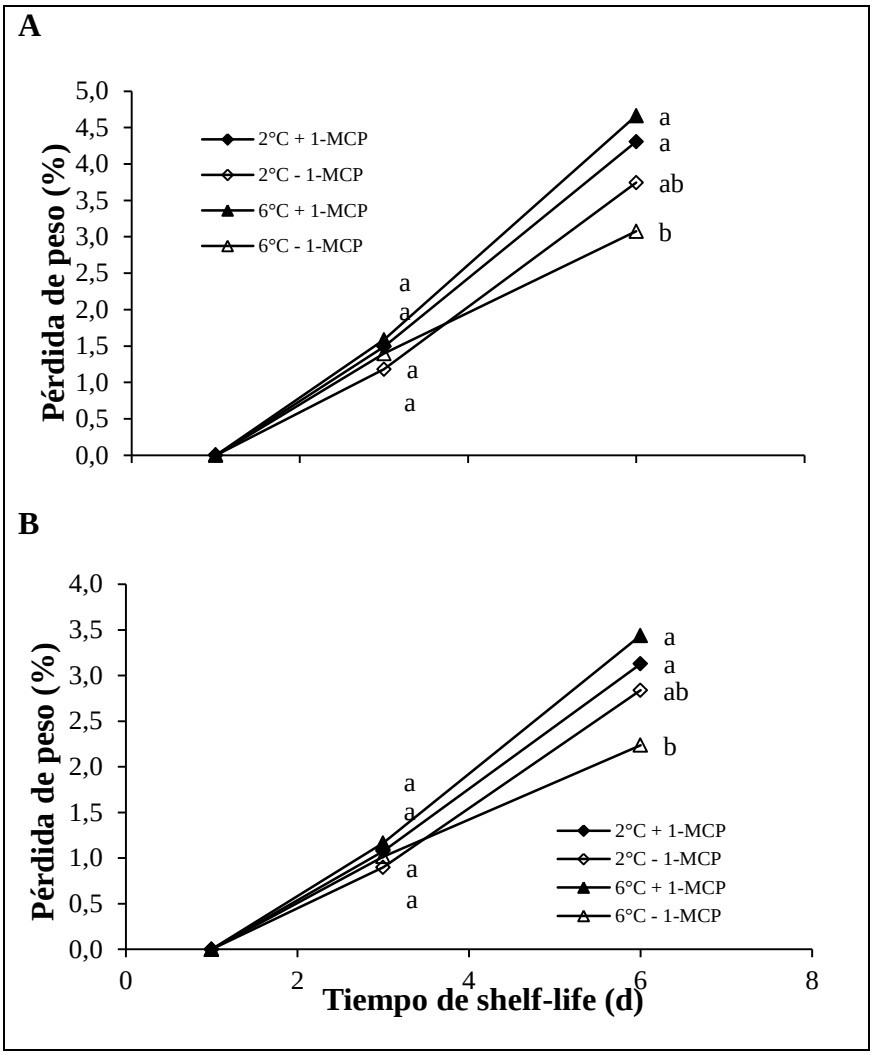


Figura 4-10: Cambio en la pérdida de peso de frutos de uchuva con cáliz durante el tiempo de "shelf-life", después de ser almacenados durante 20 (A) y 35 (B) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

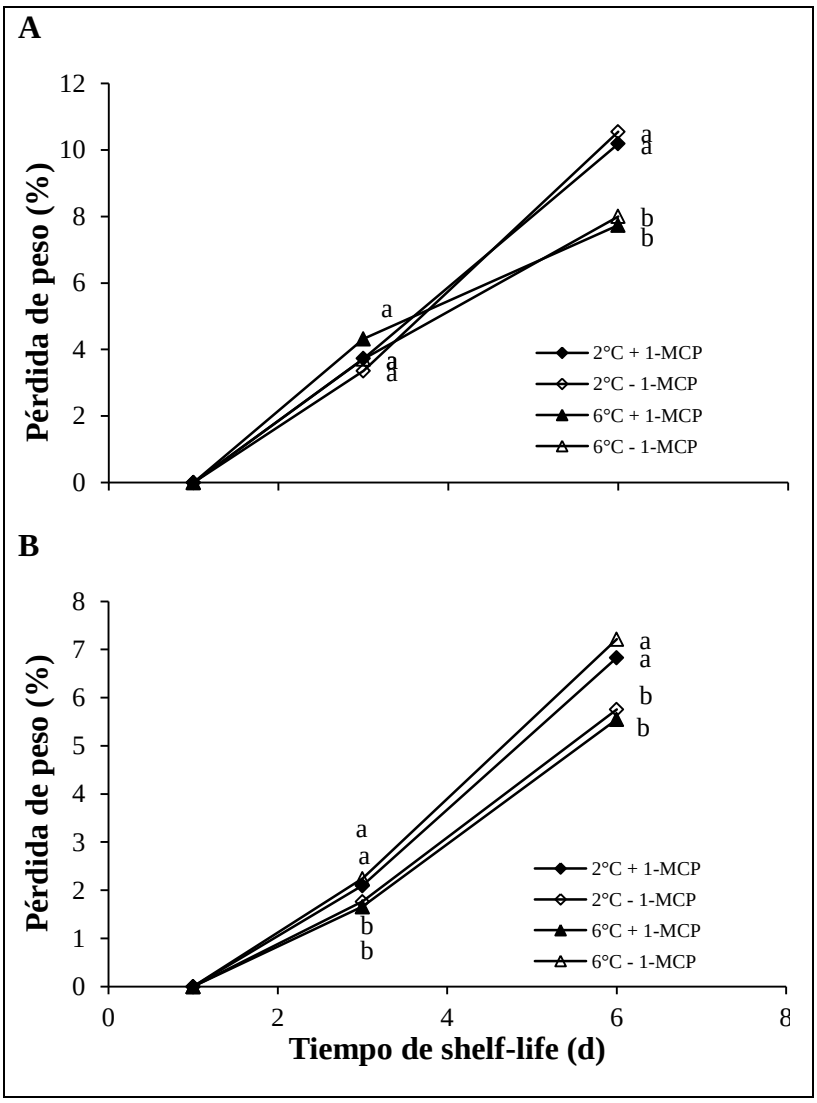


Figura 4-11: Cambio en la pérdida de peso de frutos de uchuva sin cáliz durante el tiempo de "shelf-life", después de ser almacenados durante 20 (A) y 35 (B) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

Todos los frutos de uchuva en una semana de shelf-life perdieron un alto porcentaje de peso en comparación con lo perdido durante el almacenamiento refrigerado. Lo cual pone de manifiesto la importancia de mantener un almacenamiento refrigerado continuo. De esta manera, la calidad de los frutos puede disminuir gradualmente durante el almacenamiento refrigerado y luego se puede disminuir rápidamente cuando los frutos se retiran posteriormente a las condiciones de vida de anaquel a temperatura ambiente (Jiang

et al., 2003), tal como ocurrió en los frutos de uchuva, principalmente aquellos que permanecieron sin el cáliz. Estos resultados respaldan el hecho de que los estudios de conservación de frutos a bajas temperaturas en lo posible deben complementarse con estudios de vida en anaquel, los cuales comprenden periodos que pueden estar entre 4 a 14 días, generalmente (Jiang et al., 2003).

Kader (2002) comenta que la pérdida de agua es la causa principal del deterioro del fruto porque conduce a la disminución directa del peso fresco y la calidad, además acorta la vida de anaquel porque se aceleran los procesos de maduración y senescencia. La pérdida de agua ocasiona daños de tipo oxidativo por causa de la desecación y, por otra parte, se pierden constituyentes antioxidantes (Rodríguez et al., 2006). Teniendo en cuenta que las pérdidas de masa superiores al 5% causan deterioro en la calidad del producto y, por consiguiente reducción en el precio (Pantástico, 1981), el fruto de uchuva se debe comercializar antes de los 6 días de shelf-life, principalmente los frutos sin cáliz que presentaron altas pérdidas de peso. En concordancia, Burg (2004) reporta que en manzanas y naranjas se toleran pérdidas de peso máximo del 5% antes de que el producto se vuelva no comerciable, sin embargo, este mismo autor reporta que dependiendo de la especie, el producto pierde su frescura cuando transpiran más del 3 al 10% de su peso fresco.

Color de la epidermis

En los frutos con cáliz, el cáliz perdió color verde durante los dos periodos de shelf-life, sin embargo, la pérdida fue menor con la refrigeración a 2°C y 1-MCP ($P \leq 0,01$), este mismo tratamiento conservó el color verde del cáliz hasta los 35d. En el segundo periodo de shelf-life todos los cálices adquirieron una tonalidad café (Figura 4-12). Respecto a los frutos, el índice de color aumentó durante los periodos de shelf-life, siendo mayor el incremento en el primer periodo. Con diferencias estadísticas ($P \leq 0,01$), se encontró un menor índice de color en los frutos refrigerados a 2°C y 1-MCP y un mayor valor con la refrigeración a 6°C sin 1-MCP (Figura 4-14). En los frutos sin cáliz, hubo un cambio drástico entre el inicio y el final del primer periodo de shelf-life, pero no se presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos. En el segundo periodo de shelf-life, el cambio

de color fue menor, y con diferencias estadísticas los frutos refrigerados a 2°C y 1-MCP tuvieron el menor índice de color (Figura 4-12).

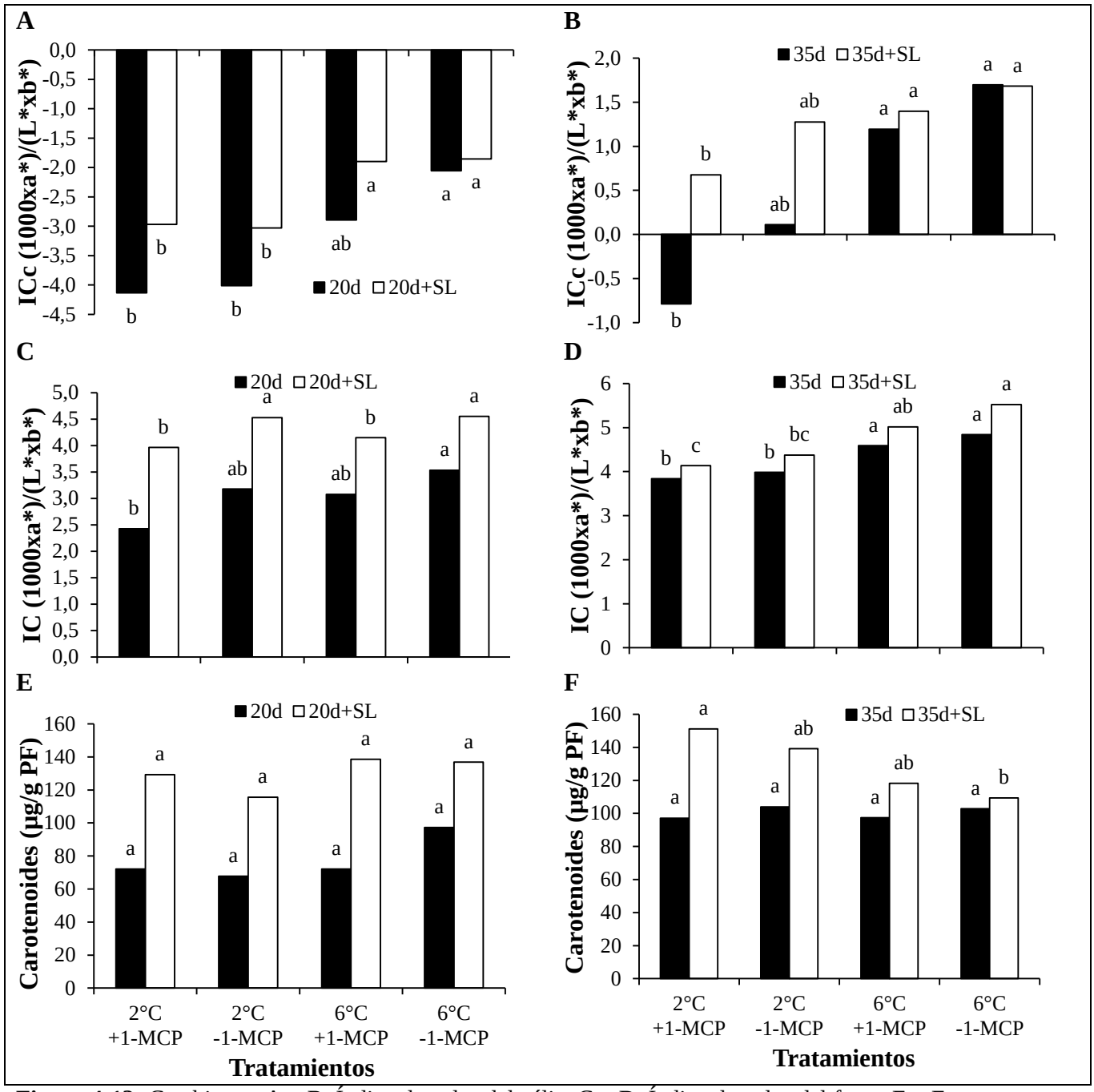


Figura 4-12: Cambio en: A y B. Índice de color del cáliz, C y D. Índice de color del fruto, E y F. Carotenoides totales de frutos de uchuva con cáliz al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

Teniendo en cuenta que los cambios de color del fruto de uchuva se deben a la degradación de la clorofila y a la acumulación de carotenoides en plástidos (Trinchero *et al*., 1999), principalmente β-caroteno (Fischer *et al*., 2000). El periodo de shelf-life al parecer incrementó la actividad e enzimas involucradas en la degradación de clorofilas y/o en la síntesis de carotenoides en los frutos, que dio como resultado cambios rápidos en el color, principalmente en los frutos de uchuva almacenados a 6°C y sin 1-MCP. Estos resultados también indican la importancia de los tratamientos antes del shelf-life, de esta manera se evidencia que a menor temperatura de refrigeración y con el uso de 1-MCP se retrasa el cambio de color en los frutos de uchuva de manera más eficiente, tal como se encontró antes del shelf-life. Resultados similares fueron encontrados en arazá, donde la refrigeración y el 1-MCP disminuyeron el cambio de color en el periodo de shelf-life (Carrillo et al., 2011).

Carotenoides totales

Entre el inicio y el final de los periodos de shelf-life los carotenoides aumentaron, siendo más marcado este aumento para los frutos almacenados a 2°C. Solo se presentaron diferencias estadísticas para el segundo periodo ($P \leq 0,05$), donde en frutos con cáliz, la refrigeración a 2°C con 1-MCP favorecieron una mayor acumulación de carotenoides, la respuesta contraria se obtuvo con 6°C y sin 1-MCP (Figura 4-12). En frutos sin cáliz, la tendencia fue opuesta, pues con 6°C sin 1-MCP se obtuvo mayor concentración de carotenoides y con 2°C y 1-MCP la menor (Figura 4-14).

El carotenoide predominante en los frutos de uchuva es el β-caroteno (Fischer *et al*., 2000), de esta manera, en la vida de anaquel, los frutos de uchuva estarían aumentando la biosíntesis de β-caroteno, como resultado de un mayor metabolismo y una maduración acelerada, la cual, al parecer es mayor a 2°C en frutos con cáliz porque en esta condición de refrigeración se presenta un mayor delta de temperatura cuando los frutos se sacan a temperatura ambiente, en frutos sin cáliz si se conserva la tendencia de que a mayor temperatura de refrigeración antes del shelf-life hay mayor síntesis de carotenoides.

Firmeza

Disminuyó para todos los tratamientos al final del shelf-life, tanto para frutos con cáliz como sin cáliz. También se observó que los frutos a 2°C con 1-MCP presentaron el mayor cambio en la firmeza entre el inicio y el final del shelf-life. Solo se presentaron diferencias estadísticas significativas en el primer periodo de shelf-life para frutos sin cáliz, donde la mayor firmeza se obtuvo en frutos a 6°C con 1-MCP (Figura 4-13 y 4-14).

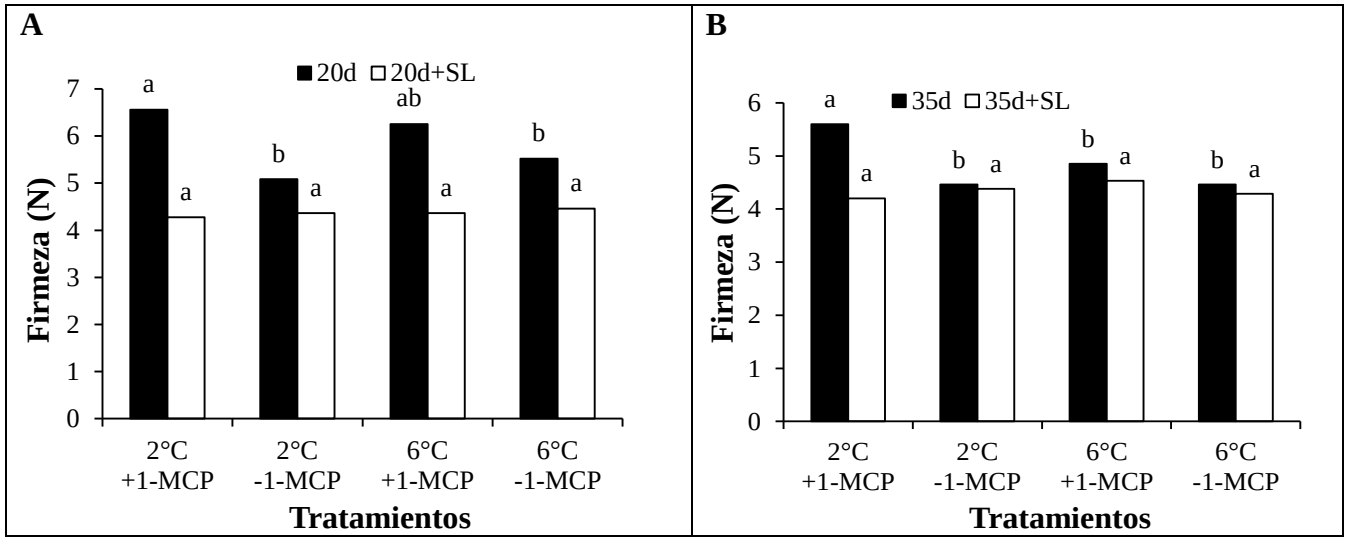


Figura 4-13: Cambio en la firmeza de frutos de uchuva con cáliz al final del "shelf-life", después de ser almacenados durante 20 (A) y 35 (B) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en el mismo punto de muestreo presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

A pesar de que a 2°C con 1-MCP se mantuvo una mayor firmeza en los frutos de uchuva durante el almacenamiento, la maduración acelerada que al parecer se presentó en el shelf-life generó alta pérdida de firmeza en todos los frutos, situación que indica que las enzimas involucradas en el ablandamiento de los frutos de uchuva como poligalacturonasa, pectinmetilesterasa y algunas glicosidasas (Majumder y Mazumdar, 2002) aumentan rápidamente su actividad con el aumento de la temperatura de almacenamiento. Osterloh et al. (1996) afirman que una elevada disminución de la firmeza del fruto, obedece a un alto metabolismo y una maduración acelerada, derivada de altas temperaturas, lo cual, al parecer estaría ocurriendo en los frutos de uchuva durante el periodo de shelf-life. En

concordancia, Botia-Niño et al. (2008) reportaron menor firmeza en frutos de curuba refrigerados a 4 y °C con madurez complementaria en comparación con frutos que presentaron refrigeración continua.

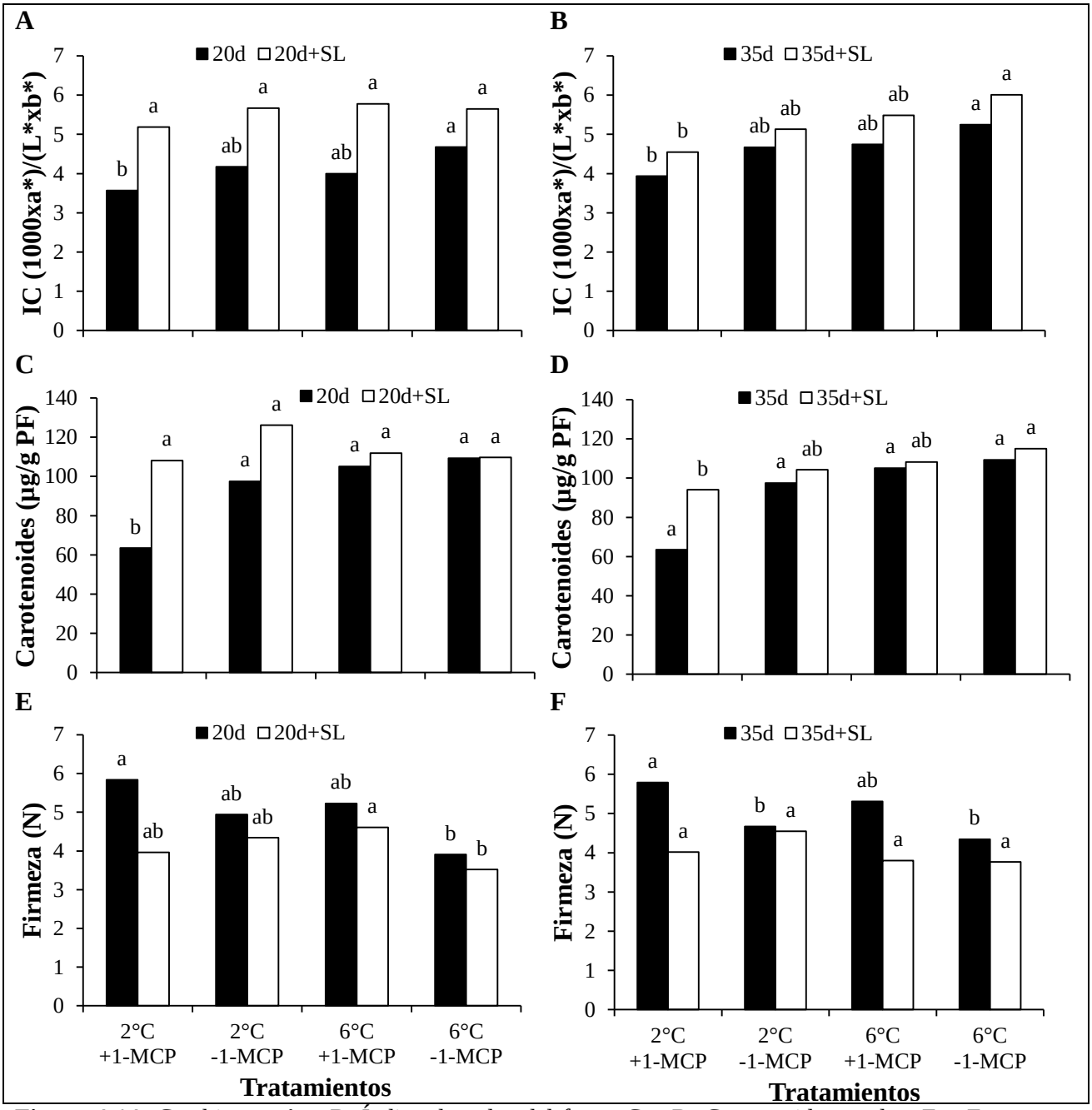


Figura 4-14: Cambio en: A y B. Índice de color del fruto, C y D. Carotenoides totales, E y F. Firmeza de frutos de uchuva sin cáliz al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

Sólidos solubles totales

El aumento entre el inicio y el final del shelf-life en los dos periodos fue mínimo y no se presentaron diferencias estadísticas significativas en ningún caso (Figuras 4-15 y 4-16). Se esperaba un mayor cambio en la concentración de SST al final del periodo de shelf-life, principalmente en el segundo periodo, debido a un proceso de maduración acelerado inducido por el cambio de temperatura, no obstante, es posible que dicho aumento no se diera porque gran parte de los SST pudieron haber sido utilizado en el proceso respiratorio, lo cual concuerda con las altas tasas respiratorias presentadas en la fase de shelf-life (Figura 4-8 y 4-9) y también explicaría los resultados encontrados a nivel de tratamientos. Al respecto, Osterloh et al. (1996) menciona que los carbohidratos son los principales sustratos respiratorios. En frutos de curuba si se observó aumento de los SST como resultado de la interrupción del almacenamiento refrigerado (Botía-Niño et al., 2008).

Acidez total titulable

En general se observó que la ATT disminuyó entre el inicio y el final del shelf-life, esta disminución fue más notoria en frutos almacenados a 6°C. Únicamente se presentaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en el segundo periodo de shelf-life. En frutos con cáliz y sin cáliz, la mayor ATT se obtuvo con 2°C y 1-MCP y la menor ATT con 6°C y sin 1-MCP (Figuras 4-15 y 4-16). Es común una disminución de la acidez durante la maduración de muchos frutos, debido a la alta tasa metabólica presentada en esta fase (Osterloh et al. 1996). A pesar de que la interrupción de la refrigeración reactiva los fenómenos normales de deterioro poscosecha (Botia-Niño et al., 2008), este deterioro expresado como disminución de la ATT fue menor cuando los frutos de uchuva estuvieron a 2°C y con 1-MCP, conservando la tendencia encontrada antes del shelf-life (Figuras 4-15 y 4-16). Indicando la importancia de estas dos tecnologías para retardar la maduración en frutos, tal como se reporta para frutos de arazá (Carrillo et al., 2011) y frutos de pera (Itai et al., 2008).

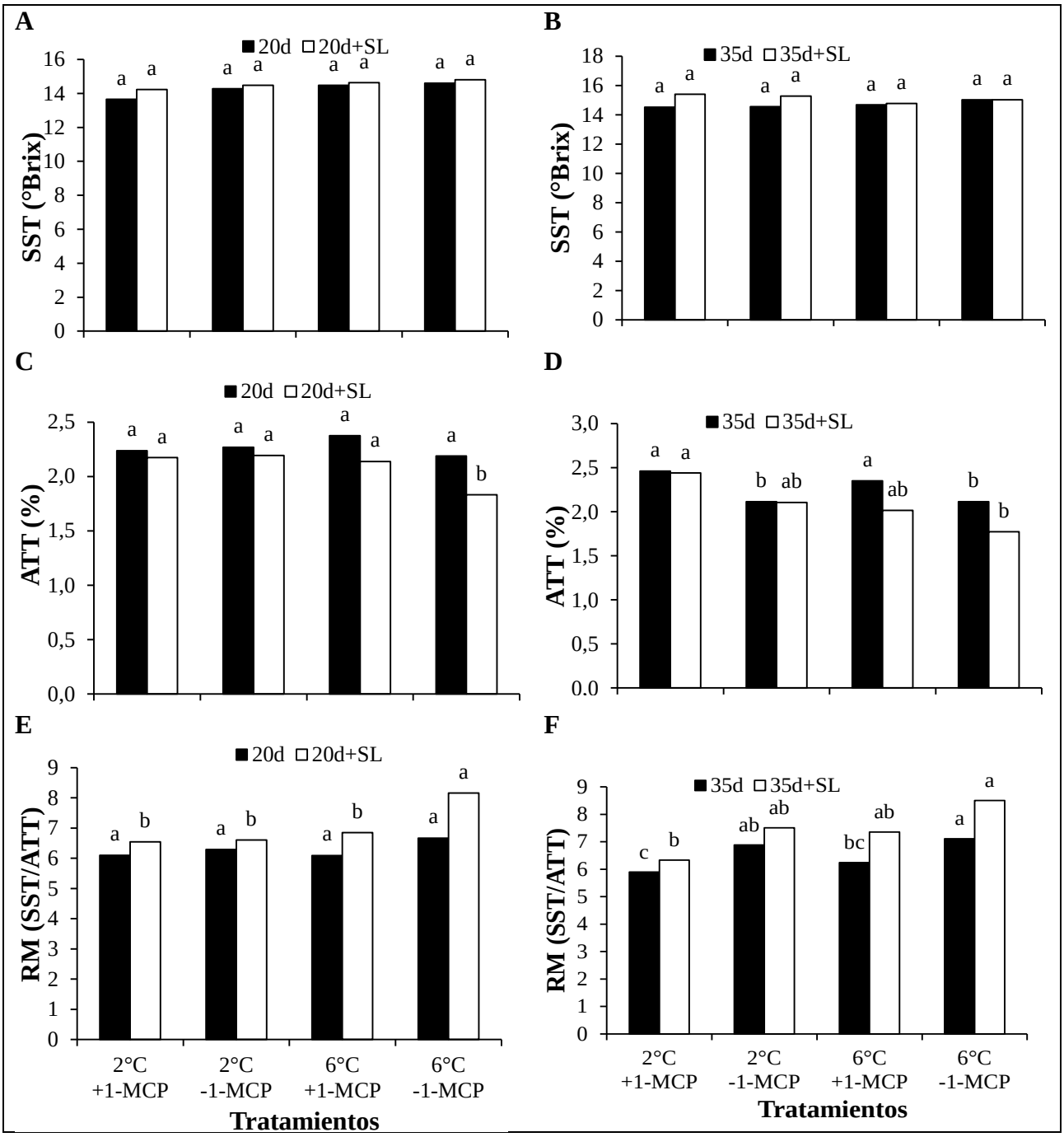


Figura 4-15: Cambio en: A y B. Sólidos solubles totales (SST), C y D. Acidez total titulable (ATT), E y F. Relación de madurez (RM) de frutos de uchuva con cáliz al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

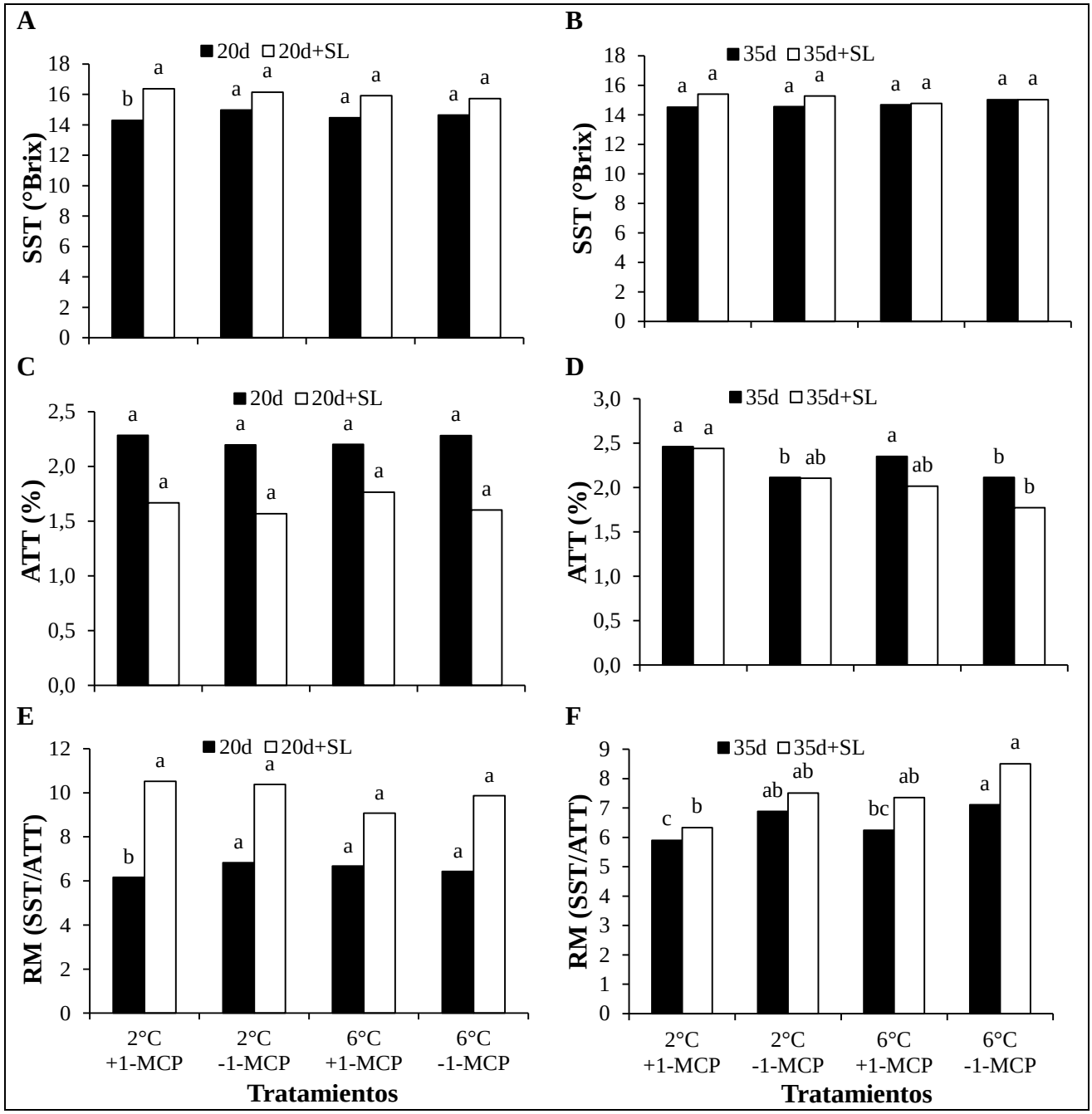


Figura 4-16: Cambio en: A y B. Sólidos solubles totales (SST), C y D. Acidez total titulable (ATT), E y F. Relación de madurez (RM) de frutos de uchuva sin cáliz al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

Relación de madurez

Hubo un incremento entre el inicio y el final del periodo de shelf-life, siendo más marcado el incremento en el primer periodo. Solo hubo diferencias estadísticas ($P \leq 0,01$) en el segundo periodo. Tanto en frutos con cáliz como sin cáliz, la menor RM se obtuvo con 2°C y 1-MCP y la mayor RM con 6°C y sin 1-MCP (Figuras 4-15 y 4-16).

La relación SST/ATT tiene suma importancia para el sabor del fruto y de su jugo, teniendo en cuenta al presentar el fruto alto contenido de azúcares, el nivel de los ácidos debe ser suficientemente elevado para satisfacer el gusto del consumidor (Osterloh et al. 1996). En general, durante la maduración, se presenta la formación de azúcares y degradación de ácidos orgánicos (Contreras et al., 2007), en este estudio, el aumento de la RM está más influenciado por la disminución de la ATT, teniendo en cuenta que el cambio en los SST no fue representativo. Los valores encontrados de RM están acordes con los reportados por Fischer y Martínez (1999) y Narváez-Cuenca et al. (2014). Se ha encontrado que la refrigeración es eficiente para retrasar el aumento de la RM (Téllez et al., 1999; 2007), pero cuando se interrumpe la RM presenta un mayor incremento (Botia-Niño et al., 2008), tal como ocurrió en este estudio. Por su parte, Valdenegro et al. (2012) encontraron que el 1-MCP retardó significativamente el aumento de la relación de madurez de frutos de uchuva

Incidencia de patógenos

Antes del shelf-life no hubo incidencia de enfermedades, pero durante el periodo de shelf-life el ataque de patógenos fue representativo y supera considerablemente al 6% que reportan García et al. (2014). Se presentaron diferencias estadísticas en todos los casos ($P \leq 0,01$). Se encontró que en el segundo periodo la incidencia de patógenos fue mucho más alta para la mayoría de tratamientos, excepto para los frutos sin cáliz a 6°C con 1-MCP. Para frutos con cáliz hubo mayor incidencia de patógenos en los frutos almacenados a 2°C con y sin aplicación de 1-MCP en los dos periodos (Figura 4-17). Los frutos sin cáliz presentaron considerablemente mayor ataque de patógenos, donde la menor

incidencia se obtuvo a 6°C con 1-MCP (Figura 4-17). La alta incidencia de patógenos encontrada en los frutos de uchuva se debe en gran parte a que los frutos no se desinfectaron, pues el método más utilizado que es el hipoclorito de sodio, no es recomendable para frutos de uchuva porque remueve las ceras cuticulares y acelera el deterioro poscosecha, tal como lo reportan varios autores (Alvarado et al., 2004; Galvis et al., 2005). Los patógenos que afectaron los frutos de uchuva fueron en orden *Botrytis cinerea Pers*. Ex. Fr. y *Phoma sp*.

La maduración y la senescencia están asociadas con un incremento en la susceptibilidad a patógenos en poscosecha, al parecer causada por la presencia de etileno (Zhang et al., 2012; Martínez-Romero et al., 2007). Y se reporta que la aplicación del frío disminuye los riesgos de aparición y desarrollo de ciertos agentes causantes de alteraciones como bacterias, hongos y levaduras (Kader, 2002), por ejemplo, en frutos de arándano, la incidencia de *B. cynerea* fue muy baja al final del almacenamiento refrigerado (Chiabrando y Giacalone, 2011). Por tanto, la utilización de bajas temperaturas y el 1-MCP debían reducir la incidencia de enfermedades en los frutos de uchuva, pero solo hubo efecto favorable del 1-MCP. Al respecto, Dong et al. (2002) reportaron que el 1-MCP aumentó la resistencia a enfermedades en frutos de albaricoque, Su y Gubler (2012) en tomate y Zhang et al. (2012) en frutos de jujube (*Zizyphus jujuba* cv. Huping), estos últimos autores atribuyen el control a la inducción de enzimas antioxidantes por parte del 1-MCP. En frutos de guayaba, Singh y Pal (2008) encontraron que la incidencia de enfermedades en el periodo de shelf-life (después de almacenar los frutos a 10°C) disminuyó a medida que se aumentó la dosis y el tiempo de exposición del 1-MCP, la mejor respuesta se obtuvo con 600 nLL^{-1} durante 24 h.

De otra parte, la susceptibilidad a las enfermedades es considerada un síntoma de daño por frío (Hobson, 1987; Cheng y Shewfelt, 1988), lo cual explicaría la alta incidencia de patógenos a 2°C en los frutos de uchuva. García et al. (2014) afirman que para mercados distantes como los de exportación es recomendable mantener la uchuva refrigerada y no romper la cadena del frio, dado que esto puede ocasionar condensación en los empaques y favorecer el desarrollo de hongos. En concordancia con los resultados obtenidos en

uchuva, en frutos de litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) almacenados durante 10, 20 o 30 días a 3-5°C, se encontró que en el periodo de shelf-life (24 h), el mayor tiempo de almacenamiento generó mayor índice de pardeamiento como indicativo de daños por frío y mayor incidencia de enfermedades (Liu et al., 2011).

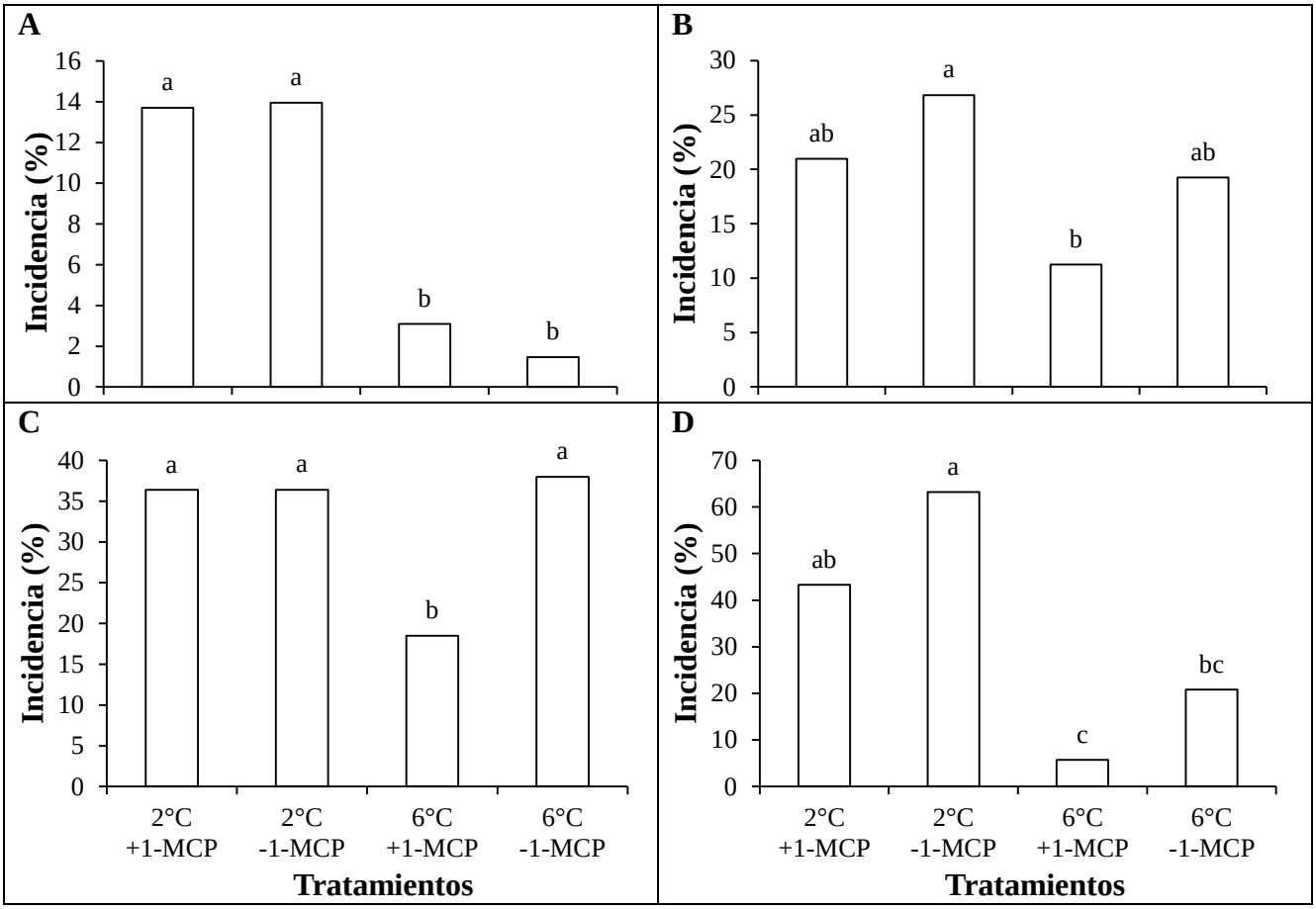


Figura 4-17: Incidencia de patógenos en A y B. Frutos con cáliz, C y D. Frutos sin cáliz, al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

Permeabilidad de la membrana

Se determinó este parámetro como indicativo de los daños por frio, debido a que no se observó ningún tipo de síntoma visible relacionado con esta fisiopatía, como por ejemplo pardeamientos externos o internos, picados, pobre desarrollo del color, entre otros (Hobson, 1987; Cheng y Shewfelt, 1988). En el primer periodo la liberación de electrolitos

fue mayor antes del shelf-life, mientras que en el segundo se encontró lo contrario. Solo hubo diferencias estadísticas para el final segundo periodo en frutos con cáliz, donde la mayor liberación de electrolitos se obtuvo en frutos almacenados a 6° con o sin 1-MCP (Figura 4-18).

En general los valores fueron muy altos, situación que se pudo deber a que los frutos de uchuva presentan una epidermis muy delgada, que al desprenderla del fruto se puede estar generando daños representativos en las membranas, por esta razón, en este estudio, la liberación de electrolitos no es adecuada para determinar la existencia de daños por frío (aunque se puedan estar presentando), y solo es útil para comparar entre tratamientos la permeabilidad de la membrana entre tratamientos y entre antes y después del shelf-life. En este orden de ideas, es posible que la mayor liberación de electrolitos en frutos con cáliz a 6°C a los 35d+SL se deba más a un proceso de maduración más avanzada en comparación con frutos almacenados a 2°C, lo cual también explicaría el aumento de este parámetro entre el antes y después del shelf-life a los 35 d. La disminución de la liberación de electrolitos en el primer periodo puede deberse a que tal vez si se estén presentando daños en la membrana por la refrigeración, y al sacar los frutos a temperatura ambiente estos daños se pueden estar reparando. Al respecto, en frutos de kiwi almacenados a 2°C por 10 días, la liberación de electrolitos osciló entre 44 y 49% aproximadamente, pero los autores no mencionan la presencia de daños por frío (Mao et al., 2007), pero en banano con daños por frío la liberación de electrolitos estuvo por debajo del 30% (Jiang et al., 2004). Estos mismos autores reportan que el 1-MCP disminuyó la liberación de electrolitos en los frutos de kiwi.

Aunque la liberación de electrolitos no fue un parámetro adecuado para medir los daños por frío, si se pudo observar que durante el shelf-life, los frutos de uchuva sufrieron cambios representativos en la maduración, que se caracterizaron por una maduración acelerada, incluso algunos frutos entraron en senescencia. Estos cambios fueron mucho más notorios en el segundo periodo de shelf-life y especialmente para frutos sin cáliz almacenados a 2°C. De acuerdo con los resultados, los frutos con cáliz presentaron un mejor comportamiento durante el almacenamiento y los dos periodos de shelf-life, incluso

a 2°C presentaron mejor comportamiento poscosecha, con la única desventaja de que fueron más susceptibles al ataque de patógenos.

Asimismo, Tietel et al. (2012) reportan que la refrigeración tiene gran influencia en el sabor del fruto, y que se pueden presentar disminuciones en la aceptabilidad sensorial después del almacenamiento refrigerado antes de que cualquier síntoma de daño por frío se haga visible. Por lo tanto, los efectos perjudiciales de la refrigeración en el "flavor-life" preceden a los de calidad externa y "shelf-life" (Baldwin et al., 2007; Kader, 2008). Por tanto, se recomienda para próximos estudios involucrar un análisis sensorial que permita conocer la influencia de la refrigeración sobre las características sensoriales más importantes en uchuva. En concordancia, en frutos de tomate se reporta que por debajo de 12,5°C se afecta negativamente el sabor (Maul et al., 2000). Se encontró que en mandarinas “W. Murcott” almacenadas a 8°C tuvieron ligeramente mejor sabor que aquellas que fueron almacenadas a 0 o 4°C, lo cual se atribuyó principalmente a relaciones SST/ATT muy altas, más que a cambios en el aroma (Obenland et al., 2011).

Algunos frutos tropicales que presentan daños por frio visibles son, el arazá en temperaturas por debajo de 11-12°C (Hernández et al., 2011), el banano y el mango con temperaturas inferiores a 13°C (Jiang et al., 2004; Sivakumar et al., 2011) y el tomate es susceptibles a los daños por frío a temperaturas por debajo de 12,5°C (Rugkong et al., 2011).

Sin embargo, es importante mencionar que el clima presente durante el desarrollo del cultivo tiene gran influencia sobre la calidad poscosecha de los frutos. En Colombia la uchuva se cultiva en altitudes entre 1.800 y 2.800 msnm, con temperaturas medias óptimas que están entre 13 y 16°C (Fischer et al., 2014), es posible que estas temperaturas generen cierta tolerancia de los frutos de uchuva a la refrigeración entre 2 y 6°C. Al respecto, la reducción de los daños por frío en frutos cosechados puede estar relacionada con su capacidad para reducir y/o limpiar ROS a través de aumento de las actividades de las enzimas antioxidantes, como se ha reportado en frutos de mandarina, zucchini y loquat

(Sala, 1998; Zheng et al., 2008; Cao et al., 2011). Asimismo, una mayor proporción de ácidos grasos insaturados en los lípidos generalmente conduce a una menor incidencia de daño por frío (Marangoni et al., 1996; Cao et al., 2011).

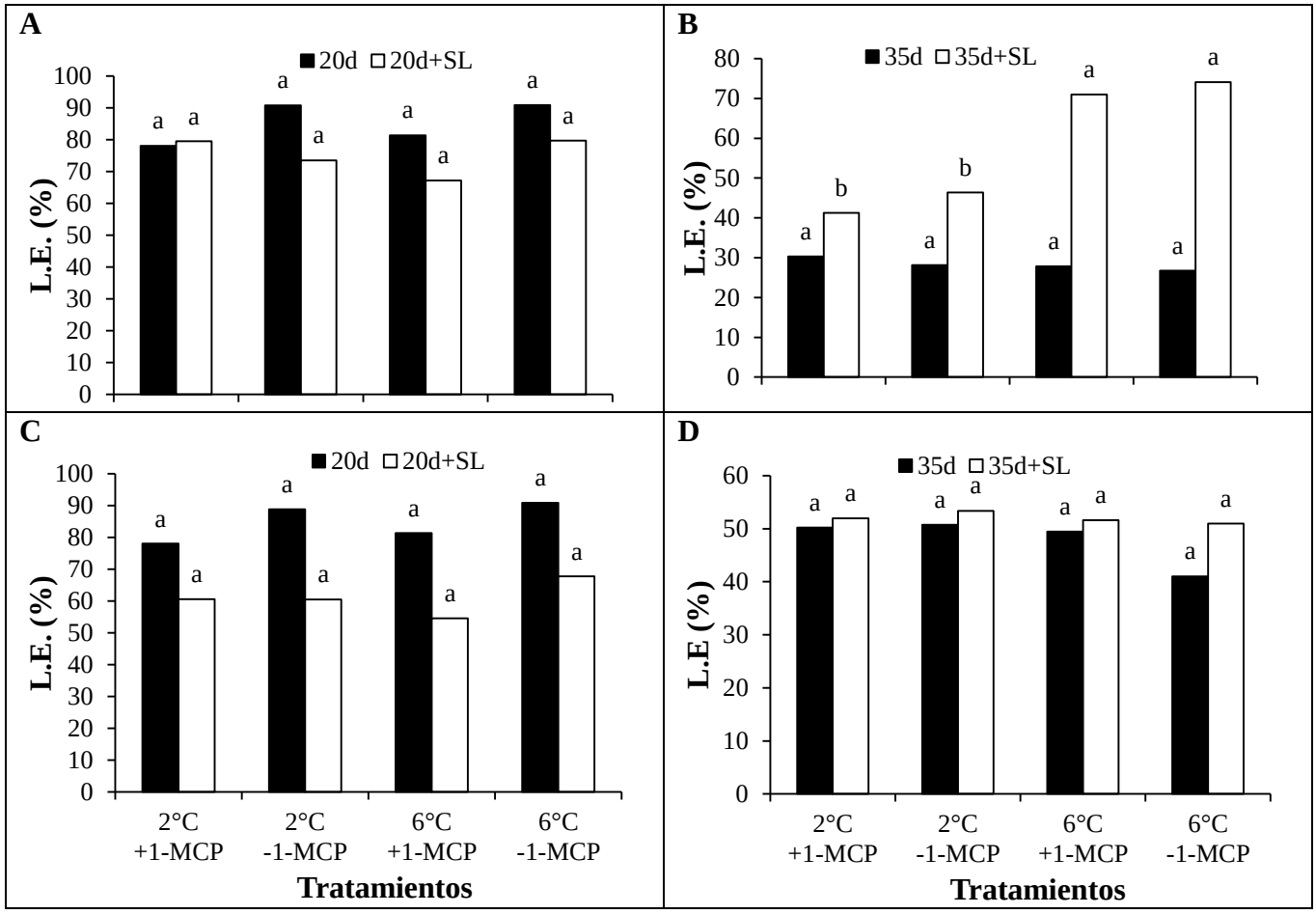


Figura 4-18: Liberación de electrolitos en A y B. Frutos con cáliz, C y D. Frutos sin cáliz, al final del "shelf-life (SL)", después de ser almacenados durante 20 (izquierda) y 35 (derecha) días a diferentes temperaturas, con (+1-MCP) y sin (-1-MCP) aplicación de 1-metilciclopropeno. Promedios seguidos de letras diferentes en cada serie presentan diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey (P≤0,05).

4.1.6 Conclusiones

Durante los 35 días de almacenamiento, la refrigeración a 2°C con aplicación de 1-MCP fue la mejor alternativa de conservación de los frutos de uchuva con cáliz y sin cáliz. Con

este tratamiento los frutos de uchuva presentaron menor tasa respiratoria, menor pérdida de firmeza, de peso y de acidez total titulable, menor aumento de los sólidos solubles totales, de carotenoides totales y del índice de color.

En la fase de vida de anaquel o de shelf-life, se presentó un cambio drástico en el metabolismo de los frutos de uchuva que se evidenció por un aumento considerable de la tasa respiratoria y la pérdida de peso, principalmente en aquellos que fueron almacenados a 2°C. Se observó disminución de la acidez total titulable y de la firmeza, y hubo un aumento en el índice de color, en los carotenoides y en la relación de madurez. La incidencia de patógenos fue considerablemente alta, en especial con el almacenamiento a 2°C, lo cual puede ser un síntoma de daños por frío. Los frutos con cáliz presentaron un mejor comportamiento en este periodo. Para los frutos sin cáliz es más conveniente almacenar a 6°C con 1-MCP previo al shelf-life, mientras que los frutos con cáliz pueden almacenarse a 2°C con aplicación de 1-MCP.

4.1.7 Bibliografía

Agronet, 2014. Producción nacional por producto, Uchuva. Disponible en: http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/ReportesAjax/VerReporte.aspx. Consulta: 13 de noviembre de 2014.

Alvarado, P.; Berdugo, C. A. y Fischer, G. 2004. Efecto de un tratamiento de frío (a 1,5° C) y la humedad relativa sobre las características físico-químicas de frutos de uchuva *Physalis peruviana* L. durante el posterior transporte y almacenamiento Agronomía Colombiana, 22,(2),147-159.

Balaguera-López, H.E., C.A. Martínez y A. Herrera. 2014. Papel del cáliz en el comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) ecotipo Colombia. Revista Colombiana de ciencias Hortícolas. Manuscrito aceptado para publicación.

Baldwin, E.A., Plotto, A., Goodner, K., 2007. Shelf-life versus flavour life for fruits and vegetables: how to evaluate this complex trait. Stewart Postharvest Rev. 1, 3.

Barry, C y J. Giovannoni. 2007. Ethylene and fruit ripening. J. Plant. Growth. Regul. 26, 143-159.

Botia-Niño, J., P. Almanza-Merchán y H.E. Balaguera-López. 2008. Efecto de la temperatura sobre la maduración complementaria en curuba (*Passiflora mollissima* Bailey). Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica 11 (2), 187-196.

Burg, S.P., (ed.). Postharvest physiology and hypobaric storage of fresh products. Wallingford (UK). CABI Publishing, 2004. 654 p.

Cao, S., Z. Yang, Y. Cai y Z. Yonghua. 2011. Fatty acid composition and antioxidant system in relation to susceptibility of loquat fruit to chilling injury. Food Chemistry 127, 1777–1783.

Carrillo, M.P., Hernández, M. S., Barrera, J., Martínez, O., Fernández-Trujillo, J. P. 2011. 1-Methylcyclopropene delays arazá ripening and improves postharvest fruit quality, LWT - Food Science and Technology 44,250-255.

Cerqueira, T., A. Jacomino, F. Sasaki y L. Amorim. 2009. Controle do amadurecimento de goiabas 'kumagai' tratadas com 1-metilciclopropeno. Rev. Bras. Frutic. 31(3), 687-692.

Cheng, T.S., Shewfelt, R.L., 1988. Effect of chilling exposure of tomatoes during subsequent ripening. J. Food Sci. 53, 1160–1162.

Chiabrando, V. y Giacalone, 2011. Shelf-life extension of highbush blueberry using 1-methylcyclorpopene stored under air and controlled atmosphere. Food chemistry, 126, 1812-1816.

Choi, S., P. Tsouvaltzis, C. Lim y D.J. Hubert. 2008. Suppression of ripening and induction of asynchronous ripening in tomato and avocado fruits subjected to complete or partial exposure to aqueous solutions of 1-methylcyclopropene. Postharv. Biol. Technol. 48, 206-214.

Contreras, J.; Gamba H.; Fischer. G. 2007. Características fisicoquímicas y organolépticas de frutos de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav) a dos temperaturas de almacenamiento y tipos de cera. Ciencia y Agricultura. 5(2):39-49.

Dong, L., Lurie, S., & Zhou, H.W. 2002. Effect of 1-methylcyclopropene on ripening of 'Canino' apricots and 'Royal Zee' plums. Postharvest Biology Technology, 24, 135e145.

Fischer, G. y O. Martínez 1999. Calidad y madurez de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en relación con la coloración del fruto, Agron Colomb, 16(1-3), 35-37.

Fischer, G., A. Herrera y P.J. Almanza. 2011. Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) En: Yahia, E.M. (ed.). Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits. Acai to citrus. Cambridge: Woodhead Publishing.

Fischer, G., P. Lüdders y F. Torres. 1997. Influencia de la separación del cáliz de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) sobre el desarrollo del fruto, Revista Comalfi 24(1-2), 3-16.

Fischer, G., P.J. Almanza-Merchán y D. Miranda. 2014. Importancia y cultivo de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). Rev. Bras. Frutic. 36(1), 1-15.

Fischer, G.; Ebert, G. y Lüdders P. Provitamin A carotenoids, organic acids and ascorbic acid content of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) ecotypes grown at two tropical altitudes, Acta Hort , 2000. Vol. 531, 263-267.

Galvis, J.A., Fischer G. y Gordillo O. 2005. Cosecha y poscosecha de la uchuva. pp. 165-190. En: Fischer G., D. Miranda, W. Piedrahita y J. Romero (ed.). Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en Colombia, Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

García, H.R., A. C. Peña y C. García. 2008. Manual de práctica de cosecha y acondicionamiento de la uchuva con fines de exportación, Corpoica, Bogotá.

García, M.C., A.C. Peña y B. Brito. 2014. Desarrollo tecnológico para el fortalecimiento del manejo poscosecha de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). pp. 80-112. En: Carvalho, C.P. y D.A. Moreno (eds.). Physalis peruviana: fruta andina para el mundo.

Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo-CYTED, Limencop SL, Alicante, España.

Getinet H, Seyoum T, Woldetsadik K. 2008. Effect of cultivar, maturity stage and storage environment on quality of tomatoes. J. Food Eng. 87, 467-478.

Gutiérrez, M.S., G.D. Trinchero, A.M. Cerri, F. Vilella y G.O. Sozzi. 2008. Different responses of goldenberry fruit treated at four maturity stages with the ethylene antagonist 1-methylcyclopropene. Postharvest Biol. Technol. 48, 199–205.

Hernández, M. S., J. Barrera, O. Martínez, J.P. Fernández-Trujillo. 2011. Postharvest quality of arazá fruit during low temperature storage. LWT-Food Science and Technology, 42, 879-884.

Hernández-Muñoz, P., Almenar, E., Del Valle, V., Velez, D. y Gavara, R. 2008. Effect of chitosan coating combined with postharvest calcium treatment on strawberry (*Fragaria x ananassa*) quality during refrigerated storage. Food Chem. 110:428-435.

Hobson, G.E., 1987. Low-temperature injury and the storage of ripening tomatoes. J. hortic. Sci. 62, 55–62.

Itai, A. y T. Tanahashi. 2008. Inhibition of sucrose loss during cold storage in Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai) by 1-MCP. Postharvest Biology and Technology 48, 355–363.

Javanmardi, J. y C. Kubota. 2006. Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest storage. Postharvest Biology and Technology 41, 151–155.

Jiang, Y., D. Joyce, W. Jiang y W. Lu. 2004. Effects of chilling temperatures on ethylene binding by banana fruit. Plant Growth Regulation 43, 109–115.

Jiang, Y.M., Li, Y.B., Li, J.R., 2003. Effects of low temperature acclimation on browning of litchi fruit in relation to shelf life. J. Hortic. Sci. Biotechnol. 78, 437–440.

Kader, A.A., 2008. Flavor quality of fruits and vegetables. J. Sci. Food Agric. 88, 1863–1868.

Kader, A.A., Arpaia, M.L., 2002. Postharvest handling systems: subtropical fruits. In: Kader, A.A. (Ed.), Postharvest Technology of Horticultural Crops; Third edition, publication number 3311. Regents of the University of California, Division of Agricultural and Natural Resources, Oakland, CA, pp. 375–384.

Kays, S. 2004. Postharvest biology. Exon Press (Athens, Georgia). 568 p.

Kitagawa, H. y P.G. Glucina. 1984. Persimmon Culture in New Zealand. Science Information Publishing Center, Wellington, New Zealand.

Lancheros O., G. Velandia, G. Fischer, N. Varela y H. García. 2007. Comportamiento de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en poscosecha bajo condiciones de atmosfera modificada activa. Rev. Corpoica Ciencia Tecnol. Agropec. 8(1), 61-68.

Landwehr, T. y F. Torres. 1995. Manejo poscosecha de frutas. Instituto Universitario Juan de Castellanos. Editorial Jotamar, Tunja. 233 p.

Ligarreto, G., M. Lobo y A. Correa. 2005. Recursos genéticos del genero Physalis en Colombia. pp. 9-27. En: Fischer G., D. Miranda, W. Piedrahita y J. Romero (ed.). Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en Colombia, Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Liu H, Song LL, You YL, Li YB, Duan XW, Jiang YM, Joyce DC, Muhammad A, Lu WJ. 2011. Cold storage duration affects litchi fruit quality, membrane permeability,

enzyme activities and energy charge during shelf time at ambient temperature. Postharvest Biol Technol, 60, 24–30

Majumder, K. y B. Mazumdar. 2002. Changes of pectic substances in developing fruits of cape-gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in relation to the enzyme activity and evolution of ethylene. Sc. Hortic. 96, 91-101.

Mao, L., G. Wang y F. Que. 2007. Application of 1-methylcyclopropene prior to cutting reduces wound responses and maintains quality in cut kiwifruit. Journal of Food Engineering, 78(1), 361–365.

Martínez- Jávega J.M. 1997. La frigoconservación en naranjas y mandarinas. Rev. Phytoma. 90: 136-140.

Maul, E., Sargent, S.A., Sims, C.A., Baldwin, E.A., Balaban, M.O., Huber, D.J., 2000. Tomato flavor and aroma quality as affected by storage temperature. J. Food Sci. 65, 1228–1237.

Mir, N.A., Curell, E., Khan, N., Whitaker, M., Beaudry, R.M., 2001. Harvest maturity, storage temperature, and 1-MCP application frequency alter firmness retention and chlorophyll fluorescence of 'Redchief Delicious' apples. J. Am. Soc. Hort. Sci. 126, 618–624.

Narváez-Cuenca, C.E., A. Mateus-Gómez y L.P. Restrepo-Sánchez. 2014. Antioxidant capacity and total phenolic content of air-dried cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) at different ripeness stages. Agronomía Colombiana 32(2), 232-237.

Nishiyama, K.; Guis, M.; Rose, J.K.C.; Kubo, Y.; Bennett, K.A.; Wangjin, L.; Kato, K.; Ushijima, K.; Nakano, R.; Inaba, A.; Bouzayen, M.; Latche, A.; Pech, J.C.; Bennett, A. Ethylene regulation of fruit softening and cell wall disassembly in Charentais melon, J. Exp. Bot. 58 1281–1290. 2007.

Novoa R., M. Bojacá, A. Galvis y G. Fischer. 2006. La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12°C (*Physalis peruviana* L.). Agron. Colomb. 24 (1), 77-86.

Obenland, D., Collin, S., Mackey, B., Sievert, J., Arpaia, M.L., 2011. Storage temperature and time influence sensory quality of mandarins by altering soluble solids, acidity and aroma volatile composition. Postharvest Biol. Technol. 59, 187–193.

Osterloh, A., G. Ebert, W.H. Held, H. Schulz y E. Urban. 1996. Lagerung von Obst und Südfrüchten. Verlag Ulmer, Stuttgart. 253 p.

Paliyath, G., D. P. Murr, A.K. Handa y Susan Lurie. 2008. Postharvest Biology and Technology of Fruits, Vegetables, and Flowers, Wiley-Blackwell Publishing. New Delhi, India. 1 edition, 496 p.

Pantástico, E.R. 1981. Fisiología de post-recolección. Vol. 1. Ed. Limusa S.A., México. pp. 812-815.

Parra-Coronado, A., Hernández- Hernández, J., Camacho-Tamayo, J. 2008. Estudio fisiológico poscosecha y evaluación de la calidad de la ciruela variedad Horvin (*Prunus domestica* L.) bajo tres condiciones de almacenamiento refrigerado. Revista Ingeniería e Investigación, 28 (1), 99-104.

Paull, R. 1999. Effect of temperature and relative humidity on fresh commodity quality, Postharvest Biology and Technology 15, 263–277.

Pech, J.C.; Bouzayen M.; Latché. A. 2008. Climateric fruit ripening: Ethylene-dependent and independent regulation of ripening pathways in melon fruit. Plant science, 175, 114-120.

Pereira D., Rodrigues, M., Da Costa, J., Pires, R., y Bruckner, Horst, C. 2013. Cold storage of peaches cv. Aurora grown in the Zona da Mata Mineira, Minas Gerais State, Brazil. Revista Ceres, 60(6), 833-841.

Rodrigo, M.J., y Zacarias, L. (2007). Effect of postharvest ethylene treatment on carotenoid accumulation and the expression of carotenoid biosynthesis genes in the flavedo of orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) fruit. Postharvest Biol. Technol. 43, 14–22.

Rodríguez, M., H. Arjona, J. Galvis. 2006. Maduración del fruto de feijoa (*Acca sellowiana* Berg) en los clones 41 (Quimba) y 8-4 a temperatura ambiente en condiciones de Bogotá. Agronomía Colombiana. 24(1),68-76.

Rugkong, A., R. McQuinnc, J.J. Giovannoni, J.K.C. Rosee y C.B. Watkins. 2011. Expression of ripening-related genes in cold-stored tomato fruit. Postharvest Biology and Technology 61, 1-14.

Sala, J. M. 1998. Involvement of oxidative stress in chilling injury in cold-stored mandarin fruits. Postharvest Biology and Technology, 13, 255–261.

Serek, M., E.J. Woltering, E.C. Sisler, S. Frello y S. Sriskandarajah. 2006. Controlling ethylene responses in flowers at the receptor level. Biotechnol. Adv. 24, 368-381.

Singh, S. y R. Pal. 2008. Response of climacteric-type guava (*Psidium guajava* L.) to postharvest treatment with 1-MCP. Postharv. Biol. Technol. 47(3), 307-314.Marin, A., Colonna, A., Kudo, K., Kupferman, E. y Mattheis, J. (2009). Measuring consumer response to “Gala” apples treated with 1-methylcyclopropene (1-MCP). Postharvest Biol. Technol. 51, 73-79.

Sivakumar, D., Y. Jiang, E.M. Yahia. 2011. Maintaining mango (*Mangifera indica* L.) fruit quality during the export chain. Food Research International 44,1254–1263.

Su, H. y D. Gubler. 2012. Effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on reducing postharvest decay in tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). Postharvest Biology and Technology 64(1), 133–137.

Sun, B., H. Yan, N. Liu, J. Wei y Q. Wang. 2012. Effect of 1-MCP treatment on postharvest quality characters, antioxidants and glucosinolates of chinese kale. Food Chem. 131(2), 519-526.

Superfruit. 2011. Uchuva - the superfruit. En: http://www.uchuvasuperfruit.com; consulta: 13 de agosto de 2011.

Taiz, L. y E. Zeiger. 2006. Plant physiology, 4a ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA.

Téllez, C.P., Fischer, G. y Quintero, O. 2007. Comportamiento fisiológico y fisicoquímico de frutos de curuba (*Passiflora mollissima* Bailey) encerados y almacenados a dos temperaturas. Rev. Colomb. Cienc. Hortic. 1(1),67-80.

Téllez, C.P.; G. Fischer y O. Quintero. 1999. Comportamiento fisiológico y físico-químico en la poscosecha de curuba de Castilla (*Passiflora mollissima* Bailey) conservada en refrigeración y temperatura ambiente. Agron. Colomb.16(1-3), 13-18.

Tietel, Z., E. Lewinsohn, E. Fallik y R. Porat. 2012. Importance of storage temperatures in maintaining flavor and quality of mandarins, Postharvest Biology and Technology 64, 175–182.

Trinchero, G., Sozzi, G., Cerri, A.M., Vilella, F., Fraschina, A., 1999. Ripening-related changes in ethylene production, respiration rate and cell-wall enzyme activity in

goldenberry (*Physalis peruviana* L.), a solanaceous species. Postharvest Biol. Technol. 16, 139–145

Valdenegro, M., L. Fuentes, R. Herrera y M.A. Moya-León. 2012. Changes in antioxidant capacity during development and ripening of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit and in response to 1-methylcyclopropene treatment. Postharv. Biol. Technol. 67,110-117.

Villalobos, M., W. Biasi, E. Mitcham y D. Holcroft. 2011. Fruit temperature and ethylene modulate 1-MCP response in Bartlett pears. Postharv. Biol. Technol. 60, 17-23.

Watkins, C. 2006. The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables, Biotechnol. Adv. 24, 389-409.

Zhang, Z., D.J. Huber, B.M. Hurr y J. Rao. 2009. Delay of tomato fruit ripening in response to 1-methylcyclopropene is influenced by internal ethylene levels. Postharvest Biol. Technol. 54, 1-8.

Zhang, Z., S. Tian, Z. Zhu, Y.Xu y Q. Guozheng. 2012. Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on ripening and resistance of jujube (*Zizyphus jujuba* cv. Huping) fruit against postharvest disease. LWT - Food Science and Technology 45,13-19.

Zheng, Y. H., Raymond, W. M. F., Wang, S. Y., y C.Y. Wang. 2008. Transcript levels of antioxidative genes and oxygen radical scavenging enzyme activities in chilled zucchini squash in response to super atmospheric oxygen. Postharvest Biology and Technology, 47, 151–1

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Durante el desarrollo del fruto de uchuva los compuestos volátiles varían en composición y en concentración relativa, es así, que en los primeros estados de desarrollo predominan compuestos principalmente terpenoides, muchos de los cuales van disminuyendo durante la maduración, por el contrario, los esteres se caracterizaron por incrementar en número y concentración en función del desarrollo del fruto.

El comportamiento poscosecha de los frutos de uchuva está estrechamente relacionado con el estado de madurez en el momento de la cosecha. Los frutos cosechados en grado de madurez E4 (fruto 100% naranja y cáliz seco de color café) presentaron mayores valores en la producción de etileno, pérdida de peso, índice de color, sólidos solubles y relación de madurez, estos mismos frutos tuvieron los valores más bajos en firmeza y acidez total titulable. Frutos cosechados en E1 (fruto 25% amarillo, 75% verde y cáliz verde), tuvieron menores valores de producción de etileno, índice de color, sólidos solubles totales y relación de madurez, mayor acidez total titulable, pero la pérdida de peso y la firmeza fue similar a los frutos de E4. Estos frutos presentaron alta pérdida de peso con pobre desarrollo del color y de la madurez interna, no es un grado de madurez recomendable para realizar la cosecha y posteriormente almacenar los frutos a temperatura ambiente. Se recomienda cosechar los frutos en E2 (fruto 50% amarillo, 50% naranja y cáliz verde amarillento) porque tienen un mejor comportamiento poscosecha y pueden conservar la calidad por más tiempo. Se recomienda cosechar en E3 y E4 cuando el consumo es inmediato o en corto tiempo.

La presencia del cáliz en los frutos de uchuva garantiza un mejor comportamiento poscosecha. El cáliz disminuyó significativamente la producción de etileno en comparación con frutos sin cáliz, como consecuencia, la pérdida de peso, de firmeza y de acidez total titulable fue menor. En frutos con cáliz, el cambio de color fue más lento al igual que la acumulación de sólidos solubles totales y la relación de madurez.

Los resultados indican que compuestos como octanoato de etilo, butanoato de etilo, butanoato de 2-metilpropilo, butanoato de butilo, octanoato de metilo, decanoato de etilo y dodecanoato de etilo al parecer están regulados por etileno durante la maduración del fruto de uchuva, los resultados indicaron que estos esteres incrementaron su concentración relativa en presencia de etileno y se inhibieron parcialmente con la aplicación de 1-metilciclopropeno. Esto se convierte en una primera aproximación en la que varios compuestos volátiles del fruto de uchuva pueden ser asociados con la presencia de etileno.

La aplicación de 1-MCP en frutos de uchuva generó disminución de la tasa respiratoria, índice de color de la epidermis, carotenoides totales, pérdida de firmeza y acidez total titulable, sólidos solubles totales y compuestos volátiles, y se convierte en un retardante de madurez eficiente para la conservación de frutos de uchuva. Además, estos resultados plantean evidencias de que el etileno está involucrado en el proceso de maduración de los frutos de uchuva.

El tratamiento con 1-MCP produjo efectos opuestos al etileno en los frutos de uchuva. La aplicación de 1-MCP induce una disminución y/o inhibición de los parámetros relacionados con la síntesis y percepción de etileno, lo cual proporciona evidencia adicional de que la regulación de procesos fisiológicos y bioquímicos como el cambio de color, la pérdida de firmeza, la emisión de esteres volátiles, la actividad ACO y HK, son procesos que depende de la producción de etileno. Los estudios de cinética enzimática y química teórica permiten dar una aproximación de que el 1-MCP no actúa solo a nivel de receptor, sino que también puede inhibir competitivamente la síntesis de etileno.

La aplicación de 3 µL L^{-1} de 1-MCP durante 24 h retrasa el proceso de maduración de los frutos de uchuva, lo cual se evidenció en una menor producción de etileno, menor concentración interna de etileno, menor pérdida de firmeza, de peso y de acidez. Con este tratamiento también se retrasó el índice de color, el aumento en los sólidos solubles totales y la relación de madurez. La concentración interna de etileno encontrada en los frutos de uchuva es alta, lo cual disminuye la eficiencia del 1-MCP.

Durante los 35 días de almacenamiento, la refrigeración a 2°C con aplicación de 1-MCP fue la mejor alternativa de conservación de los frutos de uchuva con cáliz y sin cáliz. Con este tratamiento los frutos de uchuva presentaron menor tasa respiratoria, menor pérdida de firmeza, de peso y de acidez total titulable, menor aumento de los sólidos solubles totales, de carotenoides totales y del índice de color.

En la fase de vida de anaquel o de shelf-life, se presentó un cambio drástico en el metabolismo de los frutos de uchuva que se evidenció por un aumento considerable de la tasa respiratoria y la pérdida de peso, principalmente en aquellos que fueron almacenados a 2°C. Se observó disminución de la acidez total titulable y de la firmeza, y hubo un aumento en el índice de color, en los carotenoides y en la relación de madurez. La incidencia de patógenos fue considerablemente alta, en especial con el almacenamiento a 2°C, lo cual puede ser un síntoma de daños por frío. Los frutos con cáliz presentaron un mejor comportamiento en este periodo. Para los frutos sin cáliz es más conveniente almacenar a 6°C con 1-MCP previo al shelf-life, mientras que los frutos con cáliz pueden almacenarse a 2°C con aplicación de 1-MCP.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios de genómica, transcriptómica y metabolómica que permitan verificar el comportamiento climatérico del fruto de uchuva.

Es importante enfocar estudios hacia la evaluación de la actividad de enzimas y expresión de genes *ACS* y *ACO* durante la maduración de frutos de uchuva, con el fin de conocer la dinámica de producción de etileno. Lo anterior debido a que los frutos de uchuva son climatéricos pero deben cosecharse en madurez de consumo.

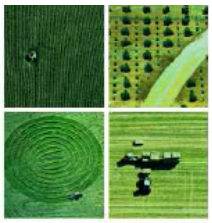
Se recomienda complementar el estudio de los estados de madurez con mediciones de emisión de compuestos volátiles y análisis sensorial Asimismo, el estudio se puede complementar con diferentes temperaturas de almacenamiento y con la presencia o no de cáliz.

En el estudio del efecto del cáliz, es importante complementar los resultados con mediciones de compuestos volátiles, debido a que la composición de volátiles en el cáliz es muy distinta a la del fruto y le puede estar dando ciertas características de protección contra plagas y enfermedades.

La refrigeración es una excelente alternativa para prolongar la vida útil del fruto de uchuva, sin embargo, es importante evaluar el sistema antioxidante del fruto, la composición de ácidos grasos y la emisión de compuestos volátiles bajo diferentes temperaturas de refrigeración, pues aunque no se observaron síntomas visibles de daños por frío a 2°C, en el periodo de shelf-life los frutos perdieron su calidad rápidamente, por tanto, es importante conocer el comportamiento bioquímico del fruto en refrigeración para optimizar el proceso.

Es importante realizar estudios que permitan la evaluación de diferentes métodos de desinfección del fruto diferentes del hipoclorito de sodio, preferiblemente métodos que no involucren humedecimiento del fruto.

A. Anexo: Resumen de ponencia 1 realizada en congreso internacional



INNOVAR y PRODUCIR para el FUTURO

SEAgIng SECH

VII CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERIA Y CIENCIAS HORTICOLAS

Madrid, 26-29 Agosto 2013

C0525

Efecto del etileno y el 1-metilciclopropeno en la emisión de compuestos volátiles durante la poscosecha de frutos de uchuva

Helber Enrique Balaguera López[1], Anibal Herrera Arévalo[2], Mauricio Espinal Ruiz[3], Laura Victoria Ramírez[4]

[1]UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA BOGOTÁ D.C BOGOTÁ D.C, [2]UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA BOGOTÁ D.C BOGOTÁ D.C, [3]UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA BOGOTÁ D.C BOGOTÁ D.C, [4]UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA BOGOTÁ D.C BOGOTÁ D.C

Los frutos de uchuva (Physalis peruviana L., familia solanaceae)son bayas con comportamiento climatérico, altamente perecederos. Durante la maduración del fruto de uchuva, los esteres son los compuestos volátiles emitidos en mayor cantidad. Sin embargo, se desconoce el efecto que pueda tener el etileno y el 1-metilciclopropeno como reguladores de la maduración, sobre la emisión de esteres volátiles en uchuva. En muchos frutos se ha encontrado que el etileno estimula la producción de esteres, mientras que el 1-metilciclopropeno inhibe la biosíntesis de estos compuestos, lo cual, puede afectar la calidad del fruto. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de etileno y 1-metilciclopropeno sobre la emisión de esteres volátiles durante el almacenamiento a temperatura ambiente de frutos de uchuva.

Los frutos de uchuva ecotipo Colombia fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá, Colombia. Se utilizó un diseño completamente al azar con 3 tratamientos, estos fueron: etileno (100 mg L-1), 1-metilciclopropeno (1-MCP; 10 mg L-1) y un testigo sin aplicación. La exposición de los frutos al tratamiento de etileno tuvo una duración de 48 h, mientras que el tratamiento de 1-MCP fue de 24 h. Después de los tratamientos, todos los frutos fueron empacados en termoformados de polietilentereftalato (PET) y fueron dejados a temperatura ambiente (20°C, 75% HR). Se hicieron mediciones de compuestos volátiles a los 1, 6 y 11 días después de cosecha. Se realizó la extracción de compuestos volátiles mediante microextracción en fase sólida con espacio de cabeza HS-SPME, para la identificación de compuestos volátiles se utilizó un espectrómetro de masas 5975C acoplado al cromatógrafo de gases, los espectros obtenidos fueron comparados con aquellos de las bibliotecas del sistema de datos NIST 8. El índice de Kovats se calculó usando la serie homóloga de n-alcanos bajo las mismas condiciones de operación.

Se encontró que algunos esteres como Octanoato de etilo, Butanoato de etilo, Butanoato de 2-metilpropilo, Butanoato de butilo, Octanoato de metilo, Decanoato de etilo y Dodecanoato de etilo al parecer están regulados por etileno durante la maduración del fruto de uchuva, los resultados indicaron que estos compuestos incrementaron su concentración relativa en presencia de etileno y se inhibieron parcialmente con la aplicación de 1-metilciclopropeno. Los resultados sugieren que la emisión de algunos compuestos volátiles del fruto de uchuva pueden estar determinados por la presencia de etileno.

Effect of Ethylene and 1-methylcyclopropene on the emission of volatile compounds during post-harvest of cape gooseberry fruits

B. Anexo: Resumen de ponencia 2 realizada en congreso internacional

INNOVAR y PRODUCIR para el FUTURO
SEAgIng SECH
VII CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERIA Y CIENCIAS HORTÍCOLAS
Madrid, 26-29 Agosto 2013

C0468

Emisión de compuestos volátiles durante el desarrollo del fruto de uchuva (Physalis peruviana L.)

Anibal Herrera Arevalo[1], Helber Enrique Balaguera López[2], Laura Victoria Ramírez[3], Mauricio Espinal Ruiz[4]
[1]UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA BOGOTÁ D.C. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, BOGOTÁ, [2]UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA BOGOTÁ D.C. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, BOGOTÁ, [3]UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA BOGOTÁ D.C. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, BOGOTÁ, [4]UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA BOGOTÁ D.C. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, BOGOTÁ

La uchuva es una especie perteneciente a la familia Solanaceae, el fruto es una baya considerada como "superfruto" por sus propiedades funcionales y medicinales, además de su sabor. Es un fruto climatérico altamente perecedero que durante la maduración cambia de color verde a naranja, se han realizado varios estudios para conocer parte del comportamiento fisicoquímico y fisiológico del fruto, y aunque existen reportes de los compuestos volátiles que aportan al aroma en la madurez de consumo, se desconoce el comportamiento de la emisión de compuestos volátiles durante el desarrollo del fruto. El objetivo de esta investigación fue identificar los principales compuestos volátiles emitidos por los frutos de uchuva en seis estados de desarrollo.

Los frutos de uchuva ecotipo Colombia fueron cosechados en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá. Al día siguiente de haber sido cosechados los frutos, se les retiró cuidadosamente el cáliz para luego ser separados en seis estados de desarrollo con base en el color de la epidermis y el peso fresco, de tal manera que estos seis estados abarcaran las diferentes etapas de desarrollo del fruto. Se realizó la caracterización fisicoquímica de cada estado de desarrollo y luego se realizó la extracción e identificación de compuestos volátiles. La extracción de compuestos volátiles se hizo mediante microextracción en fase sólida con espacio de cabeza HS-SPME, para la identificación de dichos volátiles se utilizó un espectrómetro de masas 5975C acoplado al cromatógrafo de gases, los espectros obtenidos fueron comparados con aquellos de las bibliotecas de sistema de datos NIST 8. El índice de Kovats se calculó para todos los compuestos usando la serie homóloga de n-alcanos bajo las mismas condiciones de operación.

Los resultados indican que los compuestos volátiles de los frutos de uchuva varían durante las diferentes etapas de desarrollo del fruto tanto en composición como en concentració. En los primeros estados de desarrollo predominan compuestos terpenoides, muchos de los cuales van disminuyendo durante la maduración y algunos desaparecen por completo, mientras que los esteres se caracterizaron por incrementar en número y concentración en función del desarrollo del fruto.

C. Anexo: Resumen de ponencia 3 realizada en congreso internacional

Regulación de respuestas fisiológicas del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) bajo la aplicación poscosecha de etileno y 1-metilciclopropeno

H. Balaguera López[1], M. Espinal Ruiz[2], J. M. Rodríguez[2], L. P. Restrepo[2] y A. Herrera[1]

[1]Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. [2]Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Email: hebalagueral@unal.edu.co

El fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) perteneciente a la familia de las Solanaceae, es una pequeña baya altamente perecedera con patrón respiratorio climatérico. Son pocos los estudios que reportan que en esta especie el etileno regula la maduración y que el 1-metilciclopropeno (1-MCP) la inhibe. Los resultados obtenidos hasta el momento son controvertidos y no se cuenta con información suficiente para utilizar el 1-MCP como retardante de madurez del fruto de uchuva. El objetivo de esta investigación fue estudiar la regulación de algunas respuestas fisiológicas del fruto de uchuva a la aplicación poscosecha de etileno y 1-MCP. Los frutos de uchuva, ecotipo Colombia, se cosecharon en un cultivo comercial en el municipio de Ventaquemada Boyacá, Colombia. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 3 tratamientos, que fueron: etileno (etefón 1000 µl l^{-1}), 1-MCP (1 µl l^{-1}), y un control sin aplicación. Después de los tratamientos, todos los frutos se mantuvieron a temperatura ambiente (20°C, 75% HR). Se hicieron mediciones de algunos parámetros fisicoquímicos a los 1, 6 y 11 días después del tratamiento. Se determinó *in vitro* la actividad y la cinética de la enzima ACC oxidasa (E.C. 1.14.17.4) y de la histidina kinasa (E.C. 2.7.13.3). Los resultados indican que la aplicación de etileno estimuló la emisión de esteres volátiles, el índice de color, la pérdida de firmeza, la actividad ACC oxidasa e histidina kinasa. Por su parte, el 1-MCP retrasó los procesos anteriormente mencionados. Por tanto, el 1-MCP puede retrasar el proceso de maduración en los frutos de uchuva mediante la inhibición de la biosíntesis y de la acción del etileno. Los resultados sugieren que algunos procesos de la maduración del fruto de uchuva pueden estar asociados con la presencia de etileno y que estos pueden ser inhibidos por 1-MCP.

D. Anexo: Resumen de ponencia 4 realizada en congreso internacional

Effect of ethylene and 1-methylcyclopropene on the postharvest behavior of fruits of cape gooseberry (Physalis peruviana L.)

H. Balaguera-López, L. Ramírez, M. Espinal y A. Herrera

The fruits of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L., family Solanaceae) berries with climacteric behavior are highly perishable. The aim of this study was to evaluate the effect of the application of ethylene and 1-methylcyclopropene on the postharvest behavior of gooseberry fruit. The ecotype Colombia Cape gooseberry fruits were harvested in a commercial crop in the municipality of Ventaquemada Boyacá, Colombia. We used a completely randomized design with 4 treatments, these were: ethylene (1000 µL L^{-1}), 1-methylcyclopropene (1-MCP, 1 µL L^{-1}), 1 -MCP + ethylene and a control without application. After treatment, all the fruits were left at room temperature (20 ° C, 75% RH). Measurements were made of physicochemical parameters at 1, 6 and 11 days after harvest (DAH), the measurement of volatile compounds was performed at 7 DAH. It was found that the application of 1-MCP delayed fruit ripening gooseberry, as generated decreased in ethylene, respiratory rate, index of skin color, total carotenoids, loss of firmness and titratable acidity, total soluble solids and volatile compounds as ethyl octanoate, ethyl butanoate, ethyl decanoate, and hexhyl dodecanoate, meanwhile, the ethylene application accelerated these changes. The results suggest that some processes cape gooseberry fruit ripening may be associated with the presence of ethylene.

Key words: maturity retardant, respiratory rate, volatile esters.

29th international Horticultural Congress, 17-22 August, 2014. Brisbane Queensland, Australia.

E. Anexo: Resumen de capítulo de libro publicado

FISIOLOGÍA Y BIOQUÍMICA DEL FRUTO DE UCHUVA (*Physalis peruviana* L.) DURANTE LA MADURACIÓN Y POSCOSECHA

Helber Enrique Balaguera-López[4], Laura Victoria Ramírez Sanabria[5], Aníbal Herrera Arévalo[6]

RESUMEN

El fruto de uchuva es muy apetecido por su sabor y por sus propiedades funcionales y medicinales. Es considerado como un superfruto por su alto contenido de vitaminas, minerales y fibra. Es un fruto altamente perecedero con comportamiento climatérico que durante la maduración cambia de color verde a naranja, incrementa el contenido de azúcares solubles, principalmente sacarosa, su actividad antioxidante aumenta y se manifiesta el aroma característico del fruto compuesto principalmente por hidroxiésteres. Por el contrario, características como la firmeza y la acidez disminuyen, al igual que la concentración de almidón. Estos cambios conllevan a que el fruto de uchuva adquiera los atributos sensoriales y de calidad necesarios para garantizar su consumo. Considerando que la uchuva es un fruto altamente perecedero, es necesario conocer su comportamiento fisiológico y bioquímico durante la poscosecha, con la finalidad de emplearlo para la selección de las tecnologías de conservación más apropiadas. El objetivo de esta revisión fue presentar y discutir los principales resultados obtenidos de investigaciones realizadas, sobre los cambios fisiológicos, tales como patrón de respiración y producción de etileno y cambios bioquímicos relacionados con la reducción de firmeza, modificación de carbohidratos, modificación de pigmentos, actividad antioxidante y emisión de compuestos volátiles que experimenta el fruto de uchuva durante la poscosecha.

Palabras clave: Cambios fisicoquímicos, cambios fisiológicos, comportamiento climatérico, producción de etileno.