

Estrategias para modular los efectos de 1-MCP en peras Packham's Triumph: aplicación simultánea con etileno o con CO₂ y tratamientos con calor

CALVO, G. ¹; CANDAN, A.P.¹

RESUMEN

Se realizaron dos experimentos con el objetivo de evaluar la efectividad de diferentes estrategias para recuperar la capacidad de maduración de peras Packham's Triumph tratadas con 1-metilciclopropeno (1-MCP). Los resultados mostraron que una aplicación simultánea de 0.3 µl L⁻¹ 1-MCP con 0.15 o 0.3 µl L⁻¹ de etileno o con 5% de CO₂ permitió la maduración de los frutos después de 160 días de almacenamiento. Entre estos tratamientos, 0.3 µl L⁻¹ 1-MCP con 0.15 µl L⁻¹ de etileno logró un control absoluto de la escaldadura superficial incluso después de 210 días de almacenamiento. Cuando se aplicó 0.6 µl L⁻¹ de 1-MCP, las aplicaciones simultáneas con 0.6 µl L⁻¹ de etileno o con 5% CO₂ solo permitieron el ablandamiento de los frutos tras 230 días, manteniendo una muy baja incidencia de escaldadura superficial. La eficacia de los tratamientos con calor fue dependiente de su duración. Un calentamiento de 2 ó 3 semanas permitió el ablandamiento de los frutos tratados con 0.6 µl L⁻¹ 1-MCP y almacenados por 230 o 160 días respectivamente, mientras que 2 semanas fueron suficientes en frutos tratados con 0.3 µl L⁻¹ 1-MCP y almacenados por 210 días. Sin embargo, estos tratamientos mostraron una mayor incidencia de escaldadura superficial. Se concluye que la competencia por el sitio receptor mediante la aplicación simultánea de etileno o CO₂ es la estrategia más promisoriosa ya que permite modular los efectos del 1-MCP manteniendo una baja incidencia de escaldadura superficial en peras Packham's Triumph.

Palabras clave: almacenamiento frigorífico, madurez de consumo, escaldadura superficial.

ABSTRACT

Two experiments were conducted in order to evaluate the effectiveness of several approaches to restore ripening ability of 'Packham's Triumph' pears treated with 1-methylcyclopropene (1-MCP). Results showed that a simultaneous application of 0.3 µl L⁻¹ 1-MCP with 0.15 or 0.3 µl L⁻¹ ethylene or with 5% CO₂ allowed the fruit to ripen after 160 days of storage. Among these treatments, 0.3 µl L⁻¹ 1-MCP with 0.15 µl L⁻¹ ethylene absolutely controlled superficial scald even after 210 days of storage. When 0.6 µl L⁻¹ 1-MCP were applied, the simultaneous application with 0.6 µl L⁻¹ ethylene or with 5% CO₂ allowed the softening of the fruit only after 230 days, and also maintaining a very low incidence of superficial scald. The efficacy of the warming treatments was

¹Área Poscosecha, EEA Alto Valle, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). CC782, CP(8332), Gral. Roca, Río Negro, Argentina. E-mail: calvo.gabriela@inta.gob.ar; candan.ana@inta.gob.ar

dependent on the time that fruit were warmed. A warming of 2 or 3 weeks was needed to restore ripening in fruit treated with $0.6 \mu\text{L}^{-1}$ 1-MCP and stored for 230 or 160 days, respectively and 2 weeks was also effective in fruits treated with $0.3 \mu\text{L}^{-1}$ 1-MCP and stored for 210 days. However, these warming treatments developed the highest incidence of superficial scald. In conclusion, the competition for the binding sites by ethylene or CO_2 is the most promissory strategy since they modulate 1-MCP effects maintaining low incidence of superficial scald in 'Packhams Triumph' pears.

Keywords: cold storage, ripening, superficial scald.

INTRODUCCIÓN

Algunos cultivares europeos de pera (*Pyrus communis*), como Packham's Triumph, son altamente susceptibles a la escaldadura superficial. Por ello, se usan tratamientos pos-cosecha con difenilamina y etoxiquina, en forma comercial, para prevenir este importante desorden fisiológico de almacenamiento. Sin embargo, muchos países han prohibido el uso de esos antioxidantes, situación que lleva al desarrollo de métodos alternativos para controlar la escaldadura (Calvo y Kupferman, 2012).

La aplicación de 1-metilciclopropeno (1-MCP) luego de la cosecha reduce, en forma importante, el desarrollo de escaldadura superficial. Su efectividad fue asociada a la disminución en la síntesis de etileno de α -farnasenos y de trienos conjugados (Chen y Spotts, 2005). En las peras el tratamiento con 1-MCP mantiene la firmeza de la pulpa y el color verde (Mitcham *et al.*, 2001; Calvo, 2004; Ekman *et al.*, 2004). La dosis comercial que se aplica actualmente ($0.3 \mu\text{L}^{-1}$) controla efectivamente la escaldadura superficial pero puede inhibir la maduración normal de la fruta durante un período de comercialización razonable (Blankeship y Dole, 2003; Chen y Spotts, 2005). La firmeza y el color de la epidermis son los principales índices de maduración usados para caracterizar la madurez normal de las peras porque, a diferencia de las manzanas, estas solo alcanzan la calidad de consumo cuando se ablandan y amarillean (Ekman *et al.*, 2004).

Por lo tanto, lograr un balance entre los beneficios de almacenamiento y la eventual maduración de la fruta para su comercialización (Mitcham *et al.*, 2001; Villalobos Acuña *et al.*, 2011), es todavía un desafío. En las peras la recuperación de la sensibilidad al etileno depende en gran parte de la concentración de 1-MCP aplicada, del tiempo de almacenamiento y de la madurez de la fruta al momento del tratamiento (Calvo, 2004).

Diferentes estrategias han sido evaluadas con el objetivo de restablecer el proceso de maduración en peras tratadas con 1-MCP. La aplicación de etileno exógeno después del almacenamiento en frío no revirtió la inhibición causada por 1-MCP en peras (Mitcham *et al.*, 2001; Calvo, 2004). Sin embargo, la aplicación simultánea de 1-MCP con etileno en proporciones entre 1:0.5 a 1:2 po-

dría facilitar la restauración subsiguiente de la maduración, algo que podría atribuirse a la competencia de ambos compuestos por los sitios de unión del etileno (Manriquez y Defilippi, 2011; Cucci y Regiroli, 2011; Chiriboga *et al.*, 2011). En este sentido, la aplicación simultánea de 1-MCP y CO_2 también podría ser efectiva, ya que el CO_2 podría reducir la acción del etileno mediante la competencia por el sitio receptor (Burg y Burg, 1967; Gorny y Kader, 1997) o mediante efectos secundarios asociados a cambios en el pH (Sisler y Wood, 1988). Sin embargo, este enfoque no había sido analizado hasta este estudio. Finalmente, Bai *et al.* (2006) y Chiriboga *et al.* (2010) reportaron que el calentamiento de frutos a temperaturas entre 10 y 20 °C durante o luego del almacenamiento podría restaurar la capacidad de ablandamiento de varios cultivares de peras tratados con 1-MCP, atribuyéndose este efecto a la estimulación de la síntesis de nuevos receptores (Jiang *et al.*, 1999).

La presente investigación fue realizada con el objetivo de evaluar diferentes estrategias de modulación de los efectos del 1-MCP en peras Packham's Triumph para permitir la maduración de la fruta como así también el control de la escaldadura superficial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y tratamientos

Para el primer experimento se cosecharon peras Packham's Triumph de una chacra comercial. Las peras se cosecharon en estado preclimático el 10 de febrero de 2009 (firmeza: 64.1 N, sólidos solubles 11.3%, acidez titulable: 2.68 g L^{-1} , color 117.3 hue, degradación de almidón: 45.0%). Se clasificaron frutos de tamaño homogéneo y libres de defectos en 9 lotes que cada uno contenía 360 frutas. Fueron tratados con $0 \mu\text{L}^{-1}$ (control), $0.3 \mu\text{L}^{-1}$ 1-MCP, $0.6 \mu\text{L}^{-1}$ 1-MCP. Para modular los efectos de 1-MCP, se evaluaron las siguientes estrategias: aplicación simultánea de $0.3 \mu\text{L}^{-1}$ 1-MCP + $0.3 \mu\text{L}^{-1}$ etileno (0.3+0.3ET), $0.6 \mu\text{L}^{-1}$ 1-MCP + $0.6 \mu\text{L}^{-1}$ etileno (0.6+0.6ET), $0.6 \mu\text{L}^{-1}$ 1-MCP + 5% v/v CO_2 (0.6+ CO_2) y tratamiento de calentamiento por dos semanas para $0.3 \mu\text{L}^{-1}$ 1-MCP fruto tratado (0.3+2S) o durante 2 y 3 semanas para $0.6 \mu\text{L}^{-1}$

1-MCP fruto tratado (0.6+2S y 0.6+3S, respectivamente). Los frutos fueron embalados en cajas de cartón para peras con bolsas (PEBD, 25 μm) y almacenados a $-0.5\text{ }^\circ\text{C}$ durante 160 y 230 días.

Para el segundo experimento se cosecharon peras Packham's Triumph de la misma chacra. Fueron cosechadas en estado preclimático el 23 de febrero de 2010 (firmeza: 60.8 N, sólidos solubles: 11.2%, acidez valorable: 2.28 g L^{-1} , 116.9 hue, degradación de almidón: 39.7%). Se clasificaron frutos de tamaño homogéneo y libres de defectos en 7 lotes conteniendo 360 frutos cada uno. Fueron tratados con 0 $\mu\text{L L}^{-1}$ (control) o 0.3 $\mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP y las estrategias ensayadas fueron las siguientes: aplicación simultánea de 0.3 $\mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP + 0.15 $\mu\text{L L}^{-1}$ etileno (0.3+0.15ET), 0.3 $\mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP + 5% v/v CO_2 (0.3+ CO_2) y tratamiento de calentamiento por 1, 2 o 3 semanas (0.3+1S, 0.3+2S y 0.3+3S, respectivamente). Los frutos fueron embalados en cajas de cartón para peras con bolsas (PEBD, 25 μm) y almacenados a $-0.5\text{ }^\circ\text{C}$ durante 150 y 210 días.

Tratamientos de 1-MCP

Las frutas fueron tratadas con 0.3 o 0.6 $\mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP en cámaras herméticas mediante el agregado de agua tibia al polvo SmartFresh[®] para la liberación del gas. Durante el tratamiento se encendieron los ventiladores colocados dentro de las cámaras para asegurar una distribución de gas rápida y homogénea. Los frutos fueron tratados por 24 horas durante el enfriamiento, luego se abrió la cámara y se aireó completamente.

Tratamientos de CH_4 y CO_2

Para las aplicaciones simultáneas con etileno, se tomó con una jeringa el volumen necesario de una mezcla gaseosa enriquecida (5% de CH_4 en aire) para obtener 0.6, 0.3 y 0.15 $\mu\text{L L}^{-1}$ de etileno en una cámara hermética. Ese volumen se inyectó en el momento de realizar el tratamiento con 1-MCP. Para obtener 5% de CO_2 v/v en una cámara hermética se utilizó una mezcla gaseosa enriquecida (99% de CO_2 en el aire), que fue directamente inyectada desde el tubo de gas equipado con un flujímetro.

Tratamientos con calor

Antes de cada fecha de evaluación se llevaron a cabo tratamientos de calor posalmacenamiento. Esto se realizó calentando la fruta en una cámara a $17\text{ }^\circ\text{C}$ durante 1, 2, ó 3 semanas (según el tratamiento), tras lo cual fueron devueltas a almacenamiento en frío por una semana más.

Análisis de la producción de etileno

La producción de etileno fue ($\text{nl g}^{-1} \text{h}^{-1}$) fue medida en 3 repeticiones de 1 fruta por tratamiento luego de cada período de almacenamiento y durante 14 días de vida en estante a $20\text{ }^\circ\text{C}$. Las frutas fueron colocadas en un fras-

co hermético de 1.5 L durante 30 minutos. Se evaluó una muestra de 1 ml de gas de espacio de cabeza a través de cromatografía gaseosa (GC-14A, Shimadzu, Japón), usando una columna de alúmina y un detector FID.

Determinación de la firmeza de la pulpa y del color de la epidermis

Se evaluaron la firmeza y el color en tres repeticiones de 20 frutos por tratamiento, inmediatamente después del almacenamiento y luego de 7 a 14 días de vida en estante a $20\text{ }^\circ\text{C}$. La firmeza (N) se midió en dos lados de cada fruta usando un presiómetro electrónico (FTA14, Güss, Sudáfrica) equipado con un émbolo de 8 mm. El color de la epidermis se midió con un colorímetro (CR400, Minolta, Japón) en dos lados opuestos de cada fruta y se expresó como ángulo hue donde $h^\circ < 102$ indica que las frutas estaban amarillas (Ekman *et al.*, 2004).

Determinación de la escaldadura superficial

Se midió visualmente el porcentaje de frutas con escaldadura superficial en tres repeticiones de 20 frutos por tratamiento, inmediatamente después de cada período de almacenamiento y luego de 7 y 14 días de vida en estante a $20\text{ }^\circ\text{C}$.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados por ANOVA y se sometieron a separación de medias por el test DGC (0.05) (Di Rienzo *et al.*, 2002) usando el software INFOSTAT/ Professional Version 2006p.1. En las cifras de producción de etileno se presentan los valores DMS según el test de Fisher (0.05).

RESULTADOS

Producción de etileno luego del almacenamiento

En ambos experimentos la producción de etileno en las frutas control fue detectada inmediatamente después de retiradas del almacenamiento en frío y alcanzaron su pico climatérico luego de 6 días (160 y 150 d de almacenamiento) y luego de 2 días (230 y 210 d de almacenamiento) de tiempo de conservación a $20\text{ }^\circ\text{C}$. Los tratamientos con 0.3 y 0.6 $\mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP inhibieron la producción de etileno hasta el final del período experimental, y no se detectaron diferencias entre las concentraciones aplicadas (figura 1 y 2).

La aplicación simultánea de 1-MCP y etileno permitió que se reanude la producción de etileno durante la vida en estante, dependiendo de las concentraciones aplicadas y del tiempo de almacenamiento. En el experimento 1 la fruta tratada con 0.3+0.3 ET presentó una alta producción de etileno al ser retirada de la cámara frigorífica y mostró un pico marcado de etileno luego de los dos períodos de almacenamiento. Esto sugiere que la aplicación simultánea a esta concentración restaura por completo la capacidad de la fru-

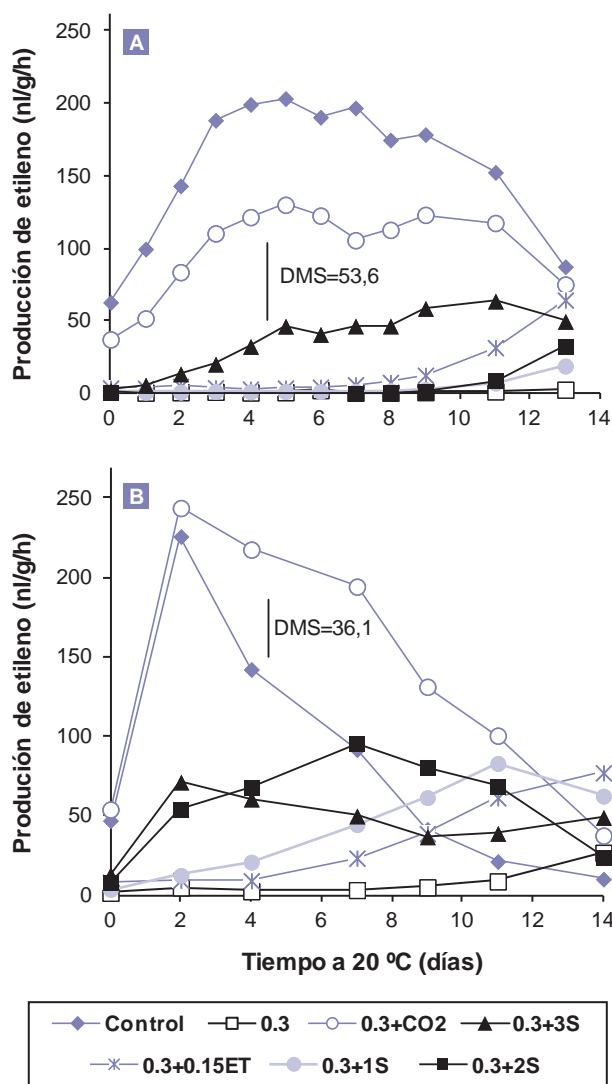
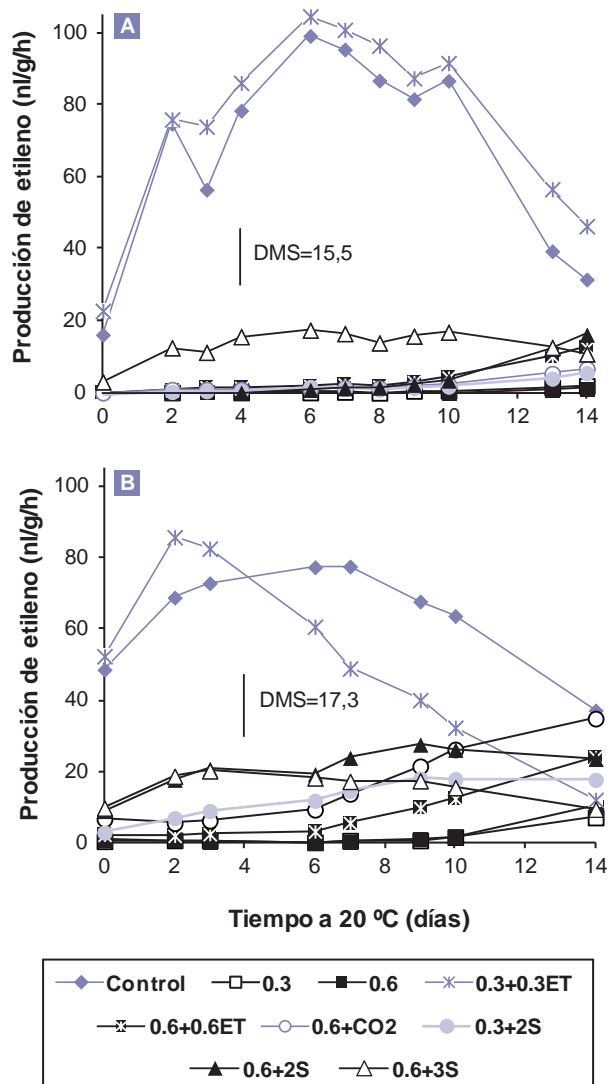


Figura 1. Producción de etileno en peras Packhams Triumph sin tratamiento (control), tratadas con 0.3 μL^{-1} o 0.6 μL^{-1} 1-MCP (0.3 y 0.6, respectivamente), tratadas con aplicación simultánea de 0.3 μL^{-1} 1-MCP + 0.3 μL^{-1} etileno (0.3+0.3ET), 0.6 μL^{-1} 1-MCP + 0.6 μL^{-1} etileno (0.6+0.6ET), 0.6 μL^{-1} 1-MCP + 5% v/v CO_2 (0.6+ CO_2) y tratamiento de calentamiento durante dos semanas por 0.3 μL^{-1} 1-MCP de fruta tratada (0.3+2S) o durante 2 ó 3 semanas por 0.6 μL^{-1} 1-MCP fruta tratada (0.6+2S y 0.6+3S, respectivamente). Las evaluaciones se realizaron durante 14 días de vida en estante a 20 °C luego de 160 (A) y 230 días (B) de almacenamiento en frío a -0.5 °C (experimento 1). DMS según el test de Fisher (0.05)

Figura 2. Producción de etileno en peras Packham's Triumph sin tratamiento (control), tratadas con 0.3 μL^{-1} 1-MCP (0.3), tratadas con aplicación simultánea de 0.3 μL^{-1} 1-MCP con 0.15 μL^{-1} etileno (0.3+0.15ET) o con 5% v/v CO_2 (0.3+ CO_2) y tratamientos con calor durante 1, 2 y 3 semanas (0.3+1S, 0.3+2S y 0.3+3S, respectivamente). Las evaluaciones se realizaron durante 14 días de vida en estante a 20 °C luego de 150 (A) y 210 días (B) de almacenamiento en frío a 0.5 °C (experimento 2). DMS según el test de Fisher (0.05)

ta de producir etileno. Por el contrario, 0.6+0.6 ET produjo un aumento de la producción de etileno en comparación con la fruta con tratamiento 0.6, pero esas diferencias no fueron significativas (figura 1). En el experimento 2 la fruta tratada con 0.3+0.15 ET aumentó la producción de etileno en comparación con los tratados con 0.3 μL^{-1} 1-MCP, pero no alcanzó el pico climatérico (figura 2).

el 5% de CO_2 restauró parcialmente la producción de etileno en fruta tratada con 0.6 μL^{-1} 1-MCP solo después de 230 días de almacenamiento (figura 1). Sin embargo, en el segundo experimento, cuando se aplicó 0.3 μL^{-1} 1-MCP, el tratamiento con 5% de CO_2 permitió una mayor recuperación de la producción de etileno, principalmente después de 210 días de almacenamiento en frío (figura 2).

La eficacia de la aplicación simultánea de 1-MCP y CO_2 dependió de la concentración de 1-MCP aplicada y de la duración del almacenamiento. En el primer experimento,

La eficacia de los tratamientos con calor dependió del tiempo de exposición a 17 °C y del tiempo de almacenamiento. En el experimento 1 la eficacia de un período de 3 semanas (0.6+3S) para aumentar la producción de etileno fue mayor que en el período de 2 semanas (0.6+2S

y 0.3+2S) (figura 1). Del mismo modo, en el experimento 2, la fruta almacenada por 150 días requirió 3 semanas a 17 °C para recuperar la capacidad de producir etileno, mientras que solo fueron necesarias 1 o 2 semanas cuando la fruta se almacenó por más tiempo (figura 2).

Maduración de las frutas luego del almacenamiento en frío

En peras, la firmeza óptima para alcanzar la textura y jugosidad deseadas para su consumo es 18-27 N (Bai *et al.*, 2006; Kappel *et al.*, 1995). De acuerdo con los resul-

tados presentados aquí, en ambos experimentos la fruta control se ablandó más allá de los valores recomendados para consumo luego de 7 días de vida en estante a 20 °C, tras ambos períodos de almacenamiento. Por el contrario, la fruta tratada con 0.3 y 0.6 $\mu\text{L L}^{-1}$ nunca alcanzó la calidad de consumo, ya que los valores de firmeza se mantuvieron por encima de 50 N, incluso luego de 14 días de vida en estante (tablas 1 y 2). En cierto modo, todas las estrategias evaluadas fueron eficaces para modular el efecto del tratamiento con 1-MCP en la firmeza, y el efecto fue mayor a medida que aumentó el tiempo de almacenamiento en frío (tablas 1 y 2).

Días a 20 °C	Tratamiento	160 días a -0,5 °C		230 días a -0,5 °C	
		Firmeza	Color	Firmeza	Color
		(N)	(hº)	(N)	(hº)
0	Control	58.9 b	108.8 b	35.8 c	99.6 c
	0.3 $\mu\text{L L}^{-1}$	63.1 b	112.0 a	57.9 a	109.4 a
	0.3+0.3ET	59.1 b	108.0 b	45.4 b	106.8 b
	0.3+2S	64.7 a	109.9 b	59.6 a	101.9 c
	0.6 $\mu\text{L L}^{-1}$	62.2 b	113.1 a	49.3 b	110.3 a
	0.6+0.6ET	58.7 b	110.8 b	63.0 a	109.3 a
	0.6+CO ₂	61.2 b	109.6 b	60.7 a	110.5 a
	0.6+2S	66.3 a	111.9 a	51.2 b	100.6 c
	0.6+3S	58.8 b	106.4 c	45.0 b	95.5 d
	<i>p Value</i>	0.0144	0.0002	<0.0001	<0.0001
7	Control	10.8 e	106.7 c	17.7 c	92.5 c
	0.3 $\mu\text{L L}^{-1}$	60.9 a	113.0 a	56.6 a	109.8 a
	0.3+0.3ET	12.2 e	103.1 d	20.5 c	100.7 b
	0.3+2S	50.4 c	106.9 c	30.0 b	98.7 b
	0.6 $\mu\text{L L}^{-1}$	63.2 a	112.6 a	64.0 a	109.8 a
	0.6+0.6ET	47.6 c	109.5 b	21.9 c	102.0 b
	0.6+CO ₂	57.3 b	111.0 b	35.9 b	106.7 a
	0.6+2S	52.6 c	107.2 c	26.1 b	98.6 b
	0.6+3S	36.0 d	99.2 e	15.3 c	92.7 c
	<i>P Value</i>	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
14	Control	7.3 d	95.4 d	15.2 b	86.7 c
	0.3 $\mu\text{L L}^{-1}$	63.7 a	109.3 a	58.4 a	102.8 a
	0.3+0.3ET	5.0 d	94.4 d	15.6 b	95.4 b
	0.3+2S	32.4 c	97.4 c	16.5 b	91.6 c
	0.6 $\mu\text{L L}^{-1}$	71.6 a	110.8 a	57.8 a	102.5 a
	0.6+0.6ET	27.1 c	99.9 c	9.6 b	96.2 b
	0.6+CO ₂	46.1 b	104.9 b	12.6 b	94.3 b
	0.6+2S	23.7 c	96.9 c	13.7 b	89.5 c
	0.6+3S	13.1 d	93.1 d	8.3 b	85.4 d
	<i>p Value</i>	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Tabla 1. Firmeza y color de la epidermis de las peras Packham's Triumph tratadas con diferentes estrategias para modular los efectos de 1-MCP (experimento 1). Las evaluaciones se realizaron después de un 160 y 230 días de almacenamiento a -0.5 °C y después de 0,7 y 14 días de vida en estante a 20 °C. Separación de medias DGC (0.05).

Días a 20 °C	Tratamiento	150 días a -0,5 °C		210 días a -0,5 °C	
		Firmeza	Color	Firmeza	Color
		(N)	(h°)	(N)	(h°)
0	Control	47.6 b	110.3 b	45.5 b	108.1 c
	0.3 µL L ⁻¹	54.4 a	115.6 a	51.7 a	113.9 a
	0.3+0.15ET	50.9 b	115.0 a	50.7 a	113.9 a
	0.3+CO ₂	51.4 b	112.0 b	46.7 b	108.2 c
	0.3+1S	55.2 a	112.0 b	51.3 a	110.6 b
	0.3+2S	58.0 a	111.1 b	44.4 b	102.4 d
	0.3+3S	49.5 b	106.0 c	22.0 c	93.9 e
	<i>p Value</i>	0.0220	0.0001	<0.0001	<0.0001
7	Control	8.0 d	102.9 b	7.6 c	102.5 b
	0.3 µL L ⁻¹	58.8 a	114.6 a	50.6 a	112.7 a
	0.3+0.15ET	42.5 b	112.8 a	37.0 b	110.5 a
	0.3+CO ₂	13.3 d	105.6 b	8.3 c	104.0 b
	0.3+1S	59.7 a	111.2 a	29.5 b	102.5 b
	0.3+2S	54.3 a	107.5 b	11.0 c	97.2 c
	0.3+3S	28.1 c	97.4 c	8.0 c	97.5 c
	<i>p Value</i>	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
14	Control	3.3 c	94.8 b		
	0.3 µL L ⁻¹	51.5 a	107.9 a		
	0.3+0.15ET	15.8 c	99.1 b		
	0.3+CO ₂	5.5 c	93.5 b		
	0.3+1S	39.7 a	101.3 b		
	0.3+2S	23.6 b	96.5 b		
	0.3+3S	12.3 c	94.3 b		
	<i>p Value</i>	<0.0001	0.0002		

Tabla 2. Firmeza y color de la epidermis de las peras Packham's Triumph tratadas con diferentes estrategias para modular los efectos de 1-MCP (experimento 2). Las evaluaciones se realizaron después de un 150 y 210 días de almacenamiento a -0,5 °C y después de 0, 7 y 14 días de vida en estante a 20 °C. Separación de medias DGC (0.05).

Al igual que lo observado para la producción de etileno, la eficacia de la aplicación simultánea con etileno dependió de la concentración usada de 1-MCP. En el primer experimento, el tratamiento 0.3+0.3 ET permitió una recuperación completa después de los dos períodos de almacenamiento, y las frutas alcanzaron valores de firmeza similares a los controles. Sin embargo, la fruta tratada con 0.6+0.6 ET requirió 14 o 7 días a 20 °C para llegar a la calidad de consumo después de 160 o 230 días de almacenamiento, respectivamente (tabla 1). En el segundo experimento, la fruta 0,3+0.15 ET se ablandó a una tasa menor que los controles y alcanzó una firmeza inferior a 18 N después de 150 días de almacenamiento seguidos de 14 días de vida en estante (tabla 2).

La aplicación simultánea con CO₂ permitió una recuperación del ablandamiento total en fruta tratada con 0.3 µL L⁻¹ 1-MCP (tabla 2), y parcial en fruta tratada con 0.6 µL L⁻¹ de 1-MCP, por lo que estas últimas solo alcanzaron una firmeza

adecuada tras un período de almacenamiento más largo (230 d) y 14 días de vida en estante (tabla 1).

El efecto de los tratamientos de calor sobre la capacidad de reestablecer la maduración de la fruta fue mayor cuanto mayor fue el período a 17 °C y el tiempo de almacenamiento en frío. En el primer experimento observamos que 3 semanas a 17 °C fueron efectivas para modular los efectos de 1-MCP después de 160 días de almacenamiento, mientras que 2 semanas a 17 °C fueron suficientes cuando el almacenamiento se extendió hasta 230 días, independientemente de la dosis de 1-MCP aplicada (tabla 1). En el segundo experimento, 3 semanas a 17 °C fue el único tratamiento de calentamiento efectivo que permitió el ablandamiento correcto dentro de los 7 días de vida útil después de 150 días de almacenamiento, mientras que 2 semanas a 17 °C fueron suficientes después de 210 días de almacenamiento (tabla 2).

Escaldadura superficial

En el primer ensayo la incidencia de escaldadura superficial en el control fue 27% y 100%, después de 160 y 230 días de almacenamiento + 7 días de vida en estante, respectivamente. En el segundo experimento, los porcentajes en fruta control fueron 0% y 56% de frutos afectados después de 150 y 210 días de almacenamiento seguido de 7 días de vida en estante (figura 3), lo que evidencia una menor susceptibilidad a escaldado en fruta de esta temporada. La aplicación de $0.3 \mu\text{L L}^{-1}$ y $0.6 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP redujo la incidencia de este desorden con un máximo de 8% de fruta afectada después de 230 días de almacenamiento + 7 días de vida en estante en el experimento 1 y una completa inhibición en el experimento 2.

Los tratamientos aplicados para restaurar la maduración del fruto mantuvieron una baja incidencia de escaldado (fi-

gura 3) cuando la fruta fue almacenada hasta 150 ó 160 días. Cuando el período de almacenamiento se extendió hasta 230 o 210 días, aumentó la incidencia de escaldado y algunos de los tratamientos que habían demostrado ser eficaces en la modulación de los efectos de 1-MCP sobre la firmeza presentaron una alta incidencia de escaldado.

La aplicación simultánea con etileno o con CO_2 redujo el escaldado superficial con respecto a los controles, siendo $0.6+0.6\text{ET}$, $0.6+5\%\text{CO}_2$ y $0.3+0.15\text{ET}$ los tratamientos más eficaces en los experimentos 1 y 2, respectivamente. Por una parte, los tratamientos con calor fueron menos eficaces en el control de escaldado superficial y el porcentaje de frutos afectados aumentó a medida que se extendió la exposición a 17°C . Por otra parte, estos tratamientos aumentaron la incidencia de esta fisiopatía en comparación con las frutas control en 2010 (figura 3).

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio muestran que el tratamiento con 1-MCP es muy eficaz en la reducción de la producción de etileno y en el retraso de la maduración en las peras Packham's Triumph, como ya fue observado en diversos cultivares de pera (Calvo, 2004; Ekman *et al.*, 2004; Calvo y Sozzi, 2004; Chen y Spotts, 2005). Como se esperaba, el tratamiento con 1-MCP inhibió la maduración normal de la fruta y mantuvo los valores de firmeza por arriba de 50 N, incluso después de 14 días de vida en estante.

Debido a que el 1-MCP compete con el etileno por los sitios de unión, su eficacia depende de la concentración aplicada hasta alcanzar la saturación de los receptores (Ekman *et al.*, 2004). Sin embargo, no se observaron diferencias entre 0.3 y 0.6 mL L^{-1} 1-MCP en este estudio, lo que sugiere que $0.3 \mu\text{L L}^{-1}$ puede ser suficiente para bloquear todos los receptores y reducir la producción de etileno en las peras Packham's Triumph.

Los resultados presentados aquí coinciden con observaciones previas ya que el 1-MCP redujo la incidencia de escaldadura superficial, pero impidió la maduración normal de los frutos durante todo el período evaluado en ambos experimentos, lo que demuestra la necesidad de adaptar esta tecnología para su uso comercial. Las estrategias competitivas de la aplicación de 1-MCP con etileno mostraron ser efectivas para restaurar la maduración de la pera luego de largos períodos de almacenamiento en frío, aunque la efectividad del tratamiento dependió en gran medida de las concentraciones usadas.

La aplicación simultánea de con etileno revirtió la inhibición de la maduración en fruta tratada con 0.3 mL L^{-1} de 1-MCP después de 160 días de almacenamiento y fue también efectivo para restablecer la maduración en la fruta tratada con 0.6 mL L^{-1} después de 230 días de almacenamiento. Esto sugiere que una aplicación simultánea de 1-MCP y etileno (relación 1:1) sería efectiva según la dosis aplicada de 1-MCP y el tiempo de almacenamiento. Cuando se aplicaron 0.3 mL L^{-1} de etileno a la fruta tratada con 0.3 mL L^{-1} 1-MCP, la restauración de la maduración fue completa. Pero cuando la

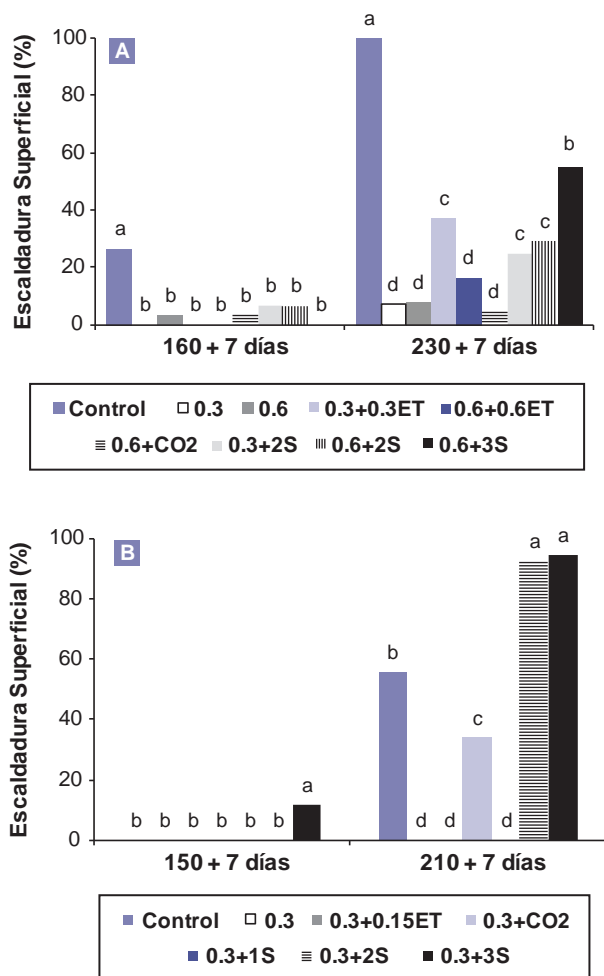


Figura 3. Incidencia de escaldado superficial en peras Packham's Triumph tratadas con diferentes estrategias para modular 1-MCP. Los datos representan el porcentaje de fruta afectada con escaldadura sobre el total de fruta evaluada. Las evaluaciones se realizaron después de 7 días de vida en estante a 20°C , después de 160 y 230 días de almacenamiento en el experimento 1 (A) y después de 150 y 210 días de almacenamiento en el experimento 2 (B). Separación de medias por DGC (0.05).

concentración fue $0,15 \text{ ml L}^{-1}$ de etileno, la restauración fue parcial y fruta mostró una tasa de maduración intermedia entre el control y la fruta tratada con 1-MCP. Entre estos tratamientos, $0,3+0,15$ fue el tratamiento más interesante ya que permitió un control completo del escaldado superficial. Similarmente, la aplicación simultánea de $0,6 \text{ ml L}^{-1}$ 1-MCP y $0,3 \text{ ml L}^{-1}$ de etileno (relación 1:0,5) fue el tratamiento más prometedor en peras Conference (Chiriboga *et al.*, 2011). Además, el tratamiento 1-MCP aplicado en combinación con etileno (relación 1:1) mostró un efecto en la maduración de las peras Packham's Triumph, siendo esta respuesta intermedia en comparación con el 1-MCP aplicado inmediatamente después de la cosecha y las frutas control sin tratamiento (Manriquez y Defilippi, 2011).

La aplicación simultánea de 1-MCP con 5% de CO_2 también fue eficaz para reiniciar la maduración. Como se observó con la aplicación de etileno, el efecto CO_2 dependió de la concentración aplicada de 1-MCP y restauró completamente la maduración en fruta tratada con $0,3 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP, pero solo parcialmente en fruta tratada con $0,6 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP. Hasta el alcance de nuestro conocimiento, este sería el primer estudio que demuestra la eficacia de la aplicación simultánea de CO_2 y 1-MCP para revertir la inhibición en la maduración en peras tratadas con 1-MCP tras largos períodos de almacenamiento. Sin embargo, el mecanismo por el cual CO_2 contrarresta el efecto inhibitorio de 1-MCP, aún no está del todo claro. Burg y Burg (1967) y Gorny y Kader (1997) propusieron que la inhibición de la biosíntesis de etileno por CO_2 es mediada a través del sitio del receptor. Entonces, por un lado, el efecto de la aplicación simultánea podría explicarse a través de la competencia entre el CO_2 y 1-MCP por los receptores de etileno. Por otro lado, también se demostró que la inhibición por CO_2 podría influir en la producción de etileno más que en la percepción de etileno (De Wild *et al.*, 1999), principalmente a través de efectos secundarios como cambios en el pH (Sisler y Wood, 1988). También es importante usar una concentración de CO_2 apropiada, ya que Chavez-Franco y Kader (1993) informaron que en peras, la producción de etileno fue estimulada por 1% de CO_2 e inhibida por 5-20% de CO_2 .

Otra estrategia prometedora para restaurar la maduración en peras tratadas con 1-MCP es exponer la fruta a temperaturas en el rango de 15-20 °C durante tiempos variables. La exposición a altas temperaturas podría favorecer la liberación de 1-MCP de los receptores o la síntesis de nuevos receptores de etileno, o una interacción entre ambos factores (Villalobos Acuña *et al.*, 2011). Los tratamientos con calor fueron eficaces para restaurar la maduración de peras Blanquilla y Bartlett tratadas con 1-MCP, pero no lo fueron en cultivares Conference y Beurré D'Anjou (Bai *et al.*, 2006; Chiriboga *et al.*, 2010). Los resultados obtenidos en este estudio indican que esta estrategia es también efectiva para restaurar la capacidad de maduración de las peras Packham's Triumph, siendo $0,3+1\text{S}$ el tratamiento más interesante, ya que permitió el ablandamiento después de 230 días más vida en estante, e incluso permitió controlar la escaldadura superficial. Por el

contrario, la fruta tratada con $0,3+2\text{S}$ y $0,3+3\text{S}$ recuperó la capacidad de maduración, pero desarrolló más escaldadura superficial que la fruta control. En peras Bartlett las combinaciones más adecuadas para restaurar la capacidad de maduración en frutas tratadas con $0,3 \mu\text{L L}^{-1}$ 1-MCP fueron 10 días a 20 °C o 20 días a 10 °C después de 2 meses de almacenamiento, y 10 días a 15 °C después de 4 meses de almacenamiento (Bai *et al.*, 2006). En forma similar, de 5 a 15 días a 15 °C fueron suficientes para que las peras Blanquilla recuperaran su capacidad de maduración después de 4 meses de almacenamiento en frío (Chiriboga *et al.*, 2007). Además de la duración de la exposición a la temperatura, el cultivar y el tiempo de almacenamiento, Bai *et al.* (2006) también observaron que los tratamientos con calor son dependientes de la atmósfera, ya que la fruta almacenada en atmósfera controlada requiere un almacenamiento más largo que aquellas almacenadas en aire regular para reiniciar el proceso de maduración.

Estudios previos mostraron que la inhibición en la síntesis o acción del etileno reduce la producción de α -farnesenos e inhibe, por lo tanto, la escaldadura superficial (Chen y Spotts, 2005). En este estudio, los tratamientos que han demostrado ser más eficaces en la restauración de la maduración en la fruta tratada con 1-MCP fueron aquellos con una mayor incidencia de escaldado, mientras que aquellos que permitieron una restauración parcial, como $0,6+1\text{-MCP}+5\%\text{CO}_2$ y $0,3+0,15\text{ET}$, mantuvieron una incidencia de escaldado inferior.

CONCLUSIÓN

Entre los tratamientos que permitieron la maduración normal de las frutas, los tratamientos con calor mostraron ser menos efectivos para controlar el escaldado superficial, lo que lleva a concluir que la competencia por los sitios de unión mediante etileno o CO_2 es la estrategia más promisoría ya que permite modular los efectos de 1-MCP al tiempo que mantiene una baja incidencia de escaldadura superficial en peras Packham's Triumph.

La aplicación simultánea con etileno o CO_2 es un método sencillo para modular los efectos de 1-MCP en las peras, pero una de las principales desventajas de esta estrategia es que debe ser decidida antes de saber cuánto tiempo se almacenará la fruta. Por el contrario, los tratamientos con calor implican problemas logísticos (especialmente si la fruta ya está embalada), pero tienen la ventaja de que se realizan sobre la marcha del almacenamiento de acuerdo con las necesidades del mercado.

Los resultados también muestran la importancia de considerar la dosis de 1-MCP aplicada y la duración del almacenamiento para decidir cuál es la mejor estrategia de modulación en cada caso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el financiamiento de INTA (PNFRU-53911) y de AgroFresh®.

BIBLIOGRAFÍA

- BAI, J.; MATTHEIS, J.P.; REED, N. 2006. Re-initiating softening ability of 1-methylcyclopropene-treated 'Bartlett' and 'd'Anjou' pears after regular air or controlled atmosphere storage. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 81:959-964.
- BLANKENSHIP, S.M.; DOLE, J.M. 2003. 1-Methylcyclopropene: a review. *Postharvest Biology and Technology* 28:1-25.
- BURG, S.P.; BURG, E.A. 1967. Molecular requirements for the biological activity of ethylene. *Plant Physiology* 42:144-152.
- CALVO, G.; KUPFERMAN, E. 2012. Current DPA and ethoxyquin situation and alternatives to superficial scald control in apples and pears. *Acta Horticulturae* 945:51-54.
- CALVO, G.; SOZZI, G.O. 2004. Improvement of postharvest storage quality of 'Red Clapp's' pears by treatment with 1-methylcyclopropene at low temperature. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 79:930-934.
- CALVO, G. 2004. Effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on pear maturity and quality. *Acta Horticulturae* 628:203-211.
- CHAVES-FRANCO, S.H.; KADER, A.A. 1993. Effects of CO₂ on ethylene biosynthesis in 'Bartlett' pears. *Postharvest Biology and Technology* 3:183-190.
- CHEN, P.M.; SPOTTS, R.A. 2005. Changes in ripening behaviour of 1-MCP-treated 'd'Anjou' pears after storage. *International Journal of Fruit Science* 5:3-18.
- CHIRIBOGA, M.A.; SCHOTSMANS, W.; LARRIGAUDIÈRE, C. 2010. Comparative study of techniques to restore the ripening process in 1-MCP treated 'Blanquilla' and 'Conference' pears. *Acta Horticulturae* 858:149-154.
- CHIRIBOGA, M.A.; SCHOTSMANS, W.; LARRIGAUDIÈRE, C.; DUPILLE, E.; RECASENS, I. 2011. How to prevent ripening blockage in 1-MCP-treated 'Conference' pears. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 91(10):1781-1788.
- CUCCI, A.; REGIROLI, G. 2011. Temperature and Ethylene: Two useful tools to be used in combination with Smart-Fresh for delivering optimal quality pears. *Acta Horticulturae* 909:679-686.
- DE WILD, H.P.J.; WOLTERING, E.J.; PEPPELENBOS, H.W. 1999. Carbon dioxide and 1-MCP inhibit ethylene production and respiration of pear fruit by different mechanisms. *Journal of Experimental Botany* 50:837-844.
- DI RIENZO, J.A.; GUZMAN, A.W.; CASANOVES, F. 2002. A multiple comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree obtained by average linkage of the matrix of euclidean distances between treatment means. *JABES* 7(2), 129-142.
- EKMANN, J.H.; CLAYTON, M.; BIASI, W.V.; MITCHAM, E.J. 2004. Interactions between 1-MCP concentration, treatment interval and storage time for 'Bartlett' pears. *Postharvest Biology and Technology* 31:127-136.
- GORNÝ, J.R.; KADER, A.A. 1997. Low O₂ and elevated CO₂ atmospheres inhibit ethylene biosynthesis in preclimacteric and climacteric apple fruit. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 124:542-546.
- JIANG, Y.; JOYCE, D.C.; MACNISH, A.J. 1999. Responses of banana fruit to treatment with 1-methylcyclopropene. *Plant Growth Regulators* 28:77-82.
- KAPPEL, F.; FISHERFLEMING, R.; HOGUE, E.J. 1995. Ideal pear sensory attributes and fruit characteristics. *HortScience* 30:988-993.
- MANRÍQUEZ, D.; DEFILIPPI, B.G. 2011. Strategies for applying 1-MCP in Packham's Triumph pears. *Acta Horticulturae* 909:699-703.
- MITCHAM, E.J.; MATTHEIS, J.P.; BOWER, J.; BIASIL, B.; CLAYTON, M. 2001. Responses of european pears to 1-MCP. *Perishables Handling* 108:16-19.
- SISLER, E.C.; WOOD, C. 1988. Interaction of ethylene and CO₂. *Physiologia Plantarum* 73(3):440-444.
- VILLALOBOS ACUÑA, M.G.; BIASIA, W.V.; MITCHAM, E.J.; HOLCROFT, D. 2011. Fruit temperature and ethylene modulate 1-MCP response in "Bartlett" pears. *Postharvest Biology and Technology* 60:17-23.