



Universidad
Católica
de Valencia
San Vicente Mártir

**Diversidad varietal en pimiento (*Capsicum
annuum* L.) para composición del fruto y
tejidos en respuesta a condiciones de
estrés. Implicaciones en la interacción
genotipo × ambiente**

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

D. CARLOS MURCIA ASENSI

Dirigida por:

Dra. D^a MÓNICA DÍEZ DÍAZ

Dr. D ADRIÁN RODRÍGUEZ BURRUEZO

Resumen

Los nombres utilizados por el ser humano para distintos tipos de pimientos, como guindillas, pimentón, denotan todos a los frutos de plantas pertenecientes al género *Capsicum*. Existe una gran variedad de especies y formas cultivadas dentro de este género, siendo la más popular e importante desde el punto de vista económico *Capsicum annuum*, o pimiento común. *C. annuum* incluye pimientos dulces y picantes, entre los que destacan la mayoría de pimientos españoles (p ej. morrón, piquillo, padrón, guindillas de encurtir, dulce italiano) y otros (p ej. jalapeño, chile serrano, poblanos). Otras especies como *C. chinense* y *C. frutescens* son populares en sus zonas de origen, que van desde el sur de Estados Unidos hasta Brasil y el Caribe. Uno de los principales retos a los que se enfrenta este cultivo en el área mediterránea es la limitada disponibilidad de agua para riego y su salinización en muchas zonas. Asimismo, como valor añadido, los pimientos y formas afines de *Capsicum* pueden presentar una gran capacidad antioxidante y son ricos en vitaminas y carotenoides. Finalmente, el crecimiento, desarrollo y fitomejoramiento de los cultivos de pimiento dependen de una combinación de rasgos genéticos y condiciones ambientales.

El primer objetivo pretendía comparar de forma preliminar la respuesta de distintos genotipos de *C. annuum* a las prácticas ecológicas (aire libre) y convencionales (invernadero). El estudio examinó específicamente el impacto sobre el peso de fruto y los niveles de ácido ascórbico, como principal antioxidante de esta hortaliza y cómo diferían estos niveles entre los dos estados comerciales de maduración: inmaduros y completamente maduros. El estudio también examinó cómo la fase de maduración y las condiciones de cultivo afectaban a estos factores bioactivos, y exploraba las interacciones entre el genotipo y estos factores. Los resultados de este estudio sirvieron para empezar a conocer los principales efectos que afectan a la calidad del pimiento y adquirir experiencia en el manejo de técnicas analíticas. También proporcionó información útil para seleccionar variedades de pimiento que se adaptaban bien a condiciones de cultivo específicas.

Como segundo objetivo se planteó evaluar el potencial de diversas accesiones de *Capsicum* como portainjertos para variedades comerciales de

pimiento en condiciones de estrés hídrico y salinidad. El estudio se centró en evaluar la respuesta de una variedad de pimiento grueso tipo Lamuyo (cv. Herminio) injertada sobre ocho accesiones de *Capsicum*, incluyendo dos portainjertos comerciales, así como dos combinaciones control (Herminio sin injertar e injertado sobre sí mismo). Las combinaciones se ensayaron en tres condiciones: déficit hídrico (70% riego control), salinidad (5,8 dS/m) y control. Se midieron el rendimiento, el peso del fruto y el contenido en los principales antioxidantes del fruto (ácido ascórbico mediante HPLC y compuestos fenólicos mediante espectrofotometría) en los dos estados comerciales (inmaduro y maduro). El estudio reveló que, bajo condiciones control, los portainjertos no aportaron una mejora significativa frente a la variedad Herminio sin injertar en términos de rendimiento y tamaño de fruto. Sin embargo, bajo condiciones de estrés, varias combinaciones de injerto mostraron un buen potencial para mitigar su impacto. Así, la salinidad tuvo un mayor impacto en el rendimiento y el peso del fruto en comparación con el déficit hídrico. En estas circunstancias, varios portainjertos permitieron superar el rendimiento y peso de fruto de la variedad no injertada, especialmente en condiciones de sequía (5-7 kg/m² vs 4 kg/m² de Herminio) y en peso de fruto en ambas condiciones (190-223 g vs 173 g en sequía y 187-209 g vs 158 g bajo salinidad). La salinidad también afectó negativamente a la acumulación de ácido ascórbico y fenoles tanto en frutos inmaduros como maduros, mientras que el déficit hídrico mostró niveles similares o superiores de ácido ascórbico y fenoles en comparación con el riego control. En este marco, algunos portainjertos también permitieron mejorar notablemente el contenido en antioxidantes bajo ambos estreses y para los dos estados de madurez del fruto. El estudio permitió identificar además dos portainjertos con gran potencial para condiciones de déficit hídrico.

Finalmente, como tercer objetivo o línea experimental se abordó un estudio de herencia para caracteres de calidad nutricional, i.e. ácido ascórbico, fenoles totales y carotenoides totales rojos y amarillos, evaluando sus niveles en una colección de diversos tipos varietales empleados como líneas parentales e híbridos entre ellas, tanto en fruto inmaduro como en fruto maduro, bajo condiciones de producción ecológica. Se observó un efecto significativo de la maduración (frutos maduros más ricos en antioxidantes), la variedad (algunas

accesiones proporcionaban la dosis diaria recomendada (DDR) de vitamina C en 50 g de fruto y niveles fenólicos superiores a tomate, brócoli o naranja) y una significativa contribución de la interacción en compuestos bioactivos. Finalmente, también se observó un marcado efecto parental (valor del parental medio) en la composición del fruto de los híbridos, para ácido ascórbico y especialmente en carotenoides. Ello indica que la hibridación es una estrategia útil para obtener variedades más ricas en antioxidantes en los frutos del pimiento.

Abstract

The names used by humans for different types of peppers, such as chillies, paprika, all denote the fruits of plants belonging to the genus *Capsicum*. There is a wide variety of species and cultivated forms within this genus, the most popular and economically important being *Capsicum annuum*, or common pepper. *C. annuum* includes sweet and hot peppers, among which most Spanish peppers stand out (e.g. bell pepper, piquillo, padrón, pickling chillies, Italian sweet) and others (e.g. jalapeño, serrano chili, poblanos). Other species such as *C. chinense* and *C. frutescens* are popular in their native areas, which range from the southern United States to Brazil and the Caribbean. One of the main challenges that this crop faces in the Mediterranean region is the limited availability of water for irrigation and its salinization in many areas. Likewise, as an added value, peppers and related forms of *Capsicum* can have a great antioxidant capacity and are rich in vitamins and carotenoids. Finally, the growth, development and breeding of pepper crops depend on a combination of genetic traits and environmental conditions.

In the present doctorate, the first objective was to preliminarily compare the response of different genotypes of *C. annuum* to organic (open field) and conventional (greenhouse) practices. The study specifically examined the impact on fruit weight and levels of ascorbic acid, the main antioxidant of this vegetable and how these levels differed between the two commercial ripening stages: unripe and fully ripe. The study also examined how the ripening stage and cultivation conditions affected these bioactive factors and explored the interactions between genotype and these factors. The results of this study helped

the doctoral student to begin to know the main agronomic and physiological effects that affect the quality of the pepper and the management of analytical techniques. It also provided useful information for selecting pepper varieties that adapted well to specific growing conditions.

As a second objective, it was proposed to evaluate the potential of several *Capsicum* accessions as rootstocks for commercial varieties of peppers under conditions of water stress and salinity. The study focused on evaluating the response of a variety of Lamuyo-type of a cultivar of bell pepper (cv. Herminio) grafted onto eight *Capsicum* accessions, including two commercial rootstocks, as well as two control combinations (i.e. Herminio ungrafted and self'-grafted). The combinations were tested in three conditions: water deficit (70% irrigation control), salinity (5,8 dS/m²) and control. The yield, fruit weight and content of the main antioxidants in the fruit (ascorbic acid by HPLC and phenolic compounds by spectrophotometry) were measured in the two commercial stages (unripe and fully ripe). The study revealed that, under control conditions, the rootstocks did not provide a significant improvement compared to the ungrafted Herminio variety in terms of yield and fruit size. However, under stress conditions, some grafting combinations showed good potential to mitigate its impact. Thus, salinity had a greater impact on yield and fruit weight compared to water deficit. Under these circumstances, several rootstocks made it possible to surpass the yield and fruit weight of the non-grafted variety, especially in drought conditions (5-7 kg/m² vs 4 kg/m² of Herminio) and in fruit weight in both conditions (190-223 g vs 173 g in drought and 187-209 g vs 158 g under salinity). Salinity also negatively affected the accumulation of ascorbic acid and phenols in both immature and ripe fruits, while water deficit showed similar or higher levels of ascorbic acid and phenols compared to control irrigation. In this framework, some rootstocks also allowed a notable improvement in the antioxidant content under both stresses and for the two stages of fruit maturity. The study also allowed us to identify two rootstocks with great potential for water deficit conditions.

Finally, as a third objective or experimental line, an inheritance study for nutritional quality traits was addressed, i.e. ascorbic acid, total phenols and total red and yellow carotenoids, evaluating their levels in a collection of diverse varietal types used as parental lines and hybrids between them, both in unripe

fruit and in fully ripe fruit, under organic production conditions. A significant effect of i) ripening (ripe fruits usually richer in antioxidants), ii) variety (some accessions provided the recommended daily intake of vitamin C in 50 g of fruit and phenolic levels higher than tomato, broccoli or orange, and iii) a significant contribution of the interaction in bioactive compounds. Finally, a marked parental effect (average parental value) was also observed in the fruit composition of the hybrids, for ascorbic acid and especially for carotenoids. This indicates that hybridization is a useful strategy to obtain varieties richer in carotenoids. antioxidants in pepper fruits.

ÍNDICE

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. El cambio climático.....	1
1.1.1. Influencia en salinidad y sequía.....	2
1.1.2. Agricultura sostenible frente al cambio climático.....	4
1.2. Taxonomía del pimiento	6
1.3. Origen y domesticación.....	11
1.4. Relevancia económica del pimiento.....	12
1.5. El injerto en hortalizas y su uso e interés en el pimiento.....	19
1.5.1. Generalidades del injerto en la agricultura.....	19
1.5.2. Aspectos específicos del injerto en pimiento. Usos e intereses	20
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	23
3. FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSION	27
3.1. LÍNEA EXPERIMENTAL 1: Estudio preliminar de la respuesta del pimiento a diferentes condiciones agronómicas	29
3.1.1. Metodología	29
3.1.1.1. Material vegetal	29
3.1.1.2. Muestreo de frutos.....	29
3.1.2. Resultados y discusión	30
3.2. LÍNEA EXPERIMENTAL 2: Estudio de colecciones de <i>Capsicum</i> como portainjertos de variedades comerciales en condiciones de riego deficitario y salinidad.....	32
3.2.1. Metodología	32
3.2.1.1. Materiales vegetales y combinaciones de injertos.....	32
3.2.1.2. Injertos, diseño experimental y condiciones de cultivo.....	32
3.2.1.3. Muestreo de frutos y caracteres evaluados	33
3.2.1.4. Análisis estadístico	34
3.2.2. Resultados y discusión	36
3.2.2.1. Análisis de variaciones	36
3.2.2.2. Caracteres de productividad.....	39
3.2.2.3. Composición de los frutos inmaduros	44
3.2.2.4. Composición de los frutos maduros.....	48
3.2.2.5. Interacción de las condiciones de estrés con el proceso de maduración en la composición de los frutos.....	53

3.3. LÍNEA EXPERIMENTAL 3: Evaluación del comportamiento de líneas parentales e híbridos para factores de la calidad nutricional en distintas condiciones de cultivo.....	56
3.3.1. Metodología	56
3.3.1.1. Material vegetal	56
3.3.1.2. Condiciones de cultivo.....	57
3.3.1.3. Caracteres evaluados	57
3.3.1.4. Tratamiento estadístico.....	60
3.3.2. Resultados y discusión	60
4. CONCLUSIONES.....	67
5. BIBLIOGRAFÍA.....	71

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1: Flor y fruto de <i>Capsicum annuum</i>	8
Figura 2: Flor y fruto de <i>Capsicum chinense</i>	9
Figura 3: Flor y fruto de <i>Capsicum frutescens</i>	10
Figura 4: Flor y fruto de <i>Capsicum baccatum</i>	10
Figura 5: Flor y fruto de <i>Capsicum pubescens</i>	11
Figura 6: Peso de frutos (g, A) y contenido en ácido ascórbico (CAA) (mg/100 g, B) en las variedades evaluadas. Las líneas rojas en la cima de cada barra indican la desviación estándar para cada combinación de variedad x estado de maduración x sistema de cultivo (n = 5).	31
Figura 7. Estudio comparativo entre los estados inmaduro (verde) y completamente maduro (rojo) del contenido de ácido ascórbico (CAA) y de las relaciones Sequía/Control (A) y Salinidad/Control (B) de los materiales vegetales evaluados. Los puntos naranjas corresponden al valor de cada material vegetal evaluado y el punto negro corresponde al valor medio. La línea negra indica una pendiente = 1 (es decir, la misma relación en los estados inmaduro y completamente maduro).....	54
Figura 8. Estudio comparativo entre los estados inmaduro (verde) y completamente maduro (rojo) de las relaciones fenólicos totales (TP) y de las relaciones Sequía/Control (A) y Salinidad/Control (B) de los materiales vegetales evaluados. Los puntos naranjas corresponden al valor de cada material vegetal evaluado y los puntos negros al valor medio. La línea negra indica una pendiente = 1 (es decir, la misma relación en los estados inmaduro y completamente maduro).	55
Figura 9. Ejemplo de diversidad varietal entre los parentales empleados. De izquierda a derecha: Fila superior: Bola, Chile de árbol, Guindilla y Riojano; Fila inferior: Pasilla, Piquillo, Serrano y Ají dulce.	57
Figura 10. Regresiones parentales (mid-parent value) vs. híbridos para contenido en ácido ascórbico (CAA) y fenoles totales (FT) en cada estado de madurez (las gráficas con puntos verdes corresponden al estado inmaduro y las de puntos rojos al estado maduro) y para el contenido en carotenoides rojos totales (CR) y amarillos totales (CA) en frutos maduros. En abscisas los valores midparent (i.e. promedio de los parentales correspondientes) en ordenadas los valores de los híbridos.....	66
Tabla 1: Ranking mundial por superficie cultivada (ha), por producción total (Mt) y por rendimiento de producción (T/ha).....	14
Tabla 2: Ranking de países del mundo por superficie cultivada (ha), por producción total (Mt) y por rendimiento de producción (T/ha)	15

Tabla 3: Ranking de la Unión Europea por superficie cultivada (ha), por producción total (T) y por rendimiento de producción (T/ha)	16
Tabla 4: Ranking de las CCAA por superficie cultivada (ha), por producción total (T) y por rendimiento de producción (T/ha)	17
Tabla 5: Ranking de las provincias por superficie cultivada (ha), por producción total (T) y por rendimiento de producción (T/ha)	18
Tabla 6. Tabla ANOVA correspondiente a los cuadrados medios (CM) y grados de libertad (gl) de cada factor principal y las interacciones entre ellos general (todos los factores considerados conjuntamente. superior) y específica para cada estado de maduración del fruto (inmaduro y completamente maduro. inferior) para rendimiento, peso del fruto, contenido en agua, contenido en ácido ascórbico (CAA) y fenoles totales (FT)	37
Tabla 7. Valores medios de rendimiento (kg/m ²) y peso del fruto (g) en condiciones de control, déficit hídrico y salinidad	40
Tabla 8. Valores medios de contenido de agua (%), contenido de ácido ascórbico (CAA, mg/100g pf) y fenoles totales (FT, mg/100g pf) en frutos inmaduros bajo condiciones de control, déficit hídrico y salinidad.	45
Tabla 9. Valores medios de contenido de agua (%), contenido de ácido ascórbico (CAA, mg/100g pf) y fenoles totales (TP, mg/100g pf) en frutos completamente maduros bajo condiciones de control, déficit hídrico y salinidad.....	49
Tabla 10. Material vegetal evaluado. Parentales e híbridos experimentales	56
Tabla 11. Análisis de la varianza ANOVA, expresando los grados de libertad (gl) y cuadrados medios (CM) de los correspondientes efectos principales y su interacción sobre los caracteres contenido en ácido ascórbico (CAA), fenoles totales (FT) y carotenoides rojos totales (C _R) amarillos totales y (C _A). Para los carotenoides no se estudió el efecto estado de madurez al ser determinados sólo en frutos maduros.	61
Tabla 12. Contenido (mg/kg pf) en ácido ascórbico (CAA) y fenoles totales (FT) en estado inmaduro y maduro de las accesiones parentales e híbridos experimentales evaluados.	62
Tabla 13. Contenido (mg/kg pf) en carotenoides rojos totales (C _R) y amarillos totales (C _A) en frutos maduros de las accesiones parentales e híbridos experimentales evaluados.....	64

1. INTRODUCCIÓN

1.1. El cambio climático

El cambio climático se define como un cambio a largo plazo de la temperatura y los patrones meteorológicos. Desde el siglo XIX, la actividad humana ha sido identificada como la principal causa del cambio climático, siendo la quema de combustibles fósiles un factor importante. La combustión de estos combustibles libera gases de efecto invernadero a la atmósfera, que actúan como una manta, impidiendo que el calor del sol salga de la Tierra. Este proceso provoca un aumento de la temperatura de la Tierra (FAO, 2024).

Los científicos han demostrado que la actividad humana ha sido el principal motor del calentamiento global en los últimos 200 años. Actividades como la agricultura, el transporte, la industria, el uso del suelo, etc. han sido identificadas como contribuyentes significativos a la generación de gases de efecto invernadero, que han elevado la temperatura del planeta a niveles superiores a los observados antes del advenimiento de la revolución industrial. Esta tendencia ha sido especialmente pronunciada en la última década.

El cambio climático no es sólo una cuestión de aumento de las temperaturas. La Tierra es un sistema en el que todo está conectado, por lo que una pequeña alteración en una zona del planeta puede amplificarse en otras. Las consecuencias del cambio climático incluyen, además del aumento de las temperaturas, la aparición de sequías intensas, la escasez de agua, incendios más frecuentes e intensos, el aumento del nivel del mar, el deshielo de los casquetes polares, la aparición de tormentas catastróficas y la pérdida de biodiversidad.

Los efectos del cambio climático sobre la salud humana, los cultivos, la seguridad y el trabajo están bien documentados. Estos efectos son especialmente pronunciados en los países insulares y en desarrollo, donde los largos periodos de sequía crean paisajes desérticos con un alto riesgo de hambruna. A la luz de estas preocupaciones, varios informes de la ONU han indicado que el objetivo es limitar el aumento de la temperatura global a no más de 1,5 °C. Sin embargo, las políticas actuales prevén un aumento mayor de la temperatura del planeta (Naciones Unidas, 2024).

INTRODUCCIÓN

Las emisiones de gases invernadero son provocadas por todos los países del mundo, pero algunos, como China, Estados Unidos, Unión Europea, Rusia, Brasil, entre otros, fueron causantes de más de la mitad de los gases invernadero en los últimos años y son éstos mismos los que tendrán que dedicar mayor esfuerzo en reducir la emisión de gases de efecto invernadero para ralentizar los efectos del cambio climático.

Es imperativo que empecemos a tomar medidas para hacer frente al cambio climático. Dichas medidas pueden reportar beneficios económicos y, al mismo tiempo, mitigar los efectos nocivos del cambio climático y salvaguardar el medio ambiente. En este sentido, numerosos países de todo el mundo han consentido en la creación de marcos y acuerdos globales para guiar el proceso. Entre ellos se encuentran los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Acuerdo de París. Estos acuerdos son esenciales para iniciar acciones que faciliten la reducción de emisiones, la adaptación a los impactos climáticos y la financiación de los ajustes necesarios (Naciones Unidas, 2024).

1.1.1. Influencia en salinidad y sequía

El clima en nuestras zonas agrarias es enormemente variable debido a la influencia topográfica y geográfica. Al mismo tiempo, en los ecosistemas de cultivo habituales de hortícolas la variabilidad climática interanual es elevada, generando situaciones de estrés climático significativas (Moreno *et al.*, 2010).

Este cambio en el clima afectará claramente no sólo a la estructura y funcionamiento del ecosistema terrestre y de cultivo, sino también a la fenología e interrelaciones de las especies tanto inter como intra-especies (Moreno *et al.*, 2010). Los efectos inmediatos pueden determinar la mayor o menor incidencia, así como el nivel de este efecto, el cual será claramente detectado en el propio ecosistema. Los efectos en un ecosistema agrario son delimitados o expuestos mediante diferentes estreses que evidencian esas situaciones anómalas.

Podemos evidenciar diferentes tipos de estrés en agricultura que delimitan claramente su viabilidad, entre ellos debemos destacar la sequía, la salinidad y las temperaturas extremas que influyen claramente sobre los otros condicionantes y, por lo tanto, sobre el crecimiento y productividad de los cultivos

agrarios (Martínez *et al.*, 2011). Con el paso del tiempo y el uso de diferentes técnicas de cultivo hemos podido comprobar un claro aumento de suelos salinos en todo el mundo, lo que limita la producción de cultivos (Mesa, 2003). Estas zonas son consideradas marginales, aspecto para tener en cuenta dada la falta de espacio para un uso agrario en la actualidad.

La salinidad es un problema antiguo (Meza *et al.*, 2007) que limita una buena distribución de las plantas en el suelo y ante todo limita su productividad. Ante esta situación es necesario desarrollar prácticas de cultivo que minimicen estos efectos. La salinidad presente en un suelo agrario es una situación que se incrementa con el paso de los años en las zonas productoras áridas y semiáridas, debido principalmente a la baja precipitación y/o inadecuado manejo del riego en las explotaciones (Villa *et al.*, 2006), este aporte hídrico puede ser exógeno a la explotación o bien provenir de las precipitaciones locales.

Tanto la sequía como la salinidad condicionan el establecimiento de nuevas especies, pero de igual forma afectan en el desarrollo de estas (Madueño-Molina *et al.*, 2006). Si la precipitación es muy baja las sales solubles permanecen en el suelo y cuando pasado el tiempo el agua se evapora, por capilaridad ascienden las sales y tras muchos años dispondremos de suelos más salinos (Santamaría-César *et al.*, 2004). Esa concentración de sales en niveles elevados en el suelo es un claro factor de estrés común que limita drásticamente el crecimiento de plantas, incluso llegando a provocar su muerte.

Por otra parte, las condiciones de estrés salino motivan que la planta no pueda absorber el agua, aunque la tenga a su disposición (Argentel *et al.*, 2006). Ante esta situación las plantas pueden llegar a morir debido a que esa limitación en la absorción de agua puede perdurar en el tiempo. Según García y Jáuregui (2008) es uno de los principales factores que limitan la productividad agraria dado que la mayoría de las plantas son sensibles a esta situación.

Este estrés provoca daños señalados en el cultivo del pimiento como es la reducción de la nascencia, crecimiento y posterior desarrollo. Como es evidente, las variables de crecimiento se ven claramente afectadas, entre el área foliar, altura total o producción biomásica.

INTRODUCCIÓN

Está claramente comprobada la influencia del cambio climático sobre diferentes procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la conductancia estomática, el balance hormonal y el transporte de agua e iones. En el caso del cultivo del pimiento esta salinización genera la aparición de clorosis y caída de hoja adulta, así como la producción de etileno (Zapata *et al*, 2003). Ante esta situación es importante focalizar y delimitar las posibles causas de este tipo de estrés hídrico y salino.

El aumento de temperatura, los cambios en cuanto a las precipitaciones y la variabilidad en claro aumento en los patrones de temperatura y precipitaciones, obliga a plantearse esta situación de cambio climático que evoluciona y cambia poco a poco pero que al mismo tiempo (Núñez *et al*, 2017) es causante de un estrés salino e hídrico significativo.

La sequía es uno de los factores claramente modificables por el cambio que se está produciendo en el clima, y al mismo tiempo esta sequía limita no solo el rendimiento sino también el desarrollo general de la planta, desde que influye drásticamente sobre la fotosíntesis de las plantas. Este estrés hídrico no es provocado únicamente por un ambiente de baja pluviometría, sino que puede estar definido por una distribución irregular de los aportes de agua. Un claro ejemplo del cambio en el clima es una alteración del patrón de precipitaciones (Taiz y Zeiger, 2006).

Los efectos del estrés por salinidad y sequía son claramente dependientes del genotipo, sin embargo, la exposición al mismo puede verse claramente influenciados por un cambio en el patrón climático. A lo largo de los años, la influencia del clima y el agua sobre la agricultura es un hecho constatado, hoy en día es claro que el cambio climático puede, por lo tanto, ejercer un claro impacto en los sistemas agrarios, amenazando aspectos ya establecidos de estos sistemas agrícolas. Sin embargo, también puede ser una oportunidad para la búsqueda de soluciones en esos casos de estrés claramente datados (Gornell *et al.*, 2010).

1.1.2. Agricultura sostenible frente al cambio climático

Los informes más recientes del Parlamento Europeo sobre las consecuencias del cambio climático en la agricultura se centran en el impacto de

la disponibilidad y la calidad del agua, así como en el aumento de la temperatura, y sus consiguientes efectos en la agricultura. Además, los informes destacan que los países mediterráneos son los más susceptibles a los riesgos asociados al cambio climático, con la posibilidad de experimentar sequías, que podrían provocar restricciones en los caudales de riego y la salinización de los regadíos. Una estrategia para mitigar los efectos del cambio climático es mejorar los cultivos para que puedan soportar las limitaciones de agua tanto en cantidad como en calidad (*Chapman et al.*, 2012).

Las principales consecuencias del cambio climático son el aumento de la temperatura, el estrés hídrico y, como consecuencia directa, el aumento de la salinidad. El pimiento es una planta termófila, por lo que es muy exigente en cuanto a temperatura. Las temperaturas inferiores a 15°C provocan un retraso o un bloqueo del desarrollo de la planta, mientras que las temperaturas superiores a 30°C hacen que el polen sea infértil. El rango óptimo de temperatura para el crecimiento de la planta se sitúa entre 23°C y 30°C durante el día y entre 18°C y 20°C por la noche (*Nuez et al.*, 2003). En cuanto al estrés hídrico, la disponibilidad de agua es un factor determinante para el crecimiento de las plantas. En climas cálidos, la falta de agua durante las fases vegetativa y reproductiva de las plantas afecta al cierre estomático y, en consecuencia, a la fijación de CO₂, necesario para la fotosíntesis y la fijación de carbohidratos (*Delfine et al.*, 2002). El uso del riego localizado optimiza los recursos hídricos, pero debido al cambio climático, los recursos hídricos serán cada vez más escasos, lo que hará necesario el uso de materiales más eficientes desde el punto de vista hídrico. Esta posible falta de agua hace que los suelos sean más salinos. Se ha demostrado que niveles de salinidad del suelo de 1,5 dS/m reducen el rendimiento del pimiento, provocan la caída de flores y frutos, y reducen la calidad de los frutos al disminuir su tamaño y sus compuestos antioxidantes (*Nuez et al.*, 2003).

La cuestión del cambio climático está teniendo un impacto perjudicial en los diferentes entornos de cultivo, lo que se traduce en un mayor estrés abiótico debido a las altas temperaturas, el estrés hídrico y la salinidad. Para encontrar soluciones a estos problemas, es necesario realizar estudios de mejora genética. Sin embargo, la puesta en marcha de un programa de mejora genética para el

INTRODUCCIÓN

género *Capsicum* es un proceso largo, que requiere la repetición de estudios para asegurar la fiabilidad de los resultados hasta poder establecer una selección efectiva de material en diversos ambientes de cultivo (Pineda *et al.*, 2012). Dada la realidad del cambio climático, es posible estudiar los materiales ya disponibles utilizando injertos con portainjertos más resistentes a la sequía o a la salinidad para conocer su aptitud para un uso agrícola sostenible (Estañ *et al.*, 2005).

1.2. Taxonomía del pimiento

Todas las formas de pimientos, chiles o ajíes pertenecen a la familia de las *Solanaceas*, que incluyen a una gran variedad de verduras cultivadas como el tomate, la patata, la berenjena, el tabaco o las petunias (Olmstead *et al.*, 2008; Hunziker, 2001).

La familia de las *Solanaceas* se divide en dos subfamilias *Solanoideae* y *Cestroideae* que albergan a más de 90 géneros. La diferencia de estas dos familias se basa en diferentes formas de desarrollo del embrión, siendo en la *Solanoideae* enrollado y de un diámetro uniforme y en la *Cestroideae* el embrión es recto o un poco curvado. Dentro de la subfamilia *Solanoideae*, tribu *Solaneae*, subtribu *Capsinae* y género *Capsicum*, se integran los pimientos, un grupo de especies con importante interés económico en todo el mundo (Hunziker, 2001).

Desde la introducción de la primera clasificación, la lista de especies que se incluyen en este género ha ido desde una hasta varias docenas. Los primeros botánicos estaban bastante limitados a colecciones de germoplasmas, por lo que las clasificaciones morfológicas se hacían con pocos individuos, y la falta de representación hacía que se realizaran clasificaciones erróneas, incluso incluyendo dentro del género *Capsicum* a especies no-*Capsicum* (Nuez *et al.*, 2003).

A mediados del siglo XX, se transformó la taxonomía del género *Capsicum*, haciendo la división del género en tres secciones, *Tubocapsicum*, *Pseudoacnistus* y *Capsicum*, siendo las dos primeras monoespecíficas y la segunda pluriespecífica en donde encontramos todos los pimientos (Hunziker, 1956). Hasta el momento, los rasgos florales eran esenciales para la clasificación de *Capsicum*, que contaban con corolas rotadas o sub-rotadas, y fue a mediados

de 1958 se describió a *C. cardenasii*, especie de *Capsicum* con corolas campanuladas (Heiser, 1976).

Por entonces, se mejoró mucho la precisión de las clasificaciones taxonómicas, que se mantienen en el tiempo hasta nuestros días y son las medidas estándar para cualquier trabajo de clasificación de especies (Russo, 2012). Además de toda la metodología nueva encontrada para la clasificación del género *Capsicum*, un avance importante en el campo de la taxonomía de *Capsicum* demostró que las especies silvestres eran vitales para entender la complejidad del género y que estaban relacionadas con las especies cultivadas (Pickersgill, 1971).

Reconocida la complejidad del género *Capsicum*, la International Board for Plant Genetic Resources (IBPGR) de la Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación elaboró un protocolo estandarizado para el desarrollo de descriptores claves para la clasificación taxonómica del género *Capsicum* y dio consejos sobre la recolecta de muestras para su clasificación (IBPGR, 1983). En la actualidad, se utilizan descriptores estandarizados de *Capsicum* para la caracterización del germoplasma de este género (Biodiversity International, 2019; IPGRI, 1995).

En la clasificación actual de las especies *Capsicum*, se definen claramente cinco especies cultivadas, que dependiendo de la zona geográfica pueden tener diferentes pseudónimos como chiles, que corresponderán a las zonas mejicana o de EE. UU., o ajíes para la zona sudamericana o centroamericana.

De las cinco especies cultivadas, *C. annuum* L. es la más importante económicamente y se cultiva en todo el mundo. Originaria de México, presenta una extraordinaria diversidad varietal y la gran mayoría de pimientos cultivados en España y Europa pertenecen a esta especie, a los que pertenecen tipos como los morrones, bolas o ñoras, piquillos, guindillas de encurtir, jalapeños, serranos, anchos/poblanos, padrón, etc.

Por otro lado, *Capsicum frutescens* L. es la menos domesticada, pudiendo encontrarse cultivada pero también creciendo espontáneamente en la zona Amazónica y Caribe, de donde es originaria. Es cultivada principalmente entre

INTRODUCCIÓN

Asia, África, Latinoamérica y sur de los EEUU, siendo el chile tabasco el tipo más conocido. *Capsicum chinense* Jacq se encuentra por diversas zonas de América del Sur, Caribe y Yucatán, pero también en África y Asia, a donde lo llevaron los comerciantes portugueses desde Brasil, siendo su tipo varietal más reconocido el chile Habanero. *Capsicum baccatum* L conocido como ají y *Capsicum pubescens* R.&P. son taxones filogenéticamente separados de los anteriores ya que hay evidencias arqueológicas que sugieren que estas especies fueron los primeros *Capsicum* domesticados (Nuez *et al.*, 2003).

Las características de cada una de las especies cultivadas son:

Capsicum annuum

Especie que se caracteriza por tener flores solitarias en cada nudo. Los pedicelos a menudo pendientes en la antesis. Corola de color blanca lechosa y ocasionalmente púrpura con los pétalos rectos. El cáliz con los frutos maduros no presenta constricción anular en la unión del pedicelo. Los frutos presentan un espesor de carne muy variado con semillas de color paja. Morfológicamente presenta una alta variabilidad en cuanto forma, tamaño y color pues es la especie que más se ha difundido y por lo tanto ha tenido gran cantidad de procesos de selección y mejora por el agricultor. Pertenecen al complejo *annuum* (Nuez *et al.*, 2003).



Figura 1: Flor y fruto de *Capsicum annuum*

Capsicum chinense

Especie con dos o más flores por nudo. Los pedicelos pueden estar erectos o pendientes en la antesis. Los pétalos son de color blanco-verdosos, aunque pueden tener alguna variedad color blancos o púrpuras. Son rectos. La presencia de frutos maduros de constricción anular en la unión con el pedicelo es identificativa de la especie. El fruto maduro tiene carne firme y semillas de color ocre. Especie con muchas variedades dentro del género *Capsicum* en donde encontramos las variedades más picantes como puede ser los Habaneros y los Scotch Bonnet. Pertenecen al complejo *annuum* (Nuez *et al*, 2003).



Figura 2: Flor y frutos de *Capsicum chinense*

Capsicum frutescens

Número de flores por nudo variable. Las flores están erectas en la antesis, al igual que los frutos maduros, siendo esto una característica distintiva de la especie. La corola es de color blanco-verdosa con pétalos revolutos. El cáliz en los frutos no suele presentar constricción anular en la unión con el peciolo. Los frutos tienen carne blanda que suele deshacerse, con semillas de color paja. Esta especie ha sido poco domesticada, por lo cual encontramos poca diversidad varietal, dado a que en muchas regiones se recolecta de plantas encontradas en la naturaleza, por lo que se considera una especie semicultivada (Dewitt y Bosland, 1996). Las variedades de esta especie pertenecen al complejo *annuum*.



Figura 3: Flor y fruto de *Capsicum frutescens*

***Capsicum baccatum* (var. *Pendulum*)**

Estirpe genéticamente diferente al complejo *annuum*. El número de flores por nudo es variable. Flores de color crema con manchas amarillas o verdes en la corola a cada lado de la vena central de los pétalos. El cáliz en los frutos no tiene constricción anular. Los frutos recuerdan a guindillas largas y retorcidas. La carne es firme y semillas de color crema. Conocido comúnmente como Ají es muy popular en Sudamérica, sobre todo en las regiones de Bolivia, debido a su pungencia como especia frente a los suaves aromas y sabores que ofrecen las diferentes variedades (Nuez *et al.*, 2003).



Figura 4: Flor y fruto de *Capsicum baccatum*

Capsicum pubescens

Otra estirpe diferente del complejo *annuum* e incluso de *C. baccatum* es diferente a cualquier otro pimiento domesticado, pues posee flores grandes de

color púrpura, difuminadas en blanco y solitarias en cada nudo. El cáliz de los frutos no tiene constricción anular en la unión con el pedicelo. Los frutos son de carne firme y semillas de color negro-marrón con presencia de pungencias. Es la especie con menos variabilidad morfológica de las cultivadas por el hombre por lo cual ha tenido una baja domesticación y poco conocido en el resto del mundo, aunque muy arraigada a la gastronomía andina denominándola rocotos (Eshbauhg, 1982).



Figura 5: Flor y fruto de *Capsicum pubescens*

1.3. Origen y domesticación

Casi todas las especies del género *Capsicum* son originarias de América del Sur. Tras su domesticación por el hombre se han aprovechado los frutos del género *Capsicum* spp. desde tiempos antiguos, los chiles más antiguos fueron recuperados de extractos cerámicos de cuevas secas en dos estados de México: Puebla y Tamulipas, junto con restos de otros cultivos como calabacín (*Cucurbita* spp.), judía (*Phasaеolus* spp.) y maíz (*Zea mays* L.) y que se remontan a más de 8000 años (Kraft *et al.*, 2014).

El origen y domesticación del género *Capsicum* spp. más aceptado fue propuesto por Mc Leod *et al.* (1982). Los investigadores sugirieron que gran parte del género *Capsicum* spp. se originó en el área nuclear situada en la parte sud-central de Bolivia, en una región comprendida dentro del triángulo de las actuales ciudades de Cochabamba, Sucre y Santa Cruz. Desde aquí se produjeron un

INTRODUCCIÓN

doble flujo migratorio genético: i) hacia los Andes, ii) hacia las tierras bajas en dirección a la Amazonia, completada por la radiación y especialización.

El linaje de flores púrpuras, *C. eximium* o un ancestro similar, se habría desplazado hacia las zonas altas de los Andes, dando lugar al tipo silvestre *C. cardenasii* y el tipo domesticado *C. pubescens*, por lo que explicaría la adaptación específica a estas condiciones ambientales y su mal comportamiento fuera de ellas. En cuanto al linaje de flores blancas, tendríamos que *C. baccatum* se habría domesticado en el área seca del sur de Bolivia y otra parte de este linaje habría migrado por el cauce del río Mizque hacia las tierras bajas de la cuenca amazónica, de donde surgió el ancestro silvestre del complejo *annuum*, que fue domesticado mínimo dos veces dando lugar a *C. chinense* y *C. frutescens* en la Amazonia y *C. annum* en Méjico (Pickersgill, 1989).

El pimiento fue una de las primeras especies americanas introducidas en el Viejo Mundo, de ahí que en el diario del primer viaje de Colón y tal como lo describe en su carta Pedro Mártir de Anglería a 15 de septiembre de 1493 confirma que fue el almirante Colón el que trajo ají a España, junto con muestras de cacao, caucho, algodón, cacahuete y otros frutos y especies tropicales.

1.4. Relevancia económica del pimiento

El pimiento, tiene un éxito comercial debido a sus diferentes posibilidades de consumo: fresco en verde como maduro, como especia (pimentón, oleorresinas, escamas, salsas) y en conserva (asado, encurtido), siendo por ello, la séptima hortaliza producida en el mundo por detrás de tan importantes como el tomate, la cebolla, el pepino, el repollo, la berenjena y la zanahoria.

La producción mundial de pimiento en el año 2022 según la FAO fue de 43,71 millones de toneladas con una superficie dedicada mayor de cuatro millones de hectáreas y con una productividad de más de 133 toneladas por hectárea, tanto para pimiento en fresco, como seco o para pimienta.

El pimiento ha tenido en las últimas décadas un aumento en la superficie cultivada y en su producción, afectando altamente en su rendimiento pues se han usado avances tecnológicos como uso de invernaderos aclimatados, uso de variedades mejoradas, insumos más elevados, pero a pesar de este aumento de

su difusión mundial, el continente con más de la mitad de la superficie cultivada es Asia con más de un 69% y también con una producción mayor del 68%. En cuanto a superficie cultivada en segunda posición se encuentra el continente africano con un 20,09% pero en producción total se encuentra en tercera posición con un 10,97%, siendo el continente americano el tercero en superficie cultivada y el segundo en producción con un 7,88% y 11,75%, respectivamente. El continente europeo se encuentra en cuarta posición con un 2,28% y 8,89% con respecto a la superficie cultivada y producción total, siendo Oceanía el quinto con un 0,09% y 0,06% en superficie y producción (Tabla 1). Refiriéndose a la productividad, es el continente europeo el que mayor rendimiento tiene en los cultivos del pimiento con más de 46 toneladas por hectárea cultivada.

En la contribución individual de cada país, es China la que tiene una superficie cultivada mayor con 1.653.212 ha cultivadas y también la que tiene una mayor producción con más de 18 Mt. En cuanto al rendimiento es Bélgica el que tiene un mayor rendimiento por hectárea siendo de 270 T/ha (Tabla 2).

Dentro de la Unión Europea, España es el país con mayor número de superficie cultivada con 22.260 ha y es el mayor productor de pimiento con 1.533.280 T, en cuestión del rendimiento es de 65,15 T/ha ocupado un séptimo puesto (Tabla 3).

En España la comunidad autónoma andaluza es la que tiene una mayor superficie cultivada y una mayor producción teniendo más del 66% y 70%, respectivamente, seguida de la región murciana en una posición alejada de ella con un 7,91% y 12,91%, respectivamente. La Comunidad Valenciana se encuentra con una superficie de 918 ha en la posición sexta y una producción del 3,65 % en la cuarta (Tabla 4).

Respecto a las provincias, es Almería y su mar de plástico, la provincia con una mayor superficie con más del 57% del total de España con 12.583 ha cultivadas y una producción de 979.894 T. para el rendimiento del cultivo son los campos de Badajoz los que tienen el mejor rendimiento con 260,14 T/ha.

Valencia se encuentra en la posición treceava en cuanto a superficie cultivada con 352 ha y una producción de 24.180 T en la posición séptima (tabla 5).

INTRODUCCIÓN

Tabla 1: Clasificación mundial por superficie cultivada (ha), por producción total (MT) y por rendimiento de producción (T/ha).
(FAO, 2022)

Ranking	Continente	Superficie (ha)	%	Continente	Producción (MT)	%	Continente	Rendimiento (T/ha)
1	Asia	3.033.347	69,64	Asia	29,13	68,23	Europa	46,11
2	África	875.167	20,09	América	5,05	11,75	Oceanía	26,34
3	América	343.627	7,88	África	4,68	10,97	América	24,58
4	Europa	99.335	2,28	Europa	3,79	8,89	Asia	22,79
5	Oceanía	4.126	0,09	Oceanía	0,06	0,14	África	13,94

Tabla 2: Clasificación de países del mundo por superficie cultivada (ha), por producción total (MT) y por rendimiento de producción (T/ha) (FAO, 2022)

Ranking	País	Superficie (ha)	País	Producción (MT)	País	Rendimiento (T/ha)
1	China	1.653.212	China	18,21	Bélgica	270,00
2	India	812.979	México	3,39	Países Bajos	263,64
3	Indonesia	522.367	Indonesia	2,63	Reino Unido	220,00
4	Etiopía	200.627	Turquía	2,57	Alemania	154,09
5	México	191.098	India	1,96	Polonia	139,00
6	Viet Nam	175.881	España	1,28	Finlandia	134,00
7	Nigeria	141.484	Nigeria	0,75	Omán	109,62
8	Myanmar	109.863	Egipto	0,71	Austria	91,21
9	Bangladesh	98.324	Estados Unidos	0,71	Guyana	83,03
10	Turquía	83.102	Argelia	0,65	Uzbekistán	81,13
11	Benin	75.552	Túnez	0,43	China	73,96

INTRODUCCIÓN

Tabla 3: Clasificación de la Unión Europea por superficie cultivada (ha), por producción total (T) y por rendimiento de producción (T/ha) (FAO, 2022)

Ranking	País	Superficie(ha)	%	País	Producción(T)	%	País	Rendimiento(T/ha)
1	España	22.260	39,84	España	1.533.280	49,31	Bélgica	270,00
2	Italia	9.390	16,81	Países Bajos	435.000	13,99	Países Bajos	263,63
3	Rumanía	9.110	16,31	Polonia	376.000	12,09	Alemania	154,09
4	Grecia	2.900	5,19	Italia	232.680	7,48	Polonia	139,26
5	Polonia	2.700	4,83	Grecia	135.810	4,37	Finlandia	134,00
6	Bulgaria	2.340	4,19	Rumanía	105.210	3,38	Austria	91,21
7	Países Bajos	1.650	2,95	Hungría	84.990	2,73	España	68,88
8	Francia	1.400	2,51	Bulgaria	46.790	1,50	Hungría	60,70
9	Hungría	1.400	2,51	Portugal	41.280	1,33	Grecia	46,83
10	Portugal	1.060	1,90	Bélgica	35.100	0,	Chequia	40,23

Tabla 4: Clasificación de las CCAA por superficie cultivada (ha), por producción total (T) y por rendimiento de producción (T/ha) (MAPA, 2022)

Ranking	CCAA	Superficie	%	CCAA	Producción (T)	%	CCAA	Rendimiento (T/Ha)
1	Andalucía	14.565	66,06	Andalucía	1.077.000	70,48	R. De Murcia	197,00
2	R. De Murcia	1.745	7,91	R. De Murcia	197.430	12,91	Extremadura	175,89
3	Castilla-La Mancha	1.070	4,85	Galicia	57.900	3,79	C. Valenciana	125,71
4	Galicia	1.049	4,76	C. Valenciana	55.860	3,65	Andalucía	122,49
5	Navarra	930	4,22	Castilla-La Mancha	42.160	2,76	Canarias	115,84
6	C. Valenciana	918	4,16	Navarra	36.470	2,39	Madrid	113,12
7	Extremadura	519	2,35	Extremadura	22.180	1,45	Galicia	100,01
8	Canarias	251	1,14	Canarias	17.540	1,15	Aragón	82,97
9	La Rioja	236	1,07	La Rioja	5.910	0,39	Navarra	81,82
10	País Vasco	199	0,90	Cataluña	4.420	0,29	La Rioja	65,00

INTRODUCCIÓN

Tabla 5: Clasificación de las provincias por superficie cultivada (ha), por producción total (T) y por rendimiento de producción (T/ha) (MAPA, 2022)

Ranking	Provincia	Superficie	%	Provincia	Producción (T)	%	Provincia	Rendimiento (T/ha)
1	Almería	12.583	57,07	Almería	979.894	64,09	Badajoz	260,14
2	Murcia	1.745	7,91	Murcia	197.436	12,91	Murcia	197,00
3	Navarra	930	4,22	Granada	47.018	3,08	A Coruña	152,70
4	Granada	832	3,77	Navarra	36.473	2,39	Valencia	146,39
5	Albacete	594	2,69	Alicante	28.450	1,86	Alicante	125,00
6	Cádiz	450	2,04	A Coruña	27.051	1,77	Granada	121,44
7	Badajoz	429	1,95	Valencia	24.180	1,58	Las Palmas	121,37
8	Alicante	421	1,91	Albacete	24.057	1,57	Madrid	113,12
9	Malaga	418	1,90	Cádiz	21.950	1,44	Almería	110,12
10	Ciudad Real	381	1,73	Malaga	18.883	1,23	S.C. de Tenerife	108,75

1.5. El injerto en hortalizas y su uso e interés en el pimiento

1.5.1 Generalidades del injerto en la agricultura

El término “injerto” tiene la misma raíz de insertar, ensartar, ingerir o en su forma antigua enxerir. La palabra latina de la que proceden estas denominaciones es *insitio*, siendo *insitivus* el árbol o arbusto injertado. Se trata de la injerencia de una planta en otra, ensartar una ramilla de una planta en el trozo de otra (Boutelou, 2007). En sí mismo, el injerto es un fenómeno artificial, en el que se logra una vegetación mixta de dos individuos diferentes y ninguno cambia su forma de ser y sobreviven con el auxilio de ambos, siendo el patrón con sus raíces aportan el alimento al injerto y este lo absorbido por las hojas las transmite al patrón.

El injerto es una de las técnicas más antiguas que conoce la humanidad para domesticar la naturaleza. Los chinos conocían la práctica de injertar plantas leñosas al menos 1.000 años a C. Aristóteles también habla del injerto en numerosos de sus escritos. En la época romana, los árboles frutales se injertaban mediante diversas técnicas. En el Renacimiento inglés, los injertos eran una práctica habitual. Se hacía coincidir el “*cambium*” de las dos partes para facilitar la fusión, aunque se desconocían los motivos.

A partir de estas fechas el injerto ha seguido utilizándose, desarrollándose diferentes técnicas y realizándose en diferentes cultivos herbáceos como cucurbitáceas y solanáceas para prevenir enfermedades de suelo. Desde la aparición de los plásticos de invernaderos se hicieron cultivos más repetitivos y de larga duración, lo que permitió la difusión y aprendizaje de las técnicas del injerto (Lee, 1994).

Hoy en día es una de las técnicas más utilizadas como sistema de multiplicación tanto en árboles frutales, en hortícolas y en jardinería según explica Claudio Boutelou en su libro “Tratado del injerto”, siendo habitual en agricultura y horticultura para mantener variedades de cultivo que hubieran desaparecido.

El objetivo de la planta injertada es dirigir su energía hacia el desarrollo de la planta injertada, centrándose especialmente en la unión del portainjerto y la variedad. En esencia, se trata de la unión de la parte basal del portainjerto con

INTRODUCCIÓN

la parte apical de la variedad, creando así una nueva planta. Para que esta unión sea viable, ambas plantas deben encontrarse en el mismo estado fenológico (Martínez *et al.*, 2010). Durante la fase de soldadura, la planta debe estar expuesta a condiciones ambientales óptimas para su aclimatación. Se prevé que la planta recién injertada sea capaz de soportar condiciones vegetativas y productivas adversas en ambos lados.

Las raíces del patrón, generalmente más vigorosas, son capaces de absorber agua y nutrientes de forma más eficaz que la variedad no injertada. Sin embargo, el efecto beneficioso del patrón varía normalmente con la variedad injertada (Lee, 1994).

1.5.2. Aspectos específicos del injerto en pimiento. Usos e intereses

La importancia de los injertos está ampliamente reconocida en todos los sistemas agrícolas, ya que se trata de una técnica limpia y sin impacto medioambiental aparente. Al mismo tiempo, la prohibición y eliminación de determinados productos para la desinfección de los suelos agrícolas ha dado lugar a un aumento de la investigación sobre la utilización de injertos en todos los ámbitos agrícolas (González *et al.*, 2008). El injerto es una técnica que mejora la resistencia o tolerancia de las plantas a los patógenos del suelo. El injerto da lugar a la producción de plantas más grandes y mayores rendimientos totales (López-Martín *et al.*, 2009).

En la actualidad, existe una clara tendencia en la agricultura a reducir su dependencia de los productos químicos de síntesis sin reducir el número de hectáreas dedicadas a la agricultura, ni afectar a la producción ni a la calidad de los alimentos. Ante esta situación, una de las alternativas más prometedoras ha sido el uso del injerto. En efecto, el injerto evita la necesidad de desinfectar la zona de plantación, lo que confiere una ventaja ecológica sostenible a los sistemas de producción integrados y ecológicos (Ricard y Louws, 2008). Una forma de evitar el estrés medioambiental desde la perspectiva de la gestión integrada de cultivos ecológicos es la utilización de plantas injertadas como estrategia de adaptación.

El injerto aporta vigor y rusticidad para lograr paliar los efectos de la fatiga del suelo, principalmente, en los dos primeros años (Lacasa *et al.*, 2002). Si se realizan varios cultivos seguidos es necesario, como ya se sabe, una desinfección del terreno (Ros *et al.*, 2007).

En parte debido a su extraordinaria importancia económica y social el cultivo del pimiento supone una persistente explotación del suelo. Termina siendo un monocultivo que, junto con la intensificación del proceso de producción, lleva al claro desarrollo de enfermedades del suelo (Calatayud *et al.*, 2013).

Además, el estrés abiótico, en particular la salinidad y la sequía, puede provocar una disminución pronunciada de la producción y la calidad (De Pascale *et al.*, 2003). De hecho, en el cultivo del pimiento, la cuestión de los suelos salinos se considera una de las preocupaciones medioambientales más importantes.

El pimiento para injerto sólo es compatible con otros genotipos del género *Capsicum*, ya que presentan una baja afinidad con otras especies de *Solanaceas* (Morra, 1997).

Una de las principales aplicaciones del injerto de pimiento es el control de enfermedades transmitidas por el suelo, incluyendo *Meloidogyne incognita* y *Phytophthora* spp. que son frecuentes en las regiones productoras de pimiento (López-Marín *et al.*, 2016) y durante el cultivo en invernadero.

También es de interés destacar otros usos potenciales del portainjerto en pimiento, entre los que se encuentran el aumento de la producción de la variedad injertada y la obtención de frutos de mejor calidad, mayor resistencia a estreses abióticos y producción más temprana (Fernández *et al.*, 2006).

Se ha comprobado una clara relación entre el vigor del patrón y la producción de la planta, ya que no se ha observado pérdida de producción en las plantas injertadas (Lacasa *et al.*, 2002).

Los tipos de injertos más utilizados en pimiento son:

Púa terminal que se realiza en el patrón un corte por encima de la 3 hoja y se hace una incisión en el centro del tallo hacia debajo de unos 1,5 cm. El brote de la variedad a injertar otro corte por debajo de la 2-3 hoja más joven y se hace este en bisel en el extremo inferior y se introduce

INTRODUCCIÓN

la púa en la hendidura del portainjerto y se une con cinta. Al cabo de unos diez días ya se puede usar para trasplantar.

Empalme que se realiza cuando el portainjerto y la variedad están con unos 1,5 cm de diámetro de tallo, se corta en bisel por debajo de los cotiledones el portainjerto y la variedad también en bisel con un ángulo igual que el patrón y con la ayuda de unas pinzas de injertar se ayuda para que las dos zonas estén en contacto y al cabo de unos 14-21 días ya se pueden utilizar las plantas para su trasplante.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Debido al cambio climático se tienen que llevar a cabo estrategias eficaces para impulsar la producción de alimentos, en donde la agricultura tendrá desafíos relacionados con la seguridad alimentaria, la sostenibilidad, la disponibilidad y el uso eficiente de recursos.

Los impactos del cambio climático afectarán a la disponibilidad de agua, lo que a su vez suele conllevar una pérdida global de su calidad por salinización y necesitaremos una agricultura con un uso más eficiente del agua y adaptada a problemas de salinización progresiva. Asimismo, no solo es importante la importancia comercial del pimiento y su valor comercial y añadido para el consumidor.

Por todo ello, en la presente tesis doctoral se trabaja bajo el planteamiento de las siguientes hipótesis:

1. Los pimientos y chiles que poseen una diversidad genética y varietal mayor presentan una mayor tolerancia al déficit hídrico y a la salinidad.
2. Las variedades de pimientos y chiles cultivadas bajo condiciones de estrés abiótico incrementan los niveles de antioxidantes, vitaminas y otros parámetros de calidad interna del fruto, en comparación con las variedades cultivadas bajo condiciones óptimas.
3. La combinación de ciertas variedades de pimientos y chiles con portainjertos específicos resulta en un rendimiento superior, mayor tamaño de fruto y una mejor calidad nutricional, especialmente en condiciones de cultivo que involucran estrés hídrico y salinidad del agua de riego.

De este modo, en esta tesis se ha abordado, de forma general, estudiar el efecto que i) el genotipo (variedad o especie), empleado directamente como variedad o como portainjerto, ii) las condiciones de cultivo o estrés abiótico, iii) sus interacciones y iv) la hibridación entre variedades e incluso el modo de herencia, tienen sobre el rendimiento, tamaño de fruto y calidad nutricional del pimiento, con objeto de identificar las mejores combinaciones de variedad (o portainjertos) y condiciones de cultivo (con especial énfasis en salinidad del agua de riego y déficit hídrico) para el mejor comportamiento agronómico y contenido en antioxidantes de este cultivo.

OBJETIVOS

Para tal fin, en la presente tesis doctoral se plantean los siguientes objetivos parciales:

Objetivo 1:

Evaluar de forma preliminar una colección de accesiones con respuestas a diferentes condiciones agronómicas de cultivo como pueden ser al aire libre o dentro de invernaderos, estudiando líneas parentales e híbridos, comparando las diferencias entre peso del fruto, ácido ascórbico y compuestos fenólicos tanto en frutos maduros verdes como maduros y compuestos carotenoides solamente en frutos maduros rojos.

Objetivo 2:

Evaluar la respuesta de una colección de accesiones *Capsicum* como portainjertos de variedades comerciales a efectos de determinar su potencial para mitigar el impacto de estreses abióticos relacionados con el cambio climático en producción agraria: riego deficitario (i.e. sequía) y salinidad.

Objetivo 3:

Estudiar el efecto de la hibridación entre variedades de *Capsicum* sobre los principales factores de calidad nutricional de este cultivo: ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides en los dos principales estados de madurez comercial. Y, con ello, determinar si esta estrategia permite mejorar los niveles de estos compuestos y si existe algún valor predictivo de los padres sobre el potencial comportamiento de los híbridos.

3. FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. LÍNEA EXPERIMENTAL 1: Estudio preliminar de la respuesta del pimiento a diferentes condiciones agronómicas

3.1.1. Metodología

3.1.1.1. Material vegetal

Los pimientos *Capsicum* son una de las hortalizas más importantes del mundo, ya que son ricos en muchos compuestos bioactivos, especialmente ácido ascórbico o vitamina C (Dewitt & Bosland, 2009). Los pimientos se cultivan en diversas condiciones agroclimáticas y, dependiendo de la estación del año, se cultivan a campo abierto o protegidos. La respuesta de los cultivares a las condiciones de cultivo puede ser diferente dependiendo de la condición de cultivo (Rodríguez-Burruezo *et al.*, 2009). También se debe tener en cuenta el estado de maduración, ya que los pimientos se pueden utilizar tanto completamente maduros como verdes, y la respuesta de los cultivares podría ser diferente dependiendo de este factor (Bosland & Votava, 2000).

Se evaluaron seis cultivares de *C. annuum*, Guindilla Ibarra, Pasilla, Chile Árbol, Najerano y dos California Wonder, de frutos rojos y amarillos: CWr y CWy. Las cuatro primeras corresponden a variedades tradicionales que han sido evaluadas y multiplicadas bajo condiciones de autofecundación durante varias generaciones en el grupo de Mejora de Capsicum del IU COMAV. Por lo que se trata de líneas cuasi puras donde no se ha advertido heterogeneidad morfológica. El material vegetal fue cultivado bajo dos condiciones agronómicas muy diferentes: i) producción ecológica, en suelo, al aire libre en ciclo de primavera-verano 2019 (OF) y ii) producción convencional, en macetas de sustrato, bajo invernaderos del COMAV (Campus de Vera, UPV), en ciclo de otoño-primavera 2018/19 (GH). Las plantas se manejaron siguiendo las prácticas habituales.

3.1.1.2. Muestreo de frutos

En el estudio se recogieron datos sobre el rendimiento y el peso medio de los frutos de cada planta a lo largo de la temporada de recolección, de marzo a junio de 2019. Los valores medios por bloque se calcularon a partir de tres plantas, y después se obtuvo una media final a partir de los datos de los cinco

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

bloques (n = 5) para cada combinación de variedad x estado de madurez x método de cultivo

Asimismo, se realizaron determinaciones del contenido en ácido ascórbico (CAA). Para ello se prepararon 5 réplicas, tomando muestras de frutos de tres plantas de cada bloque para cada réplica (cada réplica a partir de frutos de un bloque), y para ambos estados de madurez, inmaduro y completamente maduro. Estas muestras se enviaron a los laboratorios de la UPV donde se pesaron y posteriormente se lavaron, se cortaron en trozos pequeños y se conservaron (-40°C) hasta la determinación del ácido ascórbico. El CAA se estimó mediante un método espectrofotométrico de alta precisión y adaptado al pimiento, siguiendo la metodología descrita por Ribes-Moya *et al.* (2018), a partir de la reducción del ácido molibdofosfórico amarillo a azul de fosfomolibdeno, utilizando un reflectómetro RQflex plus y un Reflectoquant (Merck, Darmstadt, Alemania). Previamente, muestras de fruto de 15 g se homogeneizaron mediante una batidora industrial, mezclándolas con agua destilada para facilitar la mezcla. Una vez homogeneizada la mezcla se filtró con una malla de 0,5 mm en un cubo de ensayo y se llenó con agua destilada hasta 50 ml. Los resultados se expresaron en mg por 100 g de peso fresco, según la fórmula:

$$\text{CAA (mg/100 g)} = 0.1 \times \frac{\text{Volumen (ml)} \times \text{Valor medido (mg/l)}}{\text{peso fruto (g)}}$$

Al tratarse de un ensayo piloto, con una muestra limitada y no necesariamente representativa de la población, sólo se valoran tendencias entre estado y/o condiciones de cultivo y/o estado madurez, en el que se limitó a mostrar la barra de desviación estándar correspondiente a cada combinación de variedad x estado de madurez x sistema de cultivo.

3.1.2. Resultados y discusión

Del presente estudio preliminar se pudieron observar varios aspectos importantes. Así, en el peso del fruto, se observó un notable efecto de la variedad o genotipo, con cayenas de pequeño tamaño como los chiles de árbol (< 10 g) y otras más grandes como la Guindilla y la Pasilla (10-40 g), mientras que las variedades de fruto grueso presentaron pesos de fruto muy superiores (50-250 g) (Figura 6A). Otro aspecto relevante fue que, especialmente en estado maduro,

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

la mayoría de los cultivares mostraron valores más altos en condiciones de invernadero que al aire libre, como se puede observar en Pasilla, Najerano y California Wonder amarillo (Figura 6A). Por otra parte, en algunos casos concretos, los frutos completamente maduros fueron más grandes que los inmaduros en invernadero (Najerano y California rojo), mientras que este hecho no fue tan claro en condiciones de cultivo al aire libre, con la excepción del Najerano (Figura 6A).

Respecto al contenido en ácido ascórbico, en muchos cultivares la maduración incrementó sus niveles, especialmente en invernadero, donde, a excepción de California amarillo, todos los cultivares mostraron mayores niveles en estado maduro (Figura 6B). Este aspecto fue menos obvio al aire libre, donde sólo Guindilla y Pasilla presentaron niveles más altos en estado maduro (Figura 6B).

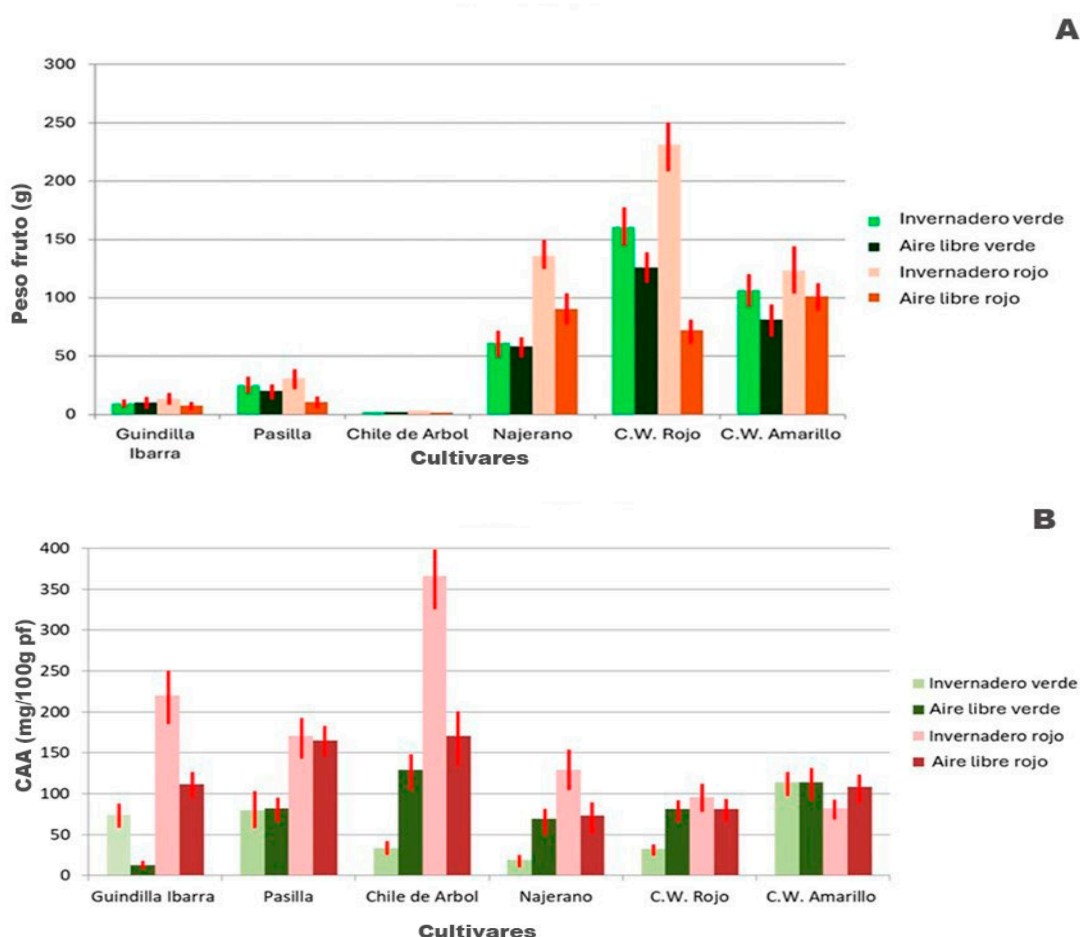


Figura 6: Peso fruto (g, A) y contenido en ácido ascórbico (CAA, mg/100 g, B) en las variedades evaluadas. Líneas rojas en la cima de cada barra indican desviación estándar para cada combinación de variedad, estado de madurez y sistema de cultivo (n = 5).

3.2. LÍNEA EXPERIMENTAL 2: Estudio de colecciones de *Capsicum* como portainjertos de variedades comerciales en condiciones de riego deficitario y salinidad

3.2.1. Metodología

3.2.1.1. Materiales vegetales y combinaciones de injertos

El cv. 'Herminio' (Syngenta Seeds, abreviado como Herm en las tablas), una variedad comercial de *Capsicum annuum*, correspondiente al tipo Lamuyo y cultivada profusamente en la zona del Campo de Cartagena (Murcia, España) durante décadas, se utilizó como referencia en el presente experimento. Además, se evaluaron varias accesiones de *Capsicum* como portainjertos: dos portainjertos comerciales 'Robusto' (Syngenta, España) y 'Oscos' (Ramiro Arnedo, España); tres variedades locales de *Capsicum annuum* de la zona seca meridional de EEUU tipo 'Chimayo' (abreviatura 'Chimayo'), 'Jalapeño E10397' (JE10397) y 'Numex Heritage' (NMh), proporcionadas por The Chile Pepper Institute (Las Cruces, Nuevo México, EE.UU.); y otras tres accesiones de *Capsicum* sp. de la región andina: U19235 y U26484 (*Capsicum chinense*) y U27610 (*Capsicum baccatum*).

Trabajando sobre estos materiales, se evaluaron diez materiales o combinaciones de plantas diferentes: 'Herminio' no injertado, 'Herminio' autoinjertado ('Herm'/'Herm') y los ocho injertos de 'Herminio' (como parte aérea) sobre las diferentes accesiones utilizadas como portainjertos: Herm'/'Robusto', 'Herm'/'Oscos', 'Herm'/'NMh', 'Herm'/'Chimayo', 'Herm'/'JE10397', 'Herm'/'U19235', 'Herm'/'U26484 y 'Herm'/'U27610.

3.2.1.2. Injertos, diseño experimental y condiciones de cultivo

Las semillas del cv. 'Herminio' fueron proporcionadas por el vivero La Sala (San Javier, comarca de Campo de Cartagena, España) y las semillas de las diferentes accesiones utilizadas como patrones fueron proporcionadas por el grupo de Mejora Genética de *Capsicum* del Banco de Semillas del COMAV (Universidad Politécnica de Valencia). Las semillas se sembraron en octubre de 2020 y se gestionaron en las instalaciones del vivero de La Sala y los injertos fueron realizados por los técnicos de La Sala en el lugar de plantación. Las

plantas se trasplantaron en diciembre de 2020 en un invernadero experimental de El Mirador (El Mirador, Campo de Cartagena, España) y se trasplantaron al azar cinco bloques (n=5) de tres plantas cada uno por combinación de plantas y tratamiento.

El material vegetal fue cultivado por el personal de El Mirador durante la campaña habitual de otoño-primavera de pimiento en la zona del Campo de Cartagena en 2020-21. Las plantas se manejaron siguiendo las prácticas habituales de la zona. Los materiales fueron sometidos a tres tratamientos diferentes: i) solución de fertirrigación control (1g/l de un fertilizante comercial soluble en agua 15N-2,2P-24,9K, EC 1,1 dS/m); ii) simulación de sequía: 30% de reducción de la fertirrigación de control; y iii) simulación de salinidad: solución de fertirrigación de control salinizada artificialmente mediante la aplicación de 40 mM NaCl para alcanzar una CE de $5,8 \pm 0,2$ dS/m.

3.2.1.3. Muestreo de frutos y caracteres evaluados

El rendimiento y el peso de los frutos se registraron en cada planta a lo largo de la temporada de recolección (desde finales de marzo hasta junio de 2021). Se estimó un valor medio por bloque a partir de las tres plantas correspondientes. A continuación, se obtuvo una media final con los datos de los cinco bloques para cada combinación de plantas y tratamiento (n = 5). Para preparar una repetición (n = 5 por combinación de plantas y tratamiento), se tomaron muestras de frutos de las tres plantas de cada bloque en los estados inmaduro y completamente maduro. Las muestras de fruta se enviaron inmediatamente a los laboratorios de la UPV, se lavaron, se cortaron en trozos de 3 mm y se dividieron en dos submuestras: i) congeladas en N y conservadas en tubos Falcon a -86 °C para la determinación de ácido ascórbico y ii) liofilizadas y conservadas en nevera (5 °C seco y oscuro) para los fenoles totales.

El contenido en ácido ascórbico (CAA) y fenoles totales (FT) se estimaron siguiendo diferentes métodos espectrofotométricos de alta precisión y adaptados a pimientos, siguiendo la metodología descrita por Ribes-Moya *et al.*, (2018). El CAA se estimó reflectométricamente, a partir de la reducción del ácido molibdofosfórico amarillo a azul de fosfomolibdeno, utilizando un reflectómetro RQflex plus y un Reflectoquant (Merck, Darmstadt, Alemania). Las muestras de

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

fruta fresca de 15 g se homogeneizaron mediante una batidora industrial, mezclándolas con agua destilada para facilitar la mezcla. Una vez homogeneizada la mezcla se filtró con una malla de 0,5 mm en un cubo de ensayo y se llenó con agua destilada hasta 50 ml. Los resultados se expresaron en mg por 100 g de peso fresco, según la fórmula:

$$\text{CAA (mg/100 g)} = 0.1 \times \frac{\text{Volumen (ml)} \times \text{Valor medido (mg/l)}}{\text{peso fruto (g)}}$$

La determinación de FT se realizó según el método de Folin-Ciocalceu, reacción colorimétrica cuantificada midiendo la absorbancia a 750 nm, refiriendo los resultados a una curva patrón de ácido clorogénico, según lo reportado por Ribes Moya *et al.*, (2018). Antes del análisis, cada muestra se sometió a extracción: 125 mg de muestra liofilizada más 5 ml de solución de extracción (700 ml de acetona + 5 ml de ácido acético glacial + 295 ml de agua Milli-Q) colocados en tubos de centrifuga Falcon de 15 ml, incubados y agitados (1 d, oscuridad, temperatura ambiente). A continuación, las muestras se centrifugaron (3 min, 3500 rpm) y se recogió 1,5 ml de sobrenadante en un tubo de microcentrifuga y se almacenó (- 80 °C). Para los análisis, las muestras se centrifugaron de nuevo (5 min, 10000 rpm) y 70 µl de la muestra se mezclaron con 0,5 ml de reactivo Folin-Ciocalteu (en dilución de agua al 10%, v/v) y se incubaron 5 min a temperatura ambiente. Después, se añadieron 0,5 ml de una solución saturada de Na₂CO₃ (60 g/l) y la mezcla se incubó 90 min (oscuridad, temperatura ambiente). A continuación, se colocó una alícuota (200 µl) de cada muestra o estándar en una microplaca de 96 pocillos y se midió la absorbancia a 750 nm, utilizando un lector de microplacas (Bio-Rad iMark™). A partir de la concentración de materia seca de cada muestra, los resultados se expresaron como mg de ácido clorogénico por 100 g de peso fresco.

3.2.1.4. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza ANOVA de los factores principales i) material vegetal (cv. de referencia 'Herminio' y combinaciones de injertos con 'Herminio' como parte aérea), ii) tratamiento (control, sequía y salinidad), iii) estado de maduración del fruto (inmaduro y completamente maduro), así como,

iv) sus interacciones, tanto en datos originales como transformados (para adaptarlos a la distribución normal), utilizando el programa Statgraphics Centurion XVI (StatPoint Technologies, Inc; Warrenton, Virginia, EE.UU.). Se utilizó un modelo lineal para el ANOVA general: $X_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + (\alpha \times \beta)_{ij} + (\alpha \times \gamma)_{ik} + (\beta \times \gamma)_{jk} + E_{ijk}(l)$. X_{ijkl} es el valor para la muestra de frutos l del material vegetal i , el tratamiento j y la fase de maduración k , siendo μ la media general; A_i : efecto del genotipo i ; B_j : efecto del sistema de cultivo j ; C_k : efecto de la fase de maduración k ; $(\alpha \times \beta)_{ij}$: interacción entre el material vegetal i y el tratamiento j ; $(\alpha \times \gamma)_{ik}$: interacción entre el material vegetal i y el estado de maduración k ; $(\beta \times \gamma)_{jk}$: interacción entre el tratamiento j y el estado de maduración k y $E_{ijk}(l)$: término de error o efecto de la muestra de frutos l de la combinación de material vegetal i , tratamiento j y estado de maduración k .

Además, también se realizaron ANOVAs adicionales para los caracteres analíticos, CAA y FT, considerando por separado los estados inmaduros y las totalmente maduros. El modelo lineal utilizado en estos casos fue $X_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (\alpha \times \beta)_{ij} + E_{ij}(k)$, donde X_{ijk} es el valor en un estado de maduración específico para la muestra de fruto k del material vegetal i y el tratamiento j ; siendo μ la media general; A_i : efecto del material vegetal i ; B_j : efecto del tratamiento j ; $(\alpha \times \beta)_{ij}$: interacción entre el material vegetal i y el tratamiento j y $E_{ij}(k)$: efecto de la muestra de fruto k de la combinación de material vegetal i y tratamiento j . No se encontraron diferencias significativas en los ANOVA que comparaban los datos originales y los transformados, por lo que los resultados se mostraron considerando los datos originales no transformados.

Finalmente, con objeto de valorar de forma ilustrativa y simplificada la interacción de las condiciones de estrés con la intensidad del cambio en la composición del fruto con la maduración, se han incorporado unos estudios de tendencias preliminares. En ellos, se representa a modo de regresión como afecta la maduración (maduro frente a inmaduro) a la ratio [valor bajo estrés / valor condiciones control] en cada variedad para CAA y FT. Un valor superior a 1 en esta comparativa “maduro frente a inmaduro” sugeriría que el estrés favorece, más que las condiciones control, el incremento del compuesto con la maduración en la variedad. Un valor inferior a 1 indicaría lo contrario. Estas

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

comparaciones ilustrativas se presentan en las Figuras 7 y 8 y, por ser un recurso visual y complementario al resto del trabajo, no incluye estudio estadístico.

3.2.2. Resultados y discusión

3.2.2.1. Análisis de variaciones

Para el rendimiento y el peso del fruto, el ANOVA general reveló que todos los factores, es decir, la combinación de plantas (P), el tratamiento (T) y su interacción (P x T) contribuyeron significativamente a la variación encontrada en ambos caracteres. Según la magnitud de los cuadrados medios correspondientes, el tratamiento proporcionó la mayor contribución, seguido del material vegetal y de la interacción (Tabla 6). No se estudiaron más efectos en estos caracteres ya que todos los frutos, independientemente de su estado de maduración, se ponderaron para estimar el peso del fruto y el rendimiento total por planta. Por lo tanto, el estado de maduración (R) y su interacción con la combinación de plantas o el tratamiento no se incluyeron en este estudio.

En el caso de los caracteres de composición del fruto, el ANOVA general detectó una contribución significativa de todos los factores principales, es decir, material vegetal, tratamiento y estado de maduración, así como de sus interacciones emparejadas, es decir, P x T, P x R y T x R, a la variación observada, con la única excepción de T x R en los fenoles totales. Además, la magnitud de los cuadrados medios reveló una contribución muy elevada del efecto de maduración, considerablemente mucho mayor que la combinación de plantas y el tratamiento. Asimismo, las interacciones alcanzaron niveles de contribución similares al material vegetal, o incluso superiores como T x R, sugiriendo que los materiales vegetales podrían comportarse de forma diferente al cambiar entre tratamientos, o que los cambios de composición con el proceso de maduración podrían ser diferentes entre materiales vegetales. Por esta razón, y teniendo en cuenta la gran contribución de los estados de maduración, también se realizaron ANOVA específicos para cada estado de maduración para simplificar la interpretación de los componentes de la variación.

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 6. Tabla ANOVA correspondiente a los cuadrados medios (CM) y grados de libertad (g.l.) de cada factor principal y las interacciones entre ellos general (todos los factores considerados conjuntamente. superior) y específica para cada estado de maduración del fruto (inmaduro y completamente maduro. inferior) para rendimiento, peso del fruto, contenido en agua, contenido en ácido ascórbico (CAA) y fenoles totales (FT).

Factor	Peso		Rendimiento		Agua		CAA		FT			
	g.l.	CM	CM	g.l.	CM	CM	CM	CM				
General												
Material vegetal (P)	9	21.82	***	235	**	9	8.64	***	1221	***	6207	***
Tratamiento (T)	2	76.47	***	456	***	2	18.44	***	64259	***	55542	***
Maduración (R)						1	302.91	***	116336	***	398146	***
Interacciones												
PxT	18	15.64	***	164	**	18	4.85	***	609	*	8273	***
PxR						9	4.07	***	801	**	3272	***
TxR						2	8.97	***	8178	***	203	NS
Error	129	3.67		65		258	1.02		312		721	
Inmaduros												
Específico de la fase de maduración												
Material vegetal (P)						9	2.72	***	827	***	5771	***
Tratamiento (T)						2	19.20	***	13319	***	26468	***
Interacciones												
PxT						18	2.03	***	358	*	5606	***
Error						120	0.39		166		417	
Maduros												
Material vegetal (P)						9	9.99	***	1195	**	4213	***
Tratamiento (T)						2	8.21	***	59118	***	31036	***
Interacciones												
PxT						18	11.98	***	1005	**	4761	***
Error						120	0.42		391		827	

NS y *, ** y *** indican no significativo para una probabilidad $p > 0,05$ y significativo para $p < 0,05$, $0,01$ y $0,001$, respectivamente, según el estadístico F.

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ANOVA para frutos inmaduros encontró que todos los factores, combinación de plantas, tratamiento y su interacción contribuyeron significativamente a la variación del contenido de agua, ácido ascórbico y fenólicos, particularmente el tratamiento y, en menor medida, el material vegetal y la interacción P x T. Esta tendencia fue particularmente notable en CAA, donde el cuadrado medio fue 15 veces y 40 veces mayor respectivamente que el del material vegetal y la interacción P x T (Tabla 6). Finalmente, se encontró una tendencia similar para los frutos completamente maduros, donde todos los factores contribuyeron significativamente a la variación de los rasgos analíticos, y particularmente el tratamiento en CAA (Tabla 6).

3.2.2.2. Caracteres de productividad

Rendimiento

Se encontró un rango de valores de rendimiento bajo condiciones de control para los diferentes materiales vegetales evaluados, sugiriendo diferentes niveles de compatibilidad, altamente dependientes del genotipo utilizado como portainjerto. El cultivar 'Herminio' utilizado como referencia, alcanzó niveles de rendimiento satisfactorios (10 kg/m^2) y muchos portainjertos proporcionaron rendimientos similares o incluso ligeramente superiores, como el comercial 'Oscos' y los experimentales 'Numex Heritage', 'Chimayo', U26484 y U27610 (Tabla 7). Finalmente, el otro portainjerto comercial 'Robusto' proporcionó rendimientos ligeramente inferiores, mientras que el jalapeño JE10397 y particularmente el U19235, así como el autoinjertado 'Herminio', mostraron los rendimientos más pobres (Tabla 7).

En muchos casos, se ha demostrado (y utilizado comercialmente) que los portainjertos mejoran el vigor y el rendimiento, especialmente en tomate y berenjena (Djidonou *et al.*, 2020; Grieneisen *et al.*, 2018; Cerruti *et al.*, 2021). Sin embargo, nuestros resultados confirman que la variedad 'Herminio' es una variedad bien adaptada a las condiciones de invernadero del Campo de Cartagena de España, siendo un referente del tipo varietal 'Lamuyo' en esta zona de producción desde hace años (López-Marín *et al.*, 2013; Syngenta Vegetables Seeds Global, 2024). De hecho, ninguna de las combinaciones de injertos mejoró el rendimiento de 'Herminio' ($10\text{-}11 \text{ kg/m}^2$) (Tabla 7). Otra explicación podría ser el hecho de que, normalmente, los portainjertos comerciales son F1 y, por tanto, muchos de ellos podrían aportar su heterosis híbrida a la parte aérea, mientras que nuestros materiales experimentales siguen siendo simplemente variedades locales. Probablemente, los cruces con otras fuentes mejorarían su vigor como portainjertos.

Además, la drástica disminución del rendimiento observada en 'Herminio' auto injertado proporciona una estimación del estrés que el injerto puede causar en la púa. Por el contrario, como se ha mencionado anteriormente, otros genotipos, incluyendo accesiones de otras especies como *Capsicum chinense* U26484 y *Capsicum baccatum* U27610, mostraron un rendimiento similar como

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 7. Valores medios de rendimiento (kg/m²) y peso del fruto (g) en condiciones de control, déficit hídrico y salinidad

Material vegetal	Control		Sequia		Salinidad	
Producción (Kg/m²)						
Herm	10.05	d	4.14	b	2.90	ab
Herm/Herm	5.38	a	4.13	ab	2.60	a
Herm/Robusto	8.12	b	4.38	b	2.98	ab
Herm/Oscos	10.76	d	6.51	d	4.27	c
Herm/NMh	9.94	d	5.60	e	3.57	b
Herm/Chimayo	10.29	d	3.06	a	3.39	b
Herm/JE10397	6.32	ab	2.41	a	3.38	b
Herm/U19235	5.38	a	3.14	a	2.81	ab
Herm/U26484	10.14	d	4.87	bc	2.25	a
Herm/U27610	9.40	c	5.15	bc	4.01	bc
Media	8.58	C	4.34	B	3.22	A
peso fruto (g)						
Herm	215	b	173	b	158	b
Herm/Herm	220	b	175	b	135	a
Herm/Robusto	242	c	192	c	149	b
Herm/Oscos	183	a	155	ab	187	cd
Herm/NMh	176	a	195	c	209	e
Herm/Chimayo	162	a	196	c	169	e
Herm/JE10397	229	bc	223	d	197	d
Herm/U19235	224	bc	165	a	164	bc
Herm/U26484	235	c	176	bc	132	a
Herm/U27610	196	ab	165	b	187	d
Media	208	C	182	B	169	A

Letras minúsculas diferentes dentro de las mismas condiciones de cultivo indican medias significativamente diferentes a $p < 0,05$, según la prueba estadística de Newman-Keuls. Las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a $p < 0,05$, según la prueba estadística de Newman-Keuls.

portainjertos que el propio 'Herminio'. Aunque otros autores no han reportado disminuciones significativas en el rendimiento de variedades autoinjertadas (Hollick y Kubora, 2022), nuestros resultados sugieren que, en el caso de algunas variedades de pimiento, el autoinjerto puede provocar lesiones en la conexión patrón-portainjerto, mientras que paradójicamente otros materiales utilizados como portainjertos pueden mostrar una mejor compatibilidad al proporcionar una mayor eficiencia en la restauración del floema y el xilema y promover entonces una mejor movilización de agua y nutrientes (Ropokis *et al.*, 2019).

En comparación, las condiciones de estrés provocaron disminuciones considerables del rendimiento, en particular el estrés salino. Así, por término medio, el déficit hídrico y el estrés salino disminuyeron el rendimiento en un 50% y un 62%, respectivamente, en comparación con el testigo y también todos los materiales vegetales mostraron notables disminuciones, particularmente bajo estrés salino (Tabla 7). Considerando el déficit hídrico, los valores de rendimiento oscilaron entre 2,41 y 6,51 kg/m² de JE10397 y 'Oscos', respectivamente, mientras que el cv. 'Herminio' y su autoinjerto alcanzaron unos 4 kg/m². En comparación, varios portainjertos como el comercial 'Oscos', seguido de 'Numex Heritage', *C. chinense* U26484 y *C. baccatum* U27610 alcanzaron ≥ 5 kg/m² (Tabla 7). Finalmente, el portainjerto comercial 'Robusto' dio valores intermedios (4 kg/m²), similares a los de 'Herminio', y el rendimiento del resto de portainjertos fue muy pobre (2-3 kg/m²) (Tabla 7). Estos resultados sugieren que los genotipos de *Capsicum* pueden diferir en la eficiencia del uso del agua en condiciones de sequía y que dicha capacidad también puede ser conferida a través del injerto, como se ha informado no sólo en pimientos, sino también en otras especies de cultivos (Djidonou *et al.*, 2013; Ropokis *et al.*, 2019; Padilla *et al.*, 2021; Taha *et al.*, 2022).

Las condiciones de estrés salino disminuyeron drásticamente el rendimiento, aunque todavía se encontraron diferencias significativas entre las accesiones. El rendimiento entre genotipos fue bastante similar al observado en déficit hídrico.

En este sentido, los valores de rendimiento estuvieron comprendidos entre 2,25 y 4,27 kg/m² de U26484 y 'Oscos', respectivamente, mientras que el

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

cv. 'Herminio' y su autoinjerto alcanzaron 2,5-3,0 kg/m² (Tabla 7). En comparación 'Oscos' y U27610, seguidos de 'Numex Heritage' y en menor medida Chimayo y JE10397, mostraron rendimientos en torno a 3,5-4,0 kg/m² (Tabla 7). Finalmente, el peor rendimiento bajo condiciones salinas correspondió a los portainjertos de *C. chinense* y a la variedad propia 'Herminio' (< 3 kg/m²) (Tabla 7). En comparación con la sequía, la salinidad en promedio y en la mayoría de las combinaciones provocó un mayor impacto, indicando que los pimientos son más sensibles a esta última, pero también que los genotipos utilizados como portainjertos podrían diferir en la forma en que metabolizan los iones salinos, tal como informaron Singh *et al.*, 2020 en tomates.

Entre las combinaciones evaluadas, identificamos algunas accesiones con un comportamiento satisfactorio como portainjertos en términos de rendimiento. Así, los portainjertos comerciales 'Oscos', 'Numex Heritage' y *C. baccatum* U27610 mostraron un rendimiento notable, similar o ligeramente superior a la referencia 'Herminio' en condiciones control, y un 25-50% superior bajo condiciones de déficit hídrico y salinidad, mientras que el resto de las accesiones mostraron un rendimiento pobre (Tabla 7). Todos estos resultados indican un rendimiento variable frente a condicionantes de déficit hídrico e incluso salinidad, dependiendo del genotipo, por lo que algunas accesiones pueden ser eficientes para mitigar el efecto de estos estreses abióticos en el cultivo de pimiento mediante la estrategia del injerto.

Peso del fruto

El peso del fruto también fue variable bajo condiciones de control entre las diferentes combinaciones evaluadas, oscilando entre 162 y 242 g en los portainjertos 'Chimayo' y 'Robusto', respectivamente (Tabla 7). En contraste con el rendimiento, el peso del fruto del cv. 'Herminio' (215 g) fue similar al valor medio y, en comparación, algunos portainjertos como 'Robusto' y *C. chinense* U26484, y en menor medida JE10397 y U19235, proporcionaron un efecto creciente a este carácter (Tabla 7). Por el contrario, 'Oscos', 'Numex Heritage' y 'Chimayo', proporcionaron un efecto decreciente en el peso del fruto. Estos hallazgos sugieren que el incremento en rendimiento proporcionado como portainjertos por algunos genotipos fue en detrimento del peso del fruto, mientras que lo contrario se encontró para los genotipos que permitieron bajos

rendimientos, es decir, el efecto de aumento en el rendimiento (biomasa) podría haber provocado frutos más pequeños, lo que debe ser considerado con cautela por los productores, particularmente cuando se dirigen a ciertos mercados de exportación que prefieren tamaños grandes. En realidad, este efecto no está claro ya que algunos autores han reportado que el injerto puede incrementar tanto el rendimiento como el tamaño y número de frutos, mientras que otros autores encontraron resultados diferentes (Kyriacou *et al.*,2017), sugiriendo que este efecto podría ser altamente dependiente de la especie y/o de la combinación púa-portainjerto.

En cuanto al comportamiento bajo condiciones de estrés, tanto la sequía como la salinidad causaron una disminución media significativa en el peso del fruto en comparación con las condiciones de control, en particular en este último caso (Tabla 7). Así, en el caso de déficit hídrico, el peso del fruto disminuyó en la mayoría de los casos, con la excepción de 'Numex Heritage', 'Chimayo' y JE10397. No obstante, algunas accesiones incluyendo las citadas y la comercial 'Robusto', pudieron mitigar como portainjertos el impacto de la sequía en este carácter, ya que alcanzaron valores superiores a 'Herminio' (≥ 190 g) en estas condiciones, particularmente JE10397 (Tabla 7). Las condiciones salinas también disminuyeron el tamaño de los frutos en todas las combinaciones, con la única excepción de 'Numex Heritage'. De hecho, el peso de la referencia 'Herminio' disminuyó hasta 158 g, que es aproximadamente el mínimo para su comercialización. Sin embargo, varios portainjertos proporcionaron un efecto beneficioso bajo estas condiciones altamente estresantes, permitiendo un tamaño de fruto considerablemente superior al de 'Herminio' (≥ 190 g), concretamente los comerciales 'Oscos', 'Numex Heritage', JE10397 y *C. baccatum* U27610 (Tabla 7).

Estos resultados sugieren que algunas accesiones pueden ser muy útiles como portainjertos, proporcionando rendimientos y tamaños de fruto similares o incluso superiores en condiciones controladas, pero sobre todo cuando la variedad (púa) se cultiva en condiciones más limitantes, momento en el que se puede observar el verdadero potencial de estos genotipos (Kyriacou *et al.*,2017).

En este sentido, cabe destacar que genotipos como 'Numex Heritage', 'Chimayo' o JE10397 pertenecen a tipos varietales profusamente cultivados en

el sur de Estados Unidos y norte de México, es decir, zonas áridas de los desiertos de Sonora y Chihuahua, e incluso las accesiones de *C. chinense* y *C. baccatum* también son originarias de las zonas áridas de Ecuador o del Altiplano andino (Pereira-Dias *et al.*, 2019). Así, como resultado de la adaptación a estas condiciones, estos materiales podrían haber acumulado un bagaje genético ventajoso para afrontar la sequía y/o la salinidad cuando se cultivan en condiciones comerciales.

3.2.2.3. Composición de los frutos inmaduros

Contenido en agua

En condiciones de control, el contenido de agua en los frutos inmaduros fue bastante similar entre las distintas combinaciones, aunque se encontraron ligeras diferencias significativas. Así, los frutos inmaduros del cv 'Herminio' no injertado mostraron un 92% de contenido en agua, mientras que los frutos de la mayoría de las combinaciones de injerto alcanzaron el 93- 94%, incluyendo el 'Herminio' autoinjertado (Tabla 8). Este hecho sugiere que, paradójicamente, las lesiones causadas por el injerto podrían resultar en una respuesta beneficiosa a nivel tisular que incrementa la movilización de agua hacia órganos aéreos como los frutos, tal y como exponen Ropokis *et al* (2019) y Gisbert-Mullor *et al* (2020).

Teniendo en cuenta las condiciones de estrés, en promedio, tanto la sequía como la salinidad causaron una disminución significativa, pero baja, del contenido de agua en los frutos inmaduros (0,77-1,23%) (Tabla 8), que, también puede ser considerado como un aumento de la materia seca, es decir, 6,63% bajo condiciones de control frente a 7,86% y 7,40% bajo sequía y salinidad, respectivamente. Estos resultados están de acuerdo con varios informes (por ejemplo, Van de Wal *et al.* 2017; Coban *et al.*,2020 Li *et al.*,2023), que describen un aumento de la materia seca en las estructuras aéreas debido a la sequía y/o a las condiciones de salinidad. Bajo estas condiciones, los frutos inmaduros de 'Herminio' no injertados mostraron niveles similares a los encontrados en condiciones control (en torno al 92%), aunque las combinaciones de injerto provocaron diferentes patrones de variación en este carácter. Esto fue más evidente en 'Herminio' autoinjertado, 'Robusto' comercial o JE10397, que

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 8. Valores medios de contenido de agua (%), contenido de ácido ascórbico (CAA, mg/100g pf) y fenoles totales (FT, mg/100g pf) en frutos inmaduros bajo condiciones de control, déficit hídrico y salinidad.

Material vegetal	Control		Sequia		Salinidad	
Contenido en agua (%)						
Herm	91.99	a	92.48	cd	92.26	b
Herm/Herm	93.53	b	93.45	f	92.50	bc
Herm/Robusto	93.81	b	92.83	dc	93.05	ef
Herm/Oscos	92.85	ab	92.29	c	91.59	a
Herm/NMh	93.83	b	92.14	c	92.84	de
Herm/Chimayo	93.91	b	91.44	ab	92.63	cd
Herm/JE10397	93.44	b	93.22	ef	93.29	f
Herm/U19235	93.69	b	90.98	a	92.80	cde
Herm/U26484	93.16	ab	91.57	b	92.21	b
Herm/U27610	93.44	b	90.97	a	92.81	cde
Media	93.37	C	92.14	A	92.60	B
CAA (mg/100g pf)						
Herm	103.20	ab	115.34	de	89.51	d
Herm/Herm	94.65	ab	108.50	cd	79.92	cd
Herm/Robusto	89.33	a	103.79	bcd	66.01	abc
Herm/Oscos	95.33	ab	81.08	a	59.60	a
Herm/NMh	108.05	b	88.78	ab	64.85	a
Herm/Chimayo	101.17	ab	97.67	abc	71.80	abc
Herm/JE10397	107.19	b	108.22	cd	70.90	abc
Herm/U19235	105.81	ab	101.62	bcd	79.06	bcd
Herm/U26484	94.00	ab	107.80	cd	72.85	abc
Herm/U27610	95.72	ab	129.60	e	83.92	cd
Media	99.45	B	104.24	B	73.88	A
FT (mg/100g pf)						
Herm	146.65	c	116.99	b	118.36	f
Herm/Herm	138.86	bc	96.82	ab	99.69	de
Herm/Robusto	91.40	a	113.64	ab	80.25	bc
Herm/Oscos	95.35	a	84.40	a	60.26	a
Herm/NMh	107.20	a	88.90	ab	105.32	ef
Herm/Chimayo	94.36	a	152.00	c	75.05	ab
Herm/JE10397	115.47	ab	115.15	b	96.28	cde
Herm/U19235	115.31	ab	241.84	c	82.05	bc
Herm/U26484	104.64	a	210.15	d	84.94	bcd
Herm/U27610	117.60	abc	147.93	c	105.65	ef
Media	112.68	B	136.78	C	90.79	A

Letras minúsculas diferentes dentro de las mismas condiciones de cultivo indican medias significativamente diferentes a $p < 0,05$, según la prueba estadística de Newman-Keuls. Las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a $p < 0,05$, según la prueba estadística de Newman-Keuls.

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

proporcionaron un mayor contenido de agua en los frutos (92,8-93,5%), mientras que otros como 'Chimayo' y los portainjertos de *C. chinense* y *C. baccatum* proporcionaron un menor contenido de agua (91-92%) (Tabla 8).

Contenido en ácido ascórbico

El contenido de ácido ascórbico (CAA) en frutos inmaduros bajo las condiciones de control osciló entre 89 y 108 mg/100g peso fresco (pf), mostrando 'Herminio' no injertado 103 mg/100g pf. (Tabla 8). Se encontraron algunas diferencias debidas a las combinaciones de injertos, pero ninguna ofrecía diferencias significativas en comparación con 'Herminio' sin injertar. Sólo los niveles de 'Numex Heritage' y JE10397 (107-108 mg/100g pf) fueron superiores a los de 'Robusto' (Tabla 8). En promedio, las condicionantes de sequía no parecieron afectar, en promedio, a los niveles de CAA en comparación con las condicionantes de control. Sin embargo, se encontró un efecto notable de la combinación de injertos dentro de este estrés, sugiriendo que la ocurrencia de déficit hídrico puede provocar una respuesta diferencial, dependiendo del genotipo utilizado como portainjertos, con portainjertos como 'Oscos', 'Numex Heritage' o 'Chimayo' provocando un notable efecto decreciente (80- 98 mg/100g pf), mientras que otros como U27610 favoreciendo la acumulación de ácido ascórbico en los frutos inmaduros (130 mg/100g pf) (Tabla 8). Por el contrario, algunos autores han descrito el efecto beneficioso del ácido ascórbico endógeno o de aplicaciones exógenas para paliar los efectos de la sequía, aunque estos estudios también han revelado una reducción del CAA en los frutos (Gisbert-Mullor *et al.*, 2020). Probablemente, la diversidad utilizada en nuestro estudio ha permitido identificar algunos materiales que, utilizados como portainjertos, pueden favorecer la CAA.

En comparación, el estrés salino causó un dramático efecto deletéreo sobre la CAA en frutos inmaduros, no sólo en promedio (74 mg/100g pf vs 100-104 mg/100g pf en condiciones control y sequía), sino también en todas las combinaciones (Tabla 8). Así, aunque hubo diferencias significativas entre combinaciones, este estrés disminuyó la CAA en todas ellas, desde un 15% en los frutos de 'Herminio' no injertado, 'Herminio' autoinjertado o U27610 hasta otros portainjertos como 'Oscos' o 'Numex Heritage', con disminuciones cercanas al 50% (Tabla 8). Estos resultados indican que la salinidad es muy negativa para

el CAA en los frutos de pimiento, incluso más agresiva que la sequía, sugiriendo que las plantas utilizan cantidades muy elevadas de este antioxidante por medio del ascorbato oxidasa para prevenir el estrés oxidativo en los tejidos, provocando por tanto una notable disminución en los frutos, tal y como informan Abdelgawad *et al.* (2019).

Contenido total en fenoles (FT)

El contenido de fenoles en frutos inmaduros bajo condiciones control osciló considerablemente entre 91 y 147 mg/100g pf., correspondiendo los valores más altos al cv 'Herminio' no injertado y a su control autoinjertado (alrededor de 140 mg/100g pf) (Tabla 8). Por lo tanto, a pesar de que se encontraron algunas diferencias significativas entre las combinaciones de injerto, ninguna de ellas ofreció niveles similares al cv 'Herminio' no injertado e incluso algunas combinaciones como 'Robustos', 'Oscos' o 'Chimayo' proporcionaron niveles muy bajos (< 100 mg/100g pf.) a los frutos (Tabla 8). En comparación, la sequía incrementó el FT en promedio, aunque la exposición a este estrés mostró comportamientos muy variables entre combinaciones. De hecho, en contraste con el CAA y el incremento medio de FT debido a la sequía, ésta disminuyó considerablemente el FT en el cv 'Herminio' no injertado y autoinjertado (30-40%). Además, se encontró una gran variación entre las diferentes combinaciones de injertos, desde unos pocos casos de niveles muy bajos y comparativamente más bajos que las condiciones control como 'Oscos' y 'Numex Heritage' (< 90 mg/100g pf) hasta otras combinaciones de injertos que incrementaron notablemente el FT en frutos inmaduros bajo estas condiciones de sequía como U19235 y U26484 (>200 mg/100g pf) (Tabla 8). En general, estos resultados sugieren, de forma más clara que lo observado para CAA, que la sequía puede ser beneficiosa para la acumulación de antioxidantes en la mayoría de los casos, con cierta variación genotípica, tal y como han reportado varios autores (Gharibi *et al.*, 2016; Sarker y Oba, 2018, Laddomada *et al.*, 2021).

Por último, y de forma similar a lo observado para el CAA, la salinización tuvo un notable efecto decreciente sobre el FT, tanto en promedio 91 mg/100g vs 113 mg/100g pf en las condiciones control como en la mayoría de las combinaciones (Tabla 8). En este sentido, con la única excepción de 'Numex Heritage' como portainjerto, las disminuciones debidas a la salinidad oscilaron

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

entre el 10- 15% en 'Herminio' no injertado, 'Robusto' o U27610 y el 30-35% en 'Herminio' autoinjertado, y 'Oscos' o U19235 (Tabla 8) y, en consecuencia, ninguna de las combinaciones de injerto ofreció un mejor rendimiento que la variedad no injertada. Estos resultados sobre fenoles, muy similares a los del ácido ascórbico, confirman que las condiciones salinas requerirían una respuesta muy intensa de consumo de antioxidantes por parte de las plantas, hasta el punto de disminuir notablemente los niveles de fenoles y ácido ascórbico en los frutos (Linié *et al.*, 2019). También, al menos considerando frutos inmaduros, el uso de injertos puede ser elegido con cuidado ya que, dependiendo del patrón utilizado, la CAA y la FT pueden disminuir en comparación con la variedad no injertada, particularmente bajo condiciones salinas, o por el contrario pueden ayudar a aumentar la CAA y especialmente la FT, particularmente bajo estrés hídrico.

3.2.2.4. Composición de los frutos maduros

Contenido en agua

En general, en comparación con los frutos inmaduros, el contenido de agua en los frutos completamente maduros fue considerablemente inferior en todos los tratamientos, es decir, 89-93% entre las combinaciones y los tratamientos, 90-91% de media (Tabla 9), lo que indica que la maduración aumenta el contenido de materia seca. Además, en comparación con el estado inmaduro, el estado completamente maduro agravó las diferencias entre variedades. Así, en el caso de las condiciones control, el contenido en agua de los frutos procedentes del cv 'Herminio' no injertado fue del 90,4%, similar a la media (90,7%), mientras que el de los frutos procedentes del resto de combinaciones de injerto estuvo comprendido entre el 88,9% de 'Oscos' y el 93,1% de 'Herminio' autoinjertado (Tabla 9). Tales diferencias sugieren que el efecto real de los portainjertos sobre este carácter puede aparecer cuando los frutos están expuestos al portainjerto en un período más largo, es decir, en estados de maduración más avanzados, en concordancia con los hallazgos de Ribes Moya *et al.*, (2018), al comparar los efectos de diferentes condiciones de cultivo en la composición de frutos de *Capsicum* de varios genotipos.

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 9. Valores medios de contenido de agua (%), contenido de ácido ascórbico (CAA, mg/100g pf) y fenoles totales (TP, mg/100g pf) en frutos completamente maduros bajo condiciones de control, déficit hídrico y salinidad.

Material vegetal	Control		Sequia		Salinidad	
Contenido en agua (%)						
Herm	90.40	b	90.73	cd	93.19	f
Herm/Herm	93.10	d	89.13	b	91.96	e
Herm/Robusto	89.20	a	92.09	ef	93.36	f
Herm/Oscos	88.91	a	88.14	a	91.24	de
Herm/NMh	91.81	c	89.91	bc	90.43	bc
Herm/Chimayo	92.60	cd	90.76	cd	91.37	dc
Herm/JE10397	92.58	cd	89.36	b	89.14	a
Herm/U19235	90.35	b	92.22	f	90.08	b
Herm/U26484	89.03	a	89.29	b	90.95	cd
Herm/U27610	88.95	a	91.21	de	89.21	a
Media	90.69	B	90.28	A	91.09	C
CAA (mg/100g pf)						
Herm	153.12	abc	166.89	cd	100.34	bc
Herm/Herm	139.46	abc	134.64	ab	94.38	abc
Herm/Robusto	133.52	abc	165.21	cd	106.53	c
Herm/Oscos	128.47	ab	180.08	d	96.08	bc
Herm/NMh	149.31	abc	161.48	cd	100.39	bc
Herm/Chimayo	125.06	a	147.95	bc	83.72	ab
Herm/JE10397	163.42	c	121.95	a	82.23	ab
Herm/U19235	142.53	abc	163.25	cd	74.20	a
Herm/U26484	160.03	bc	157.18	c	84.16	ab
Herm/U27610	156.24	abc	178.64	d	106.73	c
Media	145.12	B	157.73	C	92.88	A
FT (mg/100g pf)						
Herm	241.05	d	197.47	bc	172.24	bc
Herm/Herm	184.51	b	170.87	ab	164.51	abc
Herm/Robusto	189.78	bc	227.74	cd	159.92	abc
Herm/Oscos	164.00	ab	230.55	cd	156.91	abc
Herm/NMh	175.69	ab	219.59	cd	190.29	c
Herm/Chimayo	138.57	a	233.20	d	160.33	abc
Herm/JE10397	175.14	ab	150.75	a	135.82	ab
Herm/U19235	180.93	b	270.62	c	129.68	a
Herm/U26484	195.12	bc	240.01	de	147.80	ab
Herm/U27610	224.57	cd	207.54	cd	190.34	c
Media	186.62	B	213.40	C	160.78	A

Letras minúsculas diferentes dentro de las mismas condiciones de cultivo indican medias significativamente diferentes a $p < 0,05$, según la prueba estadística de Newman-Keuls. Las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a $p < 0,05$, según la prueba estadística de Newman-Keuls.

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por término medio, las condiciones de estrés provocaron cambios significativos pero muy bajos y diferentes en el contenido de agua. Así, la sequía disminuyó ligeramente el contenido de agua (90,3%), mientras que la salinidad provocó un ligero aumento del contenido de agua (91,1%) (Tabla 9). No obstante, las diferencias fueron tan bajas entre tratamientos (0,80% entre las medias) que no se puede suponer un efecto real del estrés, mientras que, por el contrario, la principal contribución a las diferencias correspondió a las combinaciones de injertos dentro de cada tratamiento. Así, bajo condiciones de sequía los frutos de 'Herminio' no injertados mostraron niveles similares a los de las condiciones control (en torno al 90,5%), mientras que las combinaciones de injertos oscilaron entre el 88% de 'Oscos' y el 92% de 'Robusto' y U19235 (Tabla 9). En el caso de las condiciones de salinidad, 'Herminio' sin injertar mostró el mayor contenido de agua, 93,2%, mientras que los valores en los injertos estuvieron comprendidos entre el 89% de JE10397 y U27610 y el 93,4% de 'Robusto' (Tabla 9). Estos resultados indican que, con la excepción de 'Robusto' (efecto creciente bajo condiciones de estrés) no existe un efecto claro en el resto de los portainjertos entre los tratamientos, sugiriendo una interacción genotipo x tratamiento en este carácter en el estado de plena madurez, tal y como se encontró en el ANOVA (Tabla 6).

Contenido en ácido ascórbico (CAA)

El contenido en ácido ascórbico (CAA) en el estado de madurez, fue considerablemente mayor que en el estado inmaduro, no sólo en promedio, sino también en todas las combinaciones salvo contadas excepciones (Tablas 8 y 9), lo que concuerda con otros autores, que han reportado incrementos notables en el ácido ascórbico de diferentes variedades de pimiento debido a la maduración (Rodríguez-Burruezo *et al.*, 2009; Ribes-Moya *et al.*, 2018 y 2020). Los frutos producidos en condiciones control mostraron un rango de variación comprendido entre 125 y 163 mg/100g pf, alcanzando 'Herminio' sin injertar 153 mg/100g pf (Tabla 9). Las combinaciones de injertos proporcionaron diferencias significativas, aunque ninguna fue significativamente diferente a los valores encontrados en los frutos completamente maduros de 'Herminio' no injertado. Entre las combinaciones injertadas, la CAA en 'Oscos', y 'Chimayo', con valores <130 mg/100g pf, fueron considerablemente inferiores a las registradas en

JE10397 y U26484, que incrementaron considerablemente la CAA alcanzando >160 mg/100g pf (Tabla 9).

En promedio, las condiciones de sequía incrementaron significativamente la CAA, aunque al 10% en comparación con las condiciones testigo. En este sentido, los mayores incrementos deben buscarse en combinaciones específicas. Así, bajo estas condiciones de estrés, los frutos completamente maduros de 'Herminio' sin injertar aumentaron hasta 167 mg/100g pf y algunas combinaciones de injerto como 'Oscos' o U27610 proporcionaron valores incluso superiores (alrededor de 180 mg/100g pf) (Tabla 9). Para el ensayo de las combinaciones injertadas, los valores de CAA fueron similares o inferiores a los de 'Herminio' sin injertar. Sin embargo, la mayoría de las combinaciones aumentaron la CAA en comparación con las condiciones de control, en particular 'Robusto' (25%), 'Oscos' (40%) y U27610 (15%), y sólo JE10397 disminuyó significativamente la CAA debido a la sequía (- 25%) (Tabla 9). Además, la ocurrencia de este estrés provocó diferencias más significativas entre combinaciones que las observadas en condiciones control. Este hecho sugiere que diferencias a nivel genético, potencialmente silenciadas bajo condiciones de no estrés, podrían activarse cuando los materiales son expuestos a sequía, como se ha repetido en otros casos en pimiento (Ahmed *et al.*, 2014; Kopta *et al.*, 2020; Borrás *et al.*, 2021).

Comparativamente, y al igual que se observó en el estado inmaduro, la aparición de estrés salino también provocó una notable disminución sobre el CAA en los frutos completamente maduros, incluso superior a la de los frutos inmaduros, tanto en promedio (93 mg/100g pf vs 145 y 158 mg/100g pf en las condiciones control y sequía), como en todas las combinaciones (Tabla 9). El efecto de la salinidad sobre la CAA fue incluso más agresivo que el registrado en el estado inmaduro, de forma que la CAA en los frutos del 'Herminio' no injertado disminuyó un 34% en comparación con las condiciones control (de 153 a 100 mg/100g pf) y muchas combinaciones de injerto disminuyeron un 33-50% (Tabla 9). Probablemente una exposición más prolongada de los frutos completamente maduros a este estrés (recolectados >3 meses desde el cuajado) puede explicar por qué la disminución es mucho mayor que la registrada en el estado inmaduro (2 meses), como sugieren Ribes-Moya *et al.*, (2018) en frutos de pimiento

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

cultivados en agricultura ecológica. Sin embargo, algunas combinaciones fueron capaces de mitigar este efecto, proporcionando valores similares o ligeramente superiores a los de 'Herminio' no injertado, como 'Robusto', 'Numex Heritage' o U27610 (Tabla 9).

Contenido total en fenoles (FT)

De forma similar al CAA, los FT fueron mucho más altos en el estado de plena madurez, tanto en promedio como en todas las combinaciones y tratamientos (Tablas 8 y 9), lo que también ha sido reportado por otros autores. Así, no sólo el ácido ascórbico, sino también otros antioxidantes, incluyendo fenólicos, carotenoides, etc. suelen ser mayores en el estado de plena madurez en la mayoría de las variedades de pimiento (Rodríguez-Burruezo *et al.*,2009; Ribes-Moya *et al.*,2018), por lo que este estado es el más complejo e interesante desde el punto de vista nutracéutico. Dentro de las condiciones control, las diferentes combinaciones evaluadas acumularon niveles de fenoles bastante elevados y variables. Los valores de FT variaron entre 138 y 241 mg/100g pf. De forma similar al CAA en ambos estados y al FT en el estado inmaduro en condiciones control, las combinaciones de injerto proporcionaron diferencias significativas, aunque ninguna proporcionó valores superiores a los encontrados en los frutos completamente maduros de 'Herminio' no injertados (241 mg/100g pf) (Tabla 9). Así, algunos portainjertos como 'Robusto', U26484 y U27610 permitieron valores de FT de 190-225 mg/100g pf, mientras que por el contrario otros como 'Oscos' y, particularmente, 'Chimayo' ofrecieron valores considerablemente inferiores (140-165 mg/100g pf) (Tabla 9).

El comportamiento de las combinaciones injertadas en condiciones de estrés fue similar al observado en CAA. Así, en comparación con las condiciones control, la sequía incrementó los niveles de FT en ambas en promedio (213 vs 187 mg/100g pf) y en la mayoría de los materiales, mientras que la salinidad tuvo un efecto deletéreo notable (promedio de 161 mg/100g pf). Sin embargo, respecto a las condiciones de sequía, los frutos completamente maduros de 'Herminio' no injertado se comportaron de forma diferente a la observada en la mayoría de los injertos, así como en CAA, disminuyendo un 18% en FT respecto a las condiciones control (197 vs 241 mg/100g pf). Este comportamiento en 'Herminio' no injertado (es decir, efecto decreciente en fenoles debido a la

sequía), así como en 'Herminio' autoinjertado, también se observó en sus frutos inmaduros (Tabla 8), y difiere del encontrado en los valores de CAA, que aumentaron con la sequía en ambas etapas y sugiere que la respuesta de las plantas no injertadas a la sequía puede diferir dependiendo del agente antioxidante como se ha reportado en algunos casos (Kyriacou *et al.*,2017; Mahmood *et al.*,2021). En este marco, varias combinaciones de injerto podrían proporcionar un efecto de mejora, aumentando considerablemente los niveles de TP (>220 mg/100g pf), particularmente U19235 y U264840 (Tabla 9). De hecho, la sequía incrementó los niveles de FT en la mayoría de las combinaciones en comparación con las condiciones control, particularmente 'Oscos' (40%), 'Chimayo' (70%) o U19235 (50%).

Finalmente, a pesar de que el estrés salino también causó una notable disminución de FT en frutos completamente maduros, tanto en promedio (161 mg/100g pf vs 187 y 213 mg/100g pf en condiciones control y sequía, respectivamente), como en la mayoría de los materiales, algunos portainjertos como 'Numex Heritage' o 'Chimayo' fueron bastante resistentes (Tabla 9). Además, en comparación con el estado inmaduro, el efecto de la salinidad sobre FT en el estado completamente maduro fue un poco menos agresivo. Así, el FT en los frutos del 'Herminio' no injertado disminuyó un 25% en comparación con las condiciones de control (de 241 a 172 mg/100g pf), la disminución de muchas combinaciones de injerto fue de alrededor del 15-30%, e incluso combinaciones de injerto como 'Oscos', o las mencionadas anteriormente 'Numex Hericage' o 'Chimayo' mostraron niveles de FT similares o incluso superiores en condiciones salinas (Tabla 9).

3.2.2.5. Interacción de las condiciones de estrés con el proceso de maduración en la composición de los frutos

Las mediciones sobre cómo la sequía y la salinidad podrían alterar los niveles de CAA y FT (es decir, las ratios sequía/control y salinidad/control) en las dos etapas de maduración ofrecieron resultados interesantes para ambos parámetros antioxidantes. Respecto al CAA, la comparación entre sequía y salinidad parece sugerir en ambas etapas: i) que la sequía podría incrementar

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

en la mayoría de los casos los niveles de ácido ascórbico respecto a las condiciones control (es decir, valores de ratio $>1,00$) (Figura 7A) y ii) mientras que la salinidad parece disminuir considerablemente el ácido ascórbico en todos los casos (es decir, valores de ratio $< 1,00$) (Figura 7B). Además, en general, los cambios en el CAA debidos a la sequía fueron bastante similares en ambos estados de maduración, ya que algunas de las combinaciones aparecieron por debajo de la pendiente = 1 (es decir, los cambios en el CAA fueron mayores en el estado inmaduro), mientras que otras aparecieron por encima de la pendiente = 1 (es decir, los cambios en el CAA debidos a la sequía fueron mayores en el estado completamente maduro), y la media total apareció cerca de la pendiente = 1 (es decir, los cambios en el CAA debidos a la sequía fueron iguales en ambos estados de maduración) (Figura 7A). Por el contrario, la disminución del CAA debida a la salinidad parece ser en la mayoría de los casos mayor en el estado inmaduro, ya que los ratios de la mayoría de las combinaciones y la media total aparecieron por debajo de la pendiente = 1 (Figura 7B).

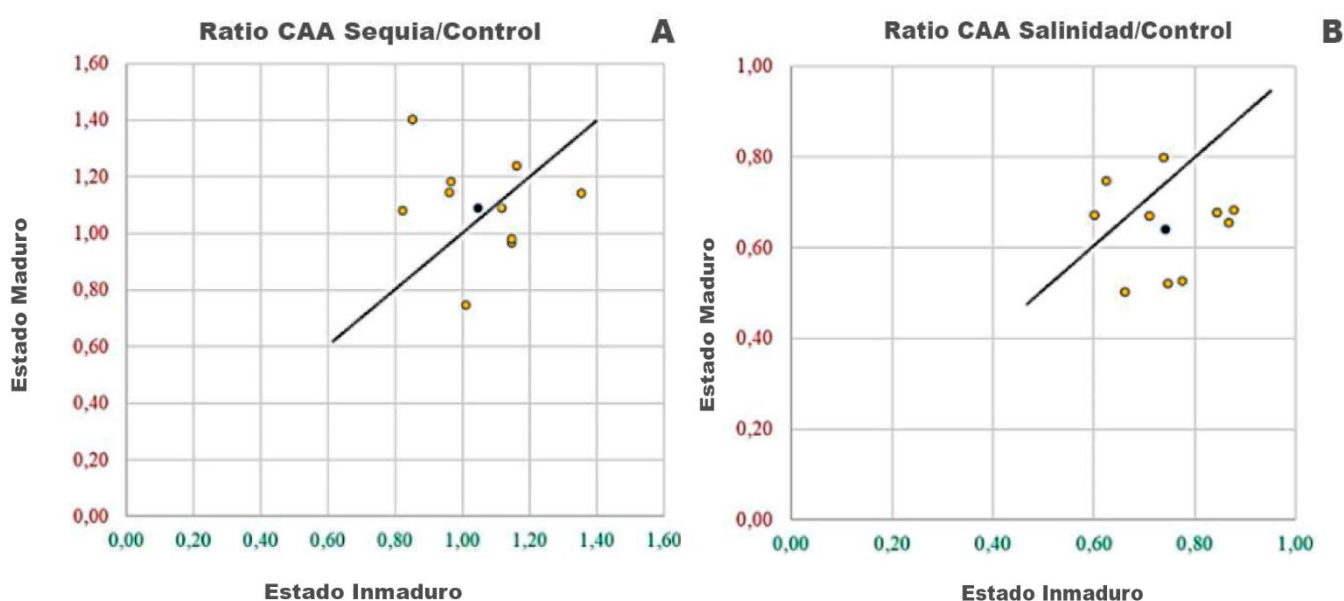


Figura 7. Estudio comparativo entre los estados inmaduro (verde) y completamente maduro (rojo) del contenido de ácido ascórbico (CAA) y las relaciones de Sequía/Control (A) y Salinidad/Control (B) de los materiales vegetales evaluados. Los puntos naranjas corresponden al valor de cada material vegetal evaluado y el punto negro corresponde al valor medio. La línea negra indica una pendiente = 1 (es decir, la misma relación en los estados inmaduro y completamente maduro).

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el caso de los fenoles, la comparación entre sequía y salinidad mostró que la sequía incrementó en la mayoría de los casos los niveles de fenoles respecto a las condiciones control y, además, en mayor medida que el CAA ya que muchas combinaciones mostraron ratios $\geq 1,20$ en ambos estados (Figura 8A), mientras que el CAA en la mayoría de las combinaciones tuvo ratios $\leq 1,20$ (Figuras 7A). Por el contrario, la salinidad disminuyó los fenoles en la mayoría de los casos (Figura 8B), aunque en menor medida que el ácido ascórbico, es decir, los valores de ratio para la mayoría de las combinaciones en FT fueron $\geq 0,80$ mientras que en CAA fueron $\leq 0,80$ (Figuras 7B y 8B). Asimismo, y de forma similar al CAA, no hubo un efecto claro del estado de maduración sobre el incremento del FT debido a la sequía, ya que algunas combinaciones aparecieron por debajo de la pendiente = 1, mientras que otras aparecieron por encima de la pendiente = 1, y la media total apareció cercana a la pendiente = 1 (Figura 8A). Por el contrario, la disminución de la FT debida a la salinidad fue en la mayoría de los casos mayor en el estado inmaduro, ya que las proporciones de la mayoría de las combinaciones y la media total aparecieron por debajo de la pendiente = 1 (Figura 8B).

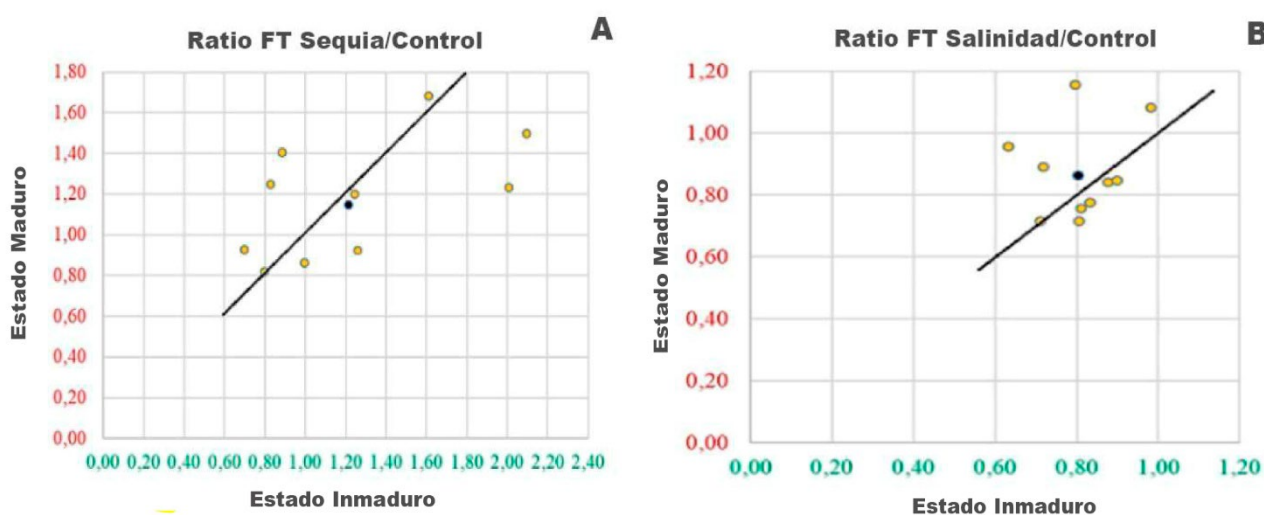


Figura 8. Estudio comparativo entre los estados inmaduro (verde) y completamente maduro (rojo) de las relaciones fenólicos totales (TP) y las relaciones de Sequía/Control (A) y Salinidad/Control (B) de los materiales vegetales evaluados. Los puntos naranjas corresponden al valor de cada material vegetal evaluado y los puntos negros al valor medio. La línea negra indica una pendiente = 1 (es decir, la misma relación en los estados inmaduro y completamente maduro).

3.3. LINEA EXPERIMENTAL 3: Evaluación del comportamiento de líneas parentales e híbridos para factores de la calidad nutricional en distintas condiciones de cultivo

3.3.1. Metodología

3.3.1.1. Material vegetal

En este trabajo se evaluaron un total de 20 materiales: 9 líneas parentales, mayoritariamente *C. annuum* más una línea *C. chinense* (Ají Dulce), y 11 híbridos obtenidos del cruzamiento entre estas líneas parentales, incluyendo un cruce interespecífico *C. annuum* × *C. chinense* (Tabla 10, Figura 9).

Tabla 10. Material vegetal evaluado. Parentales e híbridos experimentales.

Accesión	Origen	Usos	Forma	Color
<i>Líneas parentales</i>				
Bola/Ñora	DO Murcia, España	Pimentón, colorante	Redondo	Rojo
Calif. Wonder	Inbred Line, COMAV-UPV	Fresco o cocinado	Cuadrado	Rojo
Serrano	México	Inmaduro o maduro, fresco o cocinado	Alargado	Rojo
Chile de Árbol	Hatch, New México	Seco, condimento y colorante	Alargada	Rojo
Guindilla Ibarra	Ibarra, Euskadi	Verde en encurtido	Alargada	Rojo
Riojano	IGP Riojano	Maduro, asado	Alargada	Rojo
Pasilla Bajío	México	Seco condimento y colorante	Alargada	Marrón
Piquillo	Navarra	Maduro, asado	Triangular	Rojo
Ají Dulce	Cuba (<i>C. chinense</i>)	Maduro/inmaduro	Rectangular	Rojo
<i>Híbridos</i>				
California Wonder × Chile de Árbol (CW×ChA)		Pasilla × Bola (Pa×Bo)		
California Wonder × Serrano (CW×Se)		Pasilla × Chile de Árbol (Pa×ChA)		
Chile de Árbol × Bola (ChA×Bo)		Piquillo × Ají Dulce (Pi×AD)		
Chile de Árbol × Piquillo (ChA×Pi)		Piquillo × Serrano (Pi×Se)		
Guindilla Ibarra × Bola (Gdl×Bo)		Serrano × Chile de Árbol (Se×ChA)		
Guindilla Ibarra × Chile de Árbol (Gdl×ChA)				



Figura 9. Ejemplo de diversidad varietal entre los parentales empleados. De izquierda a derecha: Fila superior: Bola, Chile de Árbol, Guindilla y Riojano; Fila inferior: Pasilla, Piquillo, Serrano y Ají Dulce.

3.3.1.2. Condiciones de cultivo

Las distintas accesiones evaluadas se sembraron en febrero de 2021 en bandejas de alveolos de 20x20 mm, empleando sustrato enriquecido como medio de germinación. Tras su germinación y crecimiento, las plántulas se trasplantaron definitivamente a los ensayos en abril de 2021 en estado de 5 hojas verdaderas. Para cada combinación de accesión y sistema de cultivo, se trasplantaron un total de 15 plantas, repartidas en 5 bloques de 3 plantas, distribuyéndose los bloques siguiendo un diseño aleatorio.

El ensayo se realizó en una parcela de producción ecológica de Meliana (Horta Nord de Valencia), propiedad de un agricultor profesional. Se emplearon condiciones de manejo ecológico, con escarda mecánica y un abonado basado en abonado de fondo previo al trasplante, 5 kg/m² de estiércol de oveja, habitual todos los años en esta parcela. Durante el periodo de cultivo, ciclo de primavera-verano 2021 (abril-octubre 2021), se empleó un riego por surcos cada dos semanas, incrementándose a un riego cada 10 días en los meses de mayor demanda evaporativa (julio y agosto).

3.3.1.3. Caracteres evaluados

Se realizaron analíticas de los principales antioxidantes y compuestos nutraceuticos del pimiento en todas las accesiones evaluadas en sus dos

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

principales estadios comerciales: i) contenido en ácido ascórbico (CAA, fruto inmaduro y fruto maduro), ii) contenido en fenoles totales (FT, fruto inmaduro y fruto maduro) y iii) carotenoides rojos totales y amarillos totales (C_R y C_A , sólo fruto maduro), siguiendo las metodologías descritas en Ribes-Moya *et al.* (2018). Para ello se muestrearon frutos de las tres plantas de cada bloque, con objeto de tener muestras representativas de cada bloque. Los frutos se lavaron inmediatamente a la llegada al laboratorio y se procesaron y prepararon las diferentes submuestras para cada analítica.

Así, el CAA se determinó mediante determinación potenciométrica sobre frutos en fresco, conservados en refrigerador (5-6°C) no más de 3 días desde la cosecha, y teniendo en cuenta el valor más alto del estado maduro. Para ello se empleaban 10 ml de zumo de fruto maduro y 20 ml de zumo de fruto inmaduro. Antes de cada jornada de analíticas, se establecía la curva patrón del valorador, mediante una disolución de cloramina T. A este respecto, se añadían 2 ml de H_2SO_4 2M, 2 ml de la disolución patrón de ácido ascórbico, y 100 mg de ioduro de potasio (KI) sólido sobre 50 ml de agua destilada y se agitaba en agitador magnético hasta la completa disolución. Entonces se introducía el electrodo del valorador automático en la disolución y tras un tiempo de estabilización de la medida, se añadía el valorante comercial a concentraciones fijadas. La valoración se detenía automáticamente al detectar el punto final de la misma apareciendo en la pantalla la concentración de la disolución de cloramina T.

Tras ajustarse el valorador automático, se realizaban las determinaciones de ácido ascórbico de las muestras, empleando el modo de análisis "Vitamina" e introduciendo en un vaso de precipitados los 20 ml de zumo de pimiento inmaduro con 25 ml de agua destilada o, alternativamente, 10 ml de zumo de pimiento maduro en 40 ml de agua destilada, junto con 2 ml H_2SO_4 2M, 100 mg de KI sólido y un agitador para asegurar la disolución uniforme. Finalmente, se colocaba el vaso de precipitados con la disolución correspondiente y se procedía a las lecturas con el valorador automático de la misma forma que para establecer la curva patrón, aportando la cantidad necesaria de Cloramina T. Con los valores de cloramina T se estimaba entonces el CAA de las muestras, expresando el resultado en mg AA/kg de peso fresco, en base a la ecuación:

$$CAA = [(M \cdot V \cdot P_m) / V_m] \times (V_e / P_e) \times 1000$$

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Siendo M: molaridad cloramina T, V: vol. cloramina T, Pm: peso molecular cloramina T, Vm: volumen muestra, Pe: peso muestra fresca en el extracto acuoso, Ve: volumen extracto acuoso.

La determinación de FT se realizó extrayendo los compuestos fenólicos de muestras de fruto en fresco con una mezcla metanol/agua y cuantificación mediante una reacción colorimétrica y lectura de absorbancia a 725 nm en un espectrofotómetro UV-visible con cubetas de cuarzo con 10 mm de trayecto óptico. Para ello, se mezclaban 500 μ l de zumo de pimiento en 15 ml de agua destilada, y con una pipeta se incorporaban 1,25 ml de reactivo Folin-Ciocalteu (2N). La mezcla se homogenizaba y se dejaba reposar 200 segundos en reposo. Después se añadían 2,5 ml de NaOH (disolución al 6%) y se enrasaba con agua destilada hasta los 25 ml. Tras 60 min se medía la absorbancia a 725 nm, a partir de la disolución en blanco (concentración 0 ppm) y empleando una curva patrón de ácido cafeico como referencia. Esta curva patrón de ácido cafeico se preparaba previamente a partir de una dilución comercial de 1000 mg/L de ácido cafeico, estableciendo concentraciones de 0, 1, 2,4, 6, 8 y 10 ppm (μ g/ml).

Finalmente se procedía a ajustar por mínimos cuadrado los resultados de las medidas de absorbancia, determinándose por interpolación en la curva patrón las concentraciones de FT en las muestras, expresando los resultados en mg cafeico /kg de peso fresco.

Para determinar el contenido en C_R y C_A , se procedió previamente a la liofilización de las muestras. Las muestras liofilizadas se conservaban, precintadas, en nevera (5-6°C) hasta la realización de los análisis. La extracción y determinación de los pigmentos carotenoides se realizó de acuerdo con el método espectrofotométrico de Hornero-Méndez y Mínguez-Mosquera adaptado (Ribes-Moya *et al.*, 2018). Este método consiste en la medida de la absorbancia en la región UV- visible a dos longitudes de onda y la ecuación de Lambert-Beer para mezclas multicomponente. Los carotenoides se extrajeron a partir de 100 mg de muestra liofilizada en un matraz Erlenmeyer de 25 ml, incorporando 20 ml de acetona como disolvente extractor y agitando la mezcla durante 60 min. La solución resultante se filtraba después al vacío con papel de filtro a un matraz

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

aforado de 25 ml, enrasando hasta 25 ml finalmente con acetona. Finalmente se medía la absorbancia del extracto a 472nm (Δ_{472}) y 508nm (Δ_{508}), siendo Δ la densidad óptica media, en un espectrofotómetro UV-Visible similar al mencionado para los FT, empleando la acetona pura como solución en blanco. Finalmente, la concentración de carotenoides se determinó mediante las ecuaciones:

$$C_R (\mu\text{g/mL}) = \frac{\Delta_{508} \cdot 2144,0 - \Delta_{472} \cdot 403,3}{270,9} \qquad C_A (\mu\text{g/mL}) = \frac{\Delta_{472} \cdot 1724,3 - \Delta_{508} \cdot 2450,1}{270,9}$$

3.3.1.4. Tratamiento estadístico

Para determinar la contribución de los efectos de la variedad, estado de madurez y ambiente, así como la interacción entre ellos sobre la variación de los caracteres estudiados, los datos se sometieron a análisis de la varianza (ANOVA) con el software StatGraphics Centurion XVI. Adicionalmente, para visualizar de forma ilustrativa y simplificada el efecto del valor de los parentales sobre el del híbrido correspondiente, se han incluido unas gráficas comparativas para todo el material evaluado. En ellos, se representa gráficamente la regresión preliminar de cada híbrido respecto al valor de su pareja de parentales (mid-parent value). Estas comparaciones ilustrativas se presentan en la Figura 10, y no incluye estudio estadístico por ser un recurso visual y complementario al de las tablas 12 y 13, que ya incluyen estadísticos para identificar diferencias significativas entre todos los materiales (parentales e híbridos).

3.3.2. Resultados y discusión

El análisis de variación mostró que todos los efectos contribuyeron de forma significativa a la variación observada: accesión o genotipo, estado de madures del fruto y la interacción de ambos en el CAA y FT, así como el efecto de la accesión o genotipo sobre la acumulación de carotenoides. Es decir, hay diferencias significativas entre las accesiones, entre un estado de madurez y otro. Y finalmente, que los cambios en la concentración de CAA y FT con la maduración son variables entre las diferentes accesiones.

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Adicionalmente, tanto para CAA como FT, atendiendo a la magnitud de los cuadrados medios del ANOVA, se observa que el estado de madurez es el efecto que contribuyó en mayor proporción a la variación observada, mientras que los efectos de la accesión y la interacción accesión × estado de madurez presentaron una menor contribución (50 veces menos aproximadamente) (Tabla 11).

Tabla 11. Análisis de la varianza ANOVA, expresando los grados de libertad (gl) y cuadrados medios (CM) de los correspondientes efectos principales y su interacción sobre los caracteres contenido en ácido ascórbico (CAA), fenoles totales (FT) y carotenoides rojos totales (C_R) amarillos totales y (C_A). Para los carotenoides no se estudió el efecto estado de madurez al ser determinados sólo en frutos maduros.

EFECTO	CAA		FT	C _R		C _A
	gl	CM	CM	gl	CM	CM
Accesión (G)	19	4742**	5573**	19	214038***	83122***
Est. madurez (M)	1	234069***	512375***	--	--	--
G×M	19	3485**	4855**	--	--	--
Error	200	341	734	100	12237	9890

** y *** indican cuadrados medios significativos para $P < 0.01$ y < 0.001 según el estadístico F, respectivamente.

El estudio descriptivo de las accesiones parentales e híbridas permitió abundar en los resultados del análisis de variación. Así, en el caso del CAA se encontró una extraordinaria variación entre las accesiones, tanto en fruto inmaduro como en fruto maduro. En estado inmaduro los niveles de ácido ascórbico de las estirpes parentales estuvieron comprendidos entre 48 y 1213 mg/kg en peso fresco del Ají Dulce y el Chile de Árbol, respectivamente y desde 700-800 mg/kg de California, Riojano y Ají Dulce hasta 1700-1800 mg/kg de Pasilla y Chile de Árbol en fruto maduro (Tabla 12). En el caso de los híbridos experimentales el rango de variación fue más reducido en estado inmaduro: entre 150 mg/kg de Pasilla × Chile de Árbol y Guindilla × Chile de Árbol y 1097 mg/kg de California × Chile de Árbol (Tabla 12). Este hecho podría atribuirse a que el cruce entre estirpes parentales con valores extremos ha dado lugar a valores intermedios globales entre las descendencias híbridas. En fruto maduro, por el contrario, el valor medio de los híbridos fue mucho mayor que el de los parentales (1400 vs 1200 mg/kg), con rangos de variación comprendidos entre 1100 mg/kg de Serrano×Chile de Árbol y Pasilla×Aji Dulce y 1900 mg/kg de Chile

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 12. Contenido (mg/kg pf) en ácido ascórbico (CAA) y fenoles totales (FT) en estado inmaduro y maduro de las accesiones parentales e híbridos experimentales evaluados.

Accesión	CAA		FT	
	Inmaduro	Maduro	Inmaduro	Maduro
Bola	682 c	1353 c	810 b	1482 b
California Wonder	764 c	835 a	849 b	1354 ab
Chile de Árbol	1213 d	1759 d	863 b	2002 d
Guindilla Ibarra	121 a	1152 b	1084 c	1702 c
Riojano	652 c	752 a	1223 cd	1136 a
Pasilla	320 b	1700 d	1272 d	2161 d
Piquillo	630 c	1241 bc	662 a	1778 c
Serrano	185 ab	1224 bc	1129 c	2368 e
Ají Dulce	48 a	769 a	1121 c	1316 ab
Media parentales	513 A	1198 B	1000 B	1700 C
ChA×Bo	711 de	1613 c	974 c	2764 e
CW×ChA	1097 e	1395 b	739 ab	1756 b
ChA×Pi	900 e	1904 d	824 b	1857 b
Se×ChA	285 b	1135 a	962 c	1735 b
CW×Se	244 b	1335 b	910 bc	1484 a
Gdl×Bo	960 e	1186 a	1399 d	2516 d
Gdl×ChA	158 a	1636 c	601 a	2111 c
Pa×Bo	351 c	1329 b	769 ab	2994 e
Pa×ChA	149 a	1607 c	893 bc	2173 c
Pi×AD	581 d	1107 a	748 ab	1424 a
Pi×Se	511 d	1238 ab	765 ab	2259 c
Media híbridos	482 A	1408 C	871 B	2098 D

Letras minúsculas distintas dentro de cada atributo de calidad, estado de madurez y bloque de accesiones (parentales o híbridos) indican diferencias significativas para $p < 0.05$, de acuerdo al test Newman-Keuls. Letras mayúsculas distintas entre los valores medios del bloque de parentales indican diferencias significativas entre esas medias según el test Newman-Keuls. Idem para las medias del bloque de híbridos.

de Árbol×Piquillo (Tabla 12). Este hecho sugiere que la hibridación, a diferencia del estado inmaduro, permite mejorar notablemente el CAA.

Además, se observó que la maduración incrementa notablemente el CAA de los frutos del pimiento, tanto en promedio como individualmente en todas las accesiones, confirmando el claro efecto del estado de madurez detectado en el ANOVA. Aún más, este efecto favorable de la maduración para la acumulación

de ácido ascórbico, aunque generalizado fue muy variable entre accesiones, en consonancia con el efecto significativo de la interacción accesión × estado de madurez, también hallado en el ANOVA. Es decir, la maduración incrementó el CAA en todas las accesiones, pero en unas más que otras. Así, en accesiones como California o Riojano este aumento del CAA con la maduración fue apenas del 10-15%, mientras que otras como Guindilla, Pasilla, Serrano o especialmente Ají Dulce, incrementaron sus niveles entre 5 y 15 veces en estado maduro frente al inmaduro (Tabla 12). Algo parecido se observó en los híbridos con incrementos del 15% en Guindilla×Bola y hasta 10 veces más como en Guindilla×Chile de Árbol y Pasilla×Chile de Árbol (Tabla 12). En cualquier caso, estos resultados ponen de manifiesto los altos niveles que presenta el pimiento para este antioxidante, con muchos materiales cuyos frutos podrían aportar la dosis diaria recomendada de vitamina C (60-80 mg) en 50-100 g de fruto fresco, incluso en estado inmaduro.

Por lo que respecta al contenido en fenoles, la situación fue similar a la observada para el contenido en vitamina C. Las accesiones estudiadas mostraron una variación considerable en FT en ambos estados de madurez. En los frutos inmaduros del bloque de parentales el contenido en fenoles varió entre 662 mg/kg de Piquillo y 1272 mg/kg de Pasilla, incrementándose a rangos de variación más alto en fruto maduro, i.e. de 1136 mg/kg en pimiento Riojano hasta 2368 mg/kg den Serrano (Tabla 12). Comparativamente, y como se observó para el CAA, los frutos inmaduros de los híbridos experimentales presentaron un rango de variación limitado, con todos los híbridos mostrando valores entre 600 y 1000 mg/kg, con la única excepción del híbrido Guindilla×Bola (1400 mg/kg) (Tabla 12). En contraste, fruto maduro el valor medio de los híbridos fue mucho mayor que el de los parentales (1700 vs 2000 mg/kg), con rangos de variación comprendidos entre los 1434 mg/kg de Piquillo×Aji Dulce y casi 3000 mg/kg de Pasilla×Bola, con numerosos híbridos por encima de 2000 mg/kg (Tabla 12). Como en el CAA, se observa que, especialmente en fruto maduro, la hibridación es una estrategia útil para mejorar los niveles de CAA.

En cuanto al contenido en carotenoides, sólo determinado en frutos maduros, también mostró una amplia variación varietal. Así en carotenoides rojos, la variación entre las accesiones parentales estuvo comprendida entre 69

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

y 769 mg/kg de peso fresco de Riojano y Chile de Árbol, respectivamente (Tabla 13), con un valor promedio de 293 mg/kg, mientras que en los híbridos el promedio superó los 500 mg/kg y los valores medios de C_R variaron entre 240-250 mg/kg de California×Serrano y Guindilla×Bola y 990 mg/kg de Pasilla×Chile de Árbol (Tabla 13). En comparación, el contenido en carotenoides amarillos fue apreciablemente más bajo que el observado para los rojos en la mayoría de las accesiones, como suele ser habitual en pimientos de fruto rojo. Los C_A estuvieron

Tabla 13. Contenido (mg/kg pf) en carotenoides rojos totales (C_R) y amarillos totales (C_A) en frutos maduros de las accesiones parentales e híbridos experimentales evaluados.

Accesión	C_R	C_A
Bola	257 c	184 b
California Wonder	128 b	57 a
Chile de Árbol	769 e	451 d
Guindilla Ibarra	241 c	144 ab
Riojano	69 a	77 a
Pasilla	190 bc	291 c
Piquillo	369 d	256 bc
Serrano	288 cd	202 b
Ají Dulce	325 d	196 b
Media parentales	293 B	206 A
ChA×Bo	503 bc	197 b
CW×ChA	423 b	292 bc
ChA×Pi	557 bc	573 e
Se×ChA	581 c	293 bc
CW×Se	240 a	134 a
Gdl×Bo	255 a	239 b
Gdl×ChA	880 d	455 d
Pa×Bo	534 bc	396 d
Pa×ChA	990 e	694 f
Pi×AD	392 b	261 bc
Pi×Se	405 b	218 b
Media híbridos	524 C	341 B

Letras minúsculas distintas dentro de cada atributo de calidad, estado de madurez y bloque de accesiones (parentales o híbridos) indican diferencias significativas para $p < 0.05$, según el test Newman-Keuls. Letras mayúsculas distintas entre los valores medios de parentales e híbridos indican diferencias significativas entre esas medias según el test Newman-Keuls.

comprendidos entre 57 y 451 mg/kg de California y Chile de Árbol, con un promedio para los parentales de 206 mg/kg, mientras que en los híbridos el valor medio se incrementó hasta 341 mg/kg y el rango de variación estuvo comprendido entre 134 y 694 mg/kg (Tabla 13). Estos resultados concuerdan con los obtenidos para el CAA y FT. Esto es, para frutos en estado comercial maduro, la hibridación permite ampliar la variación en compuestos nutricionales, incluidos los carotenoides, permitiendo identificar cruces híbridos transgresivos, con niveles más altos que los observados en el mejor de los parentales.

Finalmente, los estudios de regresión entre los híbridos y el valor medio de sus correspondientes parentales permitieron abundar en nuestros resultados. Así, el valor promedio de los parentales (mid-parent) parece guardar cierta relación (y capacidad predictiva) con el valor del híbrido en el caso del CAA, especialmente en el caso de frutos en estado maduro (Figura 9). Esto es, a mayor valor del mid-parent mayor valor esperable en el híbrido. En contraste, el contenido en fenoles en ambos estados de madurez no parece guardar esta relación y, por tanto, la aparición de híbridos con altos niveles de FT es más bien aleatorio y poco o nada predecible. Finalmente, el contenido en carotenoides presentó un comportamiento aún más marcado que el observado para el CAA, especialmente en carotenoides amarillos, con una correlación muy alta entre el valor del mid-parent y el obtenido en el híbrido correspondiente. A la vista de estos resultados, parece factible planificar la obtención de híbridos con alto CAA y carotenoides mediante el cruzamiento de parentales con altos niveles de estos nutrientes.

FASE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

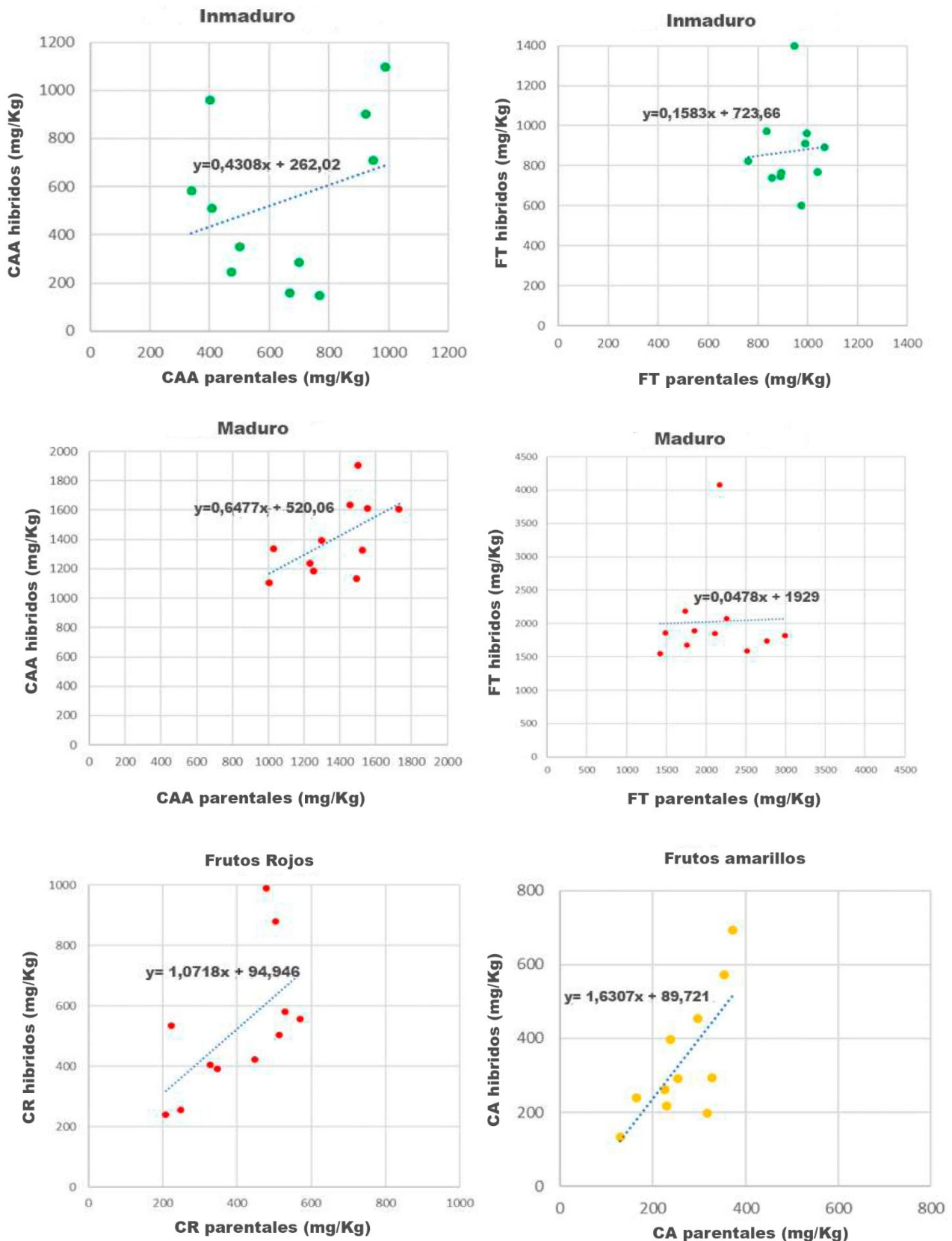


Figura 10. Regresiones parentales (mid-parent value) vs. híbridos para contenido en ácido ascórbico (CAA) y fenoles totales (FT) en cada estado de madurez (las gráficas con puntos verdes corresponden al estado inmaduro y las de puntos rojos al estado maduro) y para el contenido en carotenoides rojos totales (CR) y amarillos totales (CA) en frutos maduros. En abscisas los valores midparent (i.e. promedio de los parentales correspondientes) en ordenadas los valores de los híbridos.

4. CONCLUSIONES

4. CONCLUSIONES

1. Del primer estudio preliminar se puede concluir que el sistema de cultivo y especialmente el estado de maduración contribuyen considerablemente a la variación para el peso del fruto y el contenido de ácido ascórbico (CAA) en *Capsicum annuum*, aunque también hay cultivares que difirieron en ambos factores. En este sentido, en la mayoría de genotipos, la maduración incrementó el CAA en ambos sistemas de cultivo, aunque con valores más altos en campo abierto que en invernadero para fruto inmaduro, y lo contrario en fruto maduro. Finalmente, para el peso de fruto, el cultivo en invernadero favorece este atributo, con independencia del estado de maduración.
2. Con el experimento de patrones o portainjertos se encontró que en condiciones normales (control, sin estrés salino ni hídrico) esta estrategia no proporciona un incremento de vigor, mostrando la variedad no injertada un rendimiento y peso de fruto similares o superiores a los registrados cuando se injerta en cualquiera de los portainjertos. Sin embargo, en condiciones de estrés abiótico severo, como sequía o salinidad, algunas de las accesiones evaluadas como patrones permitieron una mitigación considerable de su impacto, proporcionando rendimientos y/o tamaños de fruto superiores a la variedad de referencia sin injertar, particularmente en el rendimiento bajo sequía y del peso de fruto, en ambas condiciones de estrés. Estos resultados indican que algunos de nuestros portainjertos experimentales se han comportado de manera muy satisfactoria y con extraordinario potencial comercial para permitir el cultivo de pimiento en condiciones de estrés abiótico.
3. Asimismo, el estudio con portainjertos evidenció que la sequía, en general, incrementa considerablemente los niveles de antioxidantes tanto en frutos inmaduros como maduros, mientras que la salinidad provoca descensos muy relevantes en estos compuestos, especialmente en el caso del ácido ascórbico. No obstante, frente a esta tendencia general, la considerable interacción portainjerto x tratamiento existente permitió identificar varios portainjertos que proporcionan niveles muy altos de antioxidantes en ambas etapas de maduración y bajo ambos estreses

CONCLUSIONES

abióticos, particularmente en fenoles, mejorando los de la variedad de referencia no injertada.

4. El estudio de líneas parentales e híbridos experimentales sobre caracteres de calidad confirmó el efecto favorable de la maduración sobre la acumulación de nutrientes en pimiento. Así, en casi todas las variedades e híbridos ensayados el contenido en ácido ascórbico y fenoles totales fue más alto en los frutos maduros. Además, la hibridación es una estrategia útil en la obtención de materiales mejorados para ácido ascórbico, compuestos fenólicos y carotenoides rojos y amarillos, en particular para el estado comercial de fruto maduro, siendo posible incluso la obtención de algunos híbridos transgresivos, i.e. con niveles más altos que la mejor stirpe parental.
5. Finalmente, el estudio de regresión padres vs híbridos permitió hallar que el valor del parental medio correspondiente puede tener una considerable capacidad predictiva del comportamiento del híbrido, especialmente para el contenido en carotenoides. i.e. a mayor valor del parental medio mayor valor esperable en el híbrido. Por el contrario, no se identificó una relación significativa entre el valor parental medio y el de los híbridos para el contenido en fenoles.

BIBLIOGRAFÍA

5. BIBLIOGRAFÍA

Ahmed AF, Yu H, Yang X, Jiang W (2014). Deficit irrigation affects growth, yield, vitamin c content, and irrigation water use efficiency of hot pepper grown in soilless culture. HortScience 49:722-728.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.6.722>

Abdelgawad KF, El-Mogy MM, Mohamed MIA, Garchery C, Stevens RG (2019). Increasing ascorbic acid content and salinity tolerance of cherry tomato plants by suppressed expression of the ascorbate oxidase gene. Agronomy 9(2):51. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020051>

Argentel L., González L. M., Ávila C., Aguilera R. (2006). Comportamiento del contenido relativo de agua y la concentración de pigmentos fotosintéticos de variedades de trigo cultivadas en condiciones de salinidad. Cultivos Tropicales. 27 (3): 49-53.

Bioversity International, 2019. Crop descriptors and derived standards [WWW Document]. URL <https://www.bioversityinternational.org/e-library/publications/descriptors/> (accessed 4.10.20).

Boutelou C. (1817). Tratado del injerto. Madrid: Oficina de Don Francisco Martínez Dávila, Impresor de Cámara de S. M.

Borrás D, Plazas M, Moglia A, Lanteri S (2021). The influence of acute water stresses on the biochemical composition of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) berries. Journal of the Science of Food and Agriculture 101:4724-4734. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11118>

Calatayud A., Penella A., Mousd J.I., SanBautista A., López-Galarza S., Nebour S.G. (2013). Utilización del injerto de pimiento como solución frente a suelos salinos. Agrícola Vergel. Marzo 2013.

Cerruti E, Gisbert C, Drost HG, Valentino D, Portis E, Barchi L, ... Catoni M (2021). Grafting vigour is associated with DNA de-methylation in eggplant. Horticulture Research 8. <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00660-6>

BIBLIOGRAFÍA

Céspedes A.J., García M.C., Pérez J.J., Cuadrado I.M. (2009) Caracterización de la Explotación Hortícola Protegida Almeriense, Ed Cuadrado, I.M.

Chenoweth J, Hadjinicolaou P, Bruggeman A, Lelieveld J, Levin Z, Lange MA, Xoplaki E, Hadjikakou M (2011). Impact of climate change on the water resources of the eastern Mediterranean and Middle East region: Modeled 21st century changes and implications. *Water Resources Research* 47(6): W06506 <https://doi.org/10.1029/2010WR010269>

Coban A, Akhoundjad Y, Dere S, Dasgan HY (2020). Impact of salt-tolerant rootstock on the enhancement of sensitive tomato plant responses to salinity. *HortScience* 55:35-39. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14476-19>

Conforti F., Statti G.A., Menichini F. (2007). Chemical and biological variability of hot pepper fruits (*Capsicum annum* var. *acuminatum* L.) in relation to maturity stage. *Food Chemistry* 102: 1096-1104.

De Pascale S, Ruggiero C, Barbieri G, Maggio A. Physiological responses of pepper to salinity and drought. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2003;128(1):48-54.

Dewitt, D., Bosland, P.W. (1996). *Peppers of the world: an Identification guide*. Ten Speed Press. Berkeley Close, Reino Unido

Djidonou D, Zhao X, Simmone EH, Koch KE, Erickson JE (2013). Yield, water-, and nitrogen-use efficiency in field-grown, grafted tomatoes. *HortScience* 48:485-492. <http://dx.doi.org/10.21273/HORTSCI.48.4.485>

Djidonou D, Leskovar DI, Joshi M, Jifon J, Avila CA, Masabni J, Wallace RW, Crosby K (2020). Stability of yield and its components in grafted tomato tested across multiple environments in Texas. *Scientific Reports* 10:13535. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70548-3>

Egea I, Estrada Y, Faura C, Egea-Fernández JM, Bolarin MC, Flores FB (2023). Salt-tolerant alternative crops as sources of quality food to mitigate the

negative impact of salinity on agricultural production. *Frontiers in Plant Science* 14:1092885. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1092885>

Estañ M.T., Martínez-Rodríguez M.M., Pérez-Alfocea F. Flowers T. J., Bolarin M.C. (2005). Grafting raises the salt tolerance of tomato through limiting the transport of sodium and chloride to the shoot. *J. Exp. Bot.* 56; 703-712.

Eshbaugh, W.H. (1979). Biosystematic and evolutionary study of the *Capsicum pubescens* complex. En: National Geographic Research Reports, 1970 Projects. National Geographic Society, Washington, DC., E.E.U.U. 143-162 pp.

FAO (2015). Climate change and food security: risks and responses. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, pp 122.

FAO (2024). La labor de la FAO sobre el cambio climático. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/climate-change/en/> (visitada abril 2024).

Fernández E.J., Camacho F., Díaz M. (2006). El injerto en el control de enfermedades telúricas en hortalizas. En: Control de patógenos telúricos en cultivos hortícolas. Ediciones Aerotécnicas SL. 65-75.

Fita A, Rodríguez-Burruezo A, Boscaiu M, Prohens J, Vicente O (2015). Breeding and domesticating crops adapted to drought and salinity: a new paradigm for increasing food production. *Frontiers in Plant Science* 6:978. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00978>

Flórez J.S. 1986. Agricultura ecológica. Mundiprensa. Madrid. 401pp.

García M, Jauregui D. (2008). Efecto de la salinización con NaCl o Na₂SO₄ sobre la anatomía foliar en dos genotipos de caña de azúcar (*Saccharum* spp) con tolerancia salina diferencial *Emstia*. 18 (1): 89-105.

Gharibi S, Tabatabaei BES, Saeidi G, Goli SAH (2016). Effect of drought stress on total phenolic, lipid peroxidation, and antioxidant activity of *Achillea* species. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 178:796-809. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1909-3>

BIBLIOGRAFÍA

Gisbert-Mullor R, Pascual-Seva N, Martínez-Gimeno MA, López-Serrano L, Badal Marin E, Pérez-Pérez JG, ... López-Galarza S (2020). Grafting onto an appropriate rootstock reduces the impact on yield and quality of controlled deficit irrigated pepper crops. *Agronomy* 10(10):1529. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101529>

González F.M., Hernández A., Casanova A., Depestre T., Gómez L., Rodríguez M. G. (2008). El injerto herbáceo: Alternativa para el manejo de plagas del suelo. *Rev. Protección Veg.* 23 (2): 69-74.

Gornell J., Betts R., Burke E., Clark R., Camp J., Willett K., Witshire A. (2010). Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Phil. Trans, R. Soc. B.* 365: 2973-2989.

Grieneisen ML, Aegerter BJ, Stoddard CS, Zhang M (2018). Yield and fruit quality of grafted tomatoes, and their potential for soil fumigant use reduction. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 38:29. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0507-5>

Heiser, C.B., Smith, P.G., 1958. New species of *Capsicum* from South America. *Brittonia* 10, 194–201.

Heiser, C.B. (1976). Peppers-*Capsicum* (*Solanaceae*). In: "Simmonds, N. W. (Ed). Evolution of Crop Plants. Longman. London". 256-268.

Hollick JR, Kubota C (2022). Effect of self- and inter-cultivar grafting on growth and nutrient content in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Frontiers in Plant Science* 13:921440. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921440>

Hunziker, A.T., 2001. The Genera of Solanaceae: The Genera of Solanaceae Illustrated, Arranged According to a New System. Gantner Verlag, Ruggell.

Hunziker, A.T., 1956. Synopsis of the genus *Capsicum*, in: *Comptes Rendus Des Séances Et Des Communications*. pp. 73–74.

IBPGR, 1983. Genetic resources of *Capsicum*: a global plan of action. International Board of Plant Genetic Resources, Rome.

IPGRI, 1995. Descriptors for *Capsicum* (*Capsicum* spp.). International Plant Genetic Resources Institute, Rome.

Jeppesen E, Beklioğlu M, Zadereev E (2023). The effects of global climate change on water level and salinity: causes and effects. *Water* 15:2853. <https://doi.org/10.3390/w15152853>

King, S.R., Davis, A.R., Zhang, X., Crosby, K. (2010). Genetics, breeding and selection of rootstocks for *Solanaceae* and *Cucurbitaceae*. *Sci. Hortic.* 127, 106-111

Kopta T, Sekara A, Pokluda R, Ferby V, Caruso G (2020). Screening of chilli pepper genotypes as a source of capsaicinoids and antioxidants under conditions of simulated drought stress. *Plants* 9(3):364. <https://doi.org/10.3390/plants9030364>

Kumar P, Roupael Y, Cardarelli M, Colla G (2017). Vegetable grafting as a tool to improve drought resistance and water use efficiency. *Frontiers in Plant Science* 30(8):1130. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01130>

Kyriacou M.C., Roupael Y., Colla G., Zrenner R., Schwarz D. (2017). Vegetable grafting: the implications of a growing agronomic imperative for vegetable fruit quality and nutritive value. *Frontiers in Plant Science* 8:741. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00741>

Kraft, K.H.; Brown, C.H.; Nabhan, G.P.; Luedelin, E.; Luna-Ruiz, J.J.; Coppens d'Eeckenbrugge, G.; Hijmans, R.J; Gepts, P. (2014). Multiple lines of evidence for the origin of domesticated chili pepper, *Capsicum annuum*, in México. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111: 6165-6170.

Laddomada B., Blanco A., Mira G., D'Amico L., Singh R.P., Ammar K., Crossa J., Guzmán C. (2021). Drought and heat stress impacts on phenolic acids accumulation in durum wheat cultivars. *Foods* 10(9):2142. <https://doi.org/10.3390/foods10092142>

BIBLIOGRAFÍA

Lacasa A., Guerrero M.M., Guirao P., Ros C. (2002). Alternatives to Methyl Bromide in sweet pepper crops in Spain. Proceedings of international conference on alternatives to Methyl Bromide. Sevilla 5-8 de marzo de 2002. Batchelo T. & Bolivar J.M. Ed. European Commission.

Lee, J.M. (1994). Cultivation of grafted vegetables. I. Current status, grafting methods, and benefits. HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science (USA)

Li H, Hou X, Bertin N, Ding R, Du T (2023). Quantitative responses of tomato yield, fruit quality and water use efficiency to soil salinity under different water regimes in Northwest China. Agricultural Water Management 277:108134. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108134>

Linić I, Šamec D, Grúz J, Vujčić Bok V, Strnad M, Salopek-Sondi B (2019). Involvement of phenolic acids in short-term adaptation to salinity stress is species-specific among Brassicaceae. Plants 8(6):155. <https://doi.org/10.3390/plants8060155>

López-Martín J., Gálvez A., Fernández J.A. (2009). Agronomic behavior of grafted sweet pepper grown in a greenhouse in Mediterranean area. Acta Horticulturae. 807 (1): 655-660.

López-Marín J., Angosto J.L., González Benavente-García A. (2013). El cultivo de pimientos en el Campo de Cartagena, Comunidad Autónoma de Murcia, España. Grupo THM.

López-Martín J., Gálvez A., Porras I., Brotons-Martínez J.J. (2016). Injerto en pimiento (*Capsicum annuum*); Beneficios y rentabilidad de su uso. ITEA. Vol 112 (2). 127-146.

Madueño-Molina A., García-Paredes D., Martínez-Hernández J., Rubio-Torres C. (2006). Germinación y desarrollo de plántulas de frijolillo *Rhynchosia mínima* L DC en condiciones de salinidad. 24 (1): 47-54.

MAPA (2024). (Avance) Anuario de estadística 2023. Estadísticas agrarias (in Spanish). Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, Madrid, Spain. Retrieved 2024 March 15 from:

<https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/>

Mahmood T, Rana RM, Ahmar S, Saeed S, Gulzar A, Khan MA, ... Du X (2021). Effect of drought stress on capsaicin and antioxidant contents in pepper genotypes at reproductive stage. *Plants* 10(7):1286. <https://doi.org/10.3390/plants10071286>

Martínez V., Lacas C.M., Ros M.M., Guerrero A., Hernández J., Torres A. (2010). Efecto de la intensidad de la luz durante el injerto del pimiento en el comportamiento de las plantas injertadas. *Actas de Horticultura*. 58.

McLeod, M.J.; Guttman, S.I.; Eshbaugh, W.H. (1982). Early Evolution of Chili Peppers (*Capsicum*). *Economy Botany* 36 (4): 361-368.

Mesa D. (2003). Obtención de plantas resistentes a la salinidad para los suelos salinos cubanos. *Rev. Cubana de Ciencia Agrícola*. 37 (3): 217-226.

Meza N., Arizalete M., Bautista D. (2007). Efecto de la salinidad en la germinación y emergencia de semillas de parchita (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*). *Rev. Fac. Agron.* 24 (4): 69-80.

Morales-Soto A, García-Salas P, Rodríguez-Pérez C, Jiménez-Sánchez C, de la Luz Cádiz-Gurrea M, Segura-Carretero A, Fernández-Gutiérrez A (2014). Antioxidant capacity of 44 cultivars of fruits and vegetables grown in Andalusia (Spain). *Food Research International* 58:35-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.050>

Moreno Rodríguez J.M. *et al.*, (2010) Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto al cambio climático. Proyecto ECCE. Ministerio Medio ambiente. UCLM. 325 pp.

Morra L. (1997). L' innesso erbaceo cultura per cultura. *Colt. Prot.* 17-22.

Murcia-Asensi C., Fita A., Luis-Margarit A., Guijarro-Real C., Raigón MD., Blanca-Giménez V., Díez-Díaz M., Rodríguez-Burruezo A. (2024). Grafting in *Capsicum* peppers as a strategy to mitigate the effects of climate change on yield and quality factors. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. Vol. 52,

BIBLIOGRAFÍA

Issue 1, Art. 13653.

<https://www.notulaebotanicae.ro/index.php/nbha/article/view/13653/9755>

Naciones Unidas 2024. Acción por el clima. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change> (visitada marzo del 2023)

Núñez M., Mazorra L- M., Martínez L., González M. C., Robaina C. (2007). Análogos de brasoesteroides revierten parcialmente el impacto del estrés salino en el crecimiento inicial de las plántulas de dos genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.). cultivos Tropicales. 28 (2):. 95-99.

Nuez, F., Ortega, R.G., García, J.C., 2003. El Cultivo de Pimientos, Chiles y Ajíes. Mundi-Prensa.

Olmstead, R.G., Bohs, L., Migid, H.A., Santiago-Valentin, E., Garcia, V.F., Collier, S.M., 2008. A molecular phylogeny of the Solanaceae. Taxon 57, 1159–1181. <https://doi.org/10.2307/3284540>

Ortega-Albero N, González-Orenga S, Vicente O, Rodríguez-Burruezo A, Fita A (2023). Responses to salt stress of the interspecific hybrid *Solanum insanum* × *Solanum melongena* and its parental species. Plants 12(2):295. <https://doi.org/10.3390/plants12020295>

Padilla YG, Gisbert-Mullor R, López-Serrano L, López-Galarza S, Calatayud Á (2021). Grafting enhances pepper water stress tolerance by improving photosynthesis and antioxidant defense systems. Antioxidants 10(4):576. <https://doi.org/10.3390/antiox10040576>

Pellegrini N, Colombi B, Del Rio D, Salvatore S, Bianchi M, Brighenti F, Serafini M (2003). Total antioxidant capacity of plant foods, beverages and oils consumed in Italy assessed by three different in vitro assays. The Journal of Nutrition 133(9):2812-2819. <https://doi.org/10.1093/jn/133.9.2812>

Pereira-Dias L, Vilanova S, Fita A, Prohens J, Rodríguez-Burruezo A (2019). Genetic diversity, population structure, and relationships in a collection of pepper (*Capsicum* spp.) landraces from the Spanish centre of diversity revealed

by genotyping-by-sequencing (GBS). Horticulture Research 6:54.
<https://doi.org/10.1038/s41438-019-0132-8>

Perin E.C., da Silva-Messias R., Borowski J.M., Crizel R.L., Schott I.B., Carvalho I.R., Rombaldi C.V., Galli V. (2019). ABA-dependent salt and drought stress improve strawberry fruit quality. Food Chemistry 271:516-526.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.213>

Pickersgill, B., 1971. Relationships between weedy and cultivated forms in some species of chili peppers (genus *Capsicum*). Evolution (N. Y). 25, 683–691.
<https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1971.tb01926.x>

Razi K, Muneer S (2023). Grafting enhances drought tolerance by regulating and mobilizing proteome, transcriptome and molecular physiology in okra genotypes. Frontiers in Plant Science 14:1178935.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1178935>

Ribes-Moya AM, Raigón MD, Moreno-Peris E, Fita A, Rodríguez-Burruezo A (2018). Response to organic cultivation of heirloom *Capsicum* peppers: Variation in the level of bioactive compounds and effect of ripening. PLoS One 13(11):e0207888. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207888>

Ribes-Moya AM, Adalid AM, Raigón MD, Hellín P, Fita A, Rodríguez-Burruezo A (2020). Variation in flavonoids in a collection of peppers (*Capsicum* sp.) under organic and conventional cultivation: effect of the genotype, ripening stage, and growing system. Journal of the Science of Food and Agriculture 100:2208-2223. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10245>

Ricard C. L., Louws F. J. (2008). Grafting to heirloom tomato production. HortScience. 43: 2104-2111.

Rodríguez-Burruezo *et al.* 2016. Cap. 21. Pimiento. En: Las variedades locales en la mejora genética de plantas. Servicio Publicaciones Gobierno Vasco. pp. 405-426.

Rodríguez-Burruezo A., Prohens J., Raigón M.D., Nuez F. (2009). Variation for bioactive compounds in ají (*Capsicum baccatum* L.) and rocoto (*C.*

BIBLIOGRAFÍA

pubescens R. & P.) and implications for breeding. *Euphytica* 170:169-181.
<https://doi.org/10.1007/s10681-009-9916-5>

Rodríguez-Burruezo, A.; Pereira-Dias, L.; Fita, A. (2016). Cap 21. Pimiento. En: Las variedades locales en la mejora genética de plantas (Eds. Ruiz de Galarreta, J.I.; Prohens, J.; Tierno, R.). Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria. 405-426.

Ropokis A., Ntatsi G., Kittas C., Katsoulas N., Savvas D. (2019). Effects of temperature and grafting on yield, nutrient uptake and water use efficiency of a hydroponic sweet pepper crop. *Agronomy* 9(2):110.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9020110>

Ros C., Martínez M.A., Guerrero M.M., Torres J., Lacasa M. C., Bello A. (2007). Comportamiento de la resistencia a *Phytophthora* y *Meloidogyne* de patrones de pimiento. *Actas de Horticultura*. 48: 534-537.

Rouphael Y., Schwarz D., Krumbein A., Colla G. (2010). Impact of grafting on produce quality of fruit vegetables. *Scientia Horticulturae* 127(2):172-179.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.09.001>

Russo, V.M., 2012. Peppers: Botany, Production and Uses. CABI, Wallingford, UK.

Santamaría-César J., Figuera-Visamontes U., Median-Morales M.C. (2004). Productividad de la alfalfa en condiciones de salinidad en lagunera. 22 (3): 343-349.

Sarker U., Oba S. (2018). Drought stress enhances nutritional and bioactive compounds phenolic acids and antioxidant capacity of *Amaranthus* leafy vegetable. *BMC Plant Biology* 18:258. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1484-1>

Semiz G.D., Suarez, D.L. (2019). Impact of grafting, salinity and irrigation water composition on eggplant fruit yield and ion relations. *Scientific Reports* 9:19373. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55841-0>

Singh H., Kumar P., Kumar A., Kyriacou M.C., Colla G., Roupael Y. (2020). Grafting tomato as a tool to improve salt tolerance. *Agronomy* 10(2):263. <https://doi.org/10.3390/agronomy/0020263>

Singh B.K., Delgado-Baquerizo M., Egidi E., Guirado E., Leach J.E., Liu H., Trivedi P. (2023). Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology* 21(10):640-656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>

Suarez D.L., Celis N., Ferreira J.F.S., Reynolds T., Sandhu D. (2021). Linking genetic determinants with salinity tolerance and ion relationships in eggplant, tomato and pepper. *Scientific Reports* 11:16298. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95506-5>

Syngenta Vegetables Seeds Global (2024). Herminio F1. Retrieved 2024 March 15 from: <https://UJWUJ.syngentavegetables.com/es-es/product/seed/pimiento/Herminio>

Taha S.S., Abdel-Wahab A., Hosny S. (2022). Grafting as a tool for improved water use efficiency, physio-biochemical attributes of cucumber plants under deficit irrigation. *Journal of Applied Horticulture* 24:53-59. <https://doi.org/10.37855/jah.2022.v24i01.10>

Taiz L., Zeiger E. (2006). *Plant physiology* 4th ed. Sunderland. Mass Sinauer Associates. 764 pp.

Toppino L., Prohens J., Rocino G.L., Plazas M., Parisi M., Carrizo-García C., Tripodi P. (2021). Pepper and Eggplant Genetic Resources. In: Carputo D., Aversano R., Ercolano M.R. (Eds). *The Wild Solanums Genomes. Compendium of Plant Genomes*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30343-3_6

Trenberth K.E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research* 47:123-138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>

Ullah A., Bano A., Khan N. (2021). Climate change and salinity effects on crops and chemical communication between plants and plant growth-promoting

BIBLIOGRAFÍA

microorganisms under stress. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5:618092.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.618092>

Van de Wal B.A.E., Van Meulebroek L., Steppe K. (2017). Application of drought and salt stress can improve tomato fruit quality without jeopardising production. *Acta Horticulturae* 1170:729-736.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.92>

Villa-Castornea M., Catalán-Valencia E.A., Izunza-Ibarra M.A., Ulery A.L. (2006). Absorción y traslocación de sodio y cloro en plantas de Chile fertilizadas con nitrógeno y crecidas con estrés salino. *Fitotecnia Mexicana*, 29 (1): 79-88.

Winsemius H.C., Jongman B., Veldkamp T.I., Hallegatte S., Bangalore M., Ward P.J. (2018). Disaster risk, climate change, and poverty: assessing the global exposure of poor people to floods and droughts. *Environment and Development Economics* 23(3):328-348. <https://doi.org/10.1017/Si355770XI7000444>

World Economic Forum (2023). How to mitigate the effects of climate change on global food security. Retrieved 2024 March 15 from: <https://www.weforum.org/agenda/2023/04/mitigate-climate-change-food-security/>

Zapata, M.; Bañón, S.; Cabrera, P. (1992). *El pimiento para pimentón*. Mundi-Prensa, Madrid. 240 pp.