

Retos del futuro de la mejora genética del almendro en el CITA de Aragón

María José Rubio-Cabetas^{1,2}, Beatriz Bielsa^{1,2}, Clara Córdoba^{1,2}, Najla Ksouri³, María Ángeles Sanz^{2,4}, Gloria Estopañán⁴, Jérôme Grimplet^{1,2}.

¹ Departamento de Ciencia Vegetal. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Zaragoza, España.

² Instituto Agroalimentario de Aragón - IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), Zaragoza, España.

³ Departamento de Sistemas Agrícolas Forestales y Medio Ambiente (SAFMA). Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Zaragoza, España.

⁴ Área de Laboratorios de Análisis y Asistencia Tecnológica. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Zaragoza, España.

España sigue siendo el tercer productor de almendra por detrás de Australia y EE.UU. En 2022, se registró una producción mundial de 3.630.427,66 t sobre una superficie de 2.357.075 ha; el mayor productor mundial es EE.UU. con 1.872.500 t, seguido de Australia (360.328 t), España (245.990 t) y Turquía (190.000 t). Si se compara el volumen de producción con la superficie cultivada, se puede ver que no existe una correlación real entre ambos datos. Así, EE.UU., con una superficie de 546.332 ha, produce significativamente más que España, cuya superficie es de 761.660 ha (Faostat, 2022).

El cultivo del almendro está considerado como un cultivo de alto valor, debido a la alta producción que se puede obtener con las nuevas variedades autocompatibles y de floración tardía adaptadas a distintas condiciones edafoclimáticas, acompañado por el uso de nuevos portainjertos que controlan el vigor. Las nuevas plantaciones de almendro son el resultado de avances tecnológicos tanto en material vegetal como en el manejo de estas, aplicando podas mecánicas como la poda aragonesa (Laya *et al.* 2023) que evita el uso de mano de obra tan escasa en la agricultura. Todo ello hace que el coste

El programa de mejora genética del CITA ha perseguido desde hace años la mejora del cultivo a través de la introducción de variedades de floración tardía y extratardía, la calidad de la almendra como un objetivo prioritario, la elección del patrón como un factor determinante en el diseño de las plantaciones modernas y, actualmente, incorpora las herramientas biotecnológicas, implementando estrategias ómicas que permitirán la selección precisa de los caracteres de interés para el futuro del cultivo.



1987). Esta variedad fue la primera que reunía estos dos caracteres de interés puesta a disposición del sector productor en 1988, expandiéndose posteriormente y llegando a considerarse como referencia. Entre las variedades obtenidas por el CITA se encuentran Soleta e Isabelona, dos variedades autógamas, de floración tardía y con relativa tolerancia a las heladas primaverales (Socias i Company y Felipe, 2007); y Felama, variedad de reciente obtención (Rubio-Cabetas *et al.*, 2024) con floración igual que Soleta, pero con maduración más temprana. Como variedades de floración extratardía, se seleccionaron Vialfas y Mardía (**cuadro I**), esta última considerada la más tolerante a mancha ocre (Socias i Company *et al.*, 2008, 2015).

En 2007, se incorporó el estudio de la calidad de la almendra como un objetivo prioritario del programa de mejora genética del almendra del CITA. Los indicadores químicos investigados han sido los que caracterizan la calidad de la pepita para su uso y comercialización y los componentes con interés nutricional. En relación con la calidad del fruto, se ha determinado el contenido de aceite, indicador que condiciona la industrialización de la almendra y dentro de esta fracción, los ácidos grasos, donde son mayoritarios los insaturados, ácido oléico (C18:1) y ácido alfa-linoléico, (18:2), y la ratio entre ellos marca la estabilidad del fruto en almacenamiento (**cuadro II**). Asimismo, se ha cuantificado la concentración de isómeros de tocoferol y tocotrienol del aceite, ambos monofenoles con actividad antioxidante fundamentales para la estabilidad a la oxidación de los ácidos grasos insaturados (UFAs) y además con actividad funcional en la dieta como vitamina E (Kodad *et al.*, 2014). Las variedades Soleta e Isabelona presentan un contenido equiparable o incluso superior al de variedades como Marcona, de reconocida calidad, y Desmayo Largueta, ambas con gran comercialización. Esto desemboca en una identificación singular

CUADRO II

COMPOSICIÓN PROMEDIO NUTRICIONAL DE LAS VARIEDADES DE ALMENDRA OBTENIDAS POR EL CITA.

Valores nutricionales	Variedad Guara	Variedad Soleta	Variedad Isabelona o Belona	Variedad Diamar o Mardía	Variedad Vialfas	Variedad Felama
Aceite total g/100 g sms	55,52	61,45	61,34	55,72	56,53	57,22
- % relativo ácido oléico C18:1	69,0	72,62	73,18	73,09	73,88	69,70
- % relativo ácido linoléico C18:2	20,51	18,28	17,85	17,36	16,21	19,92
- Total de ácidos grasos insaturados	90,35	91,71	92,50	91,19	90,74	90,40
- Ratio ácido oléico/ácido linoléico	3,36	3,97	4,10	4,21	4,56	3,50
- Tocoferoles-vitamina E mg/100 g aceite sms	60,72	49,65	47,55	38,51	43,52	33,32
Azúcares totales g/100 g sms	4,18	2,86	4,44	6,84	5,66	4,48
Fibra alimentaria total g/100g sms	11,34	10,0	10,0	12,16	11,90	10,89
Proteína (Nx5,18) g/100 g sms	22,08	18,92	16,33	20,11	19,23	18,68
Minerales totales g/100 g sms	3,24	2,69	2,88	3,31	3,37	3,42

CUADRO III

CONTENIDO MEDIO EN ANTIOXIDANTES TOTALES Y CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE LAS VARIEDADES DE ALMENDRA OBTENIDAS POR EL CITA.

Antioxidantes	Variedades					
	Guara	Soleta	Belona	Mardía	Vialfas	Felama
Poliifenoles totales mg ácido gálico/100 g mf	486,8	308,4	424,9	304,1	435,0	299,1
Flavonoides totales mg catequina/100 g mf	151,7	105,1	156,0	117,8	150,9	133,3
Proantocianidinas totales mg cianidina/100 g mf	240,3	182,9	281,3	192,8	329,0	157,1
Capacidad antioxidante (Ensayo FRAP) µmoles Fe (II)/100 g mf	9137,3	5791,9	9077,5	5406,2	9785,4	5817,5

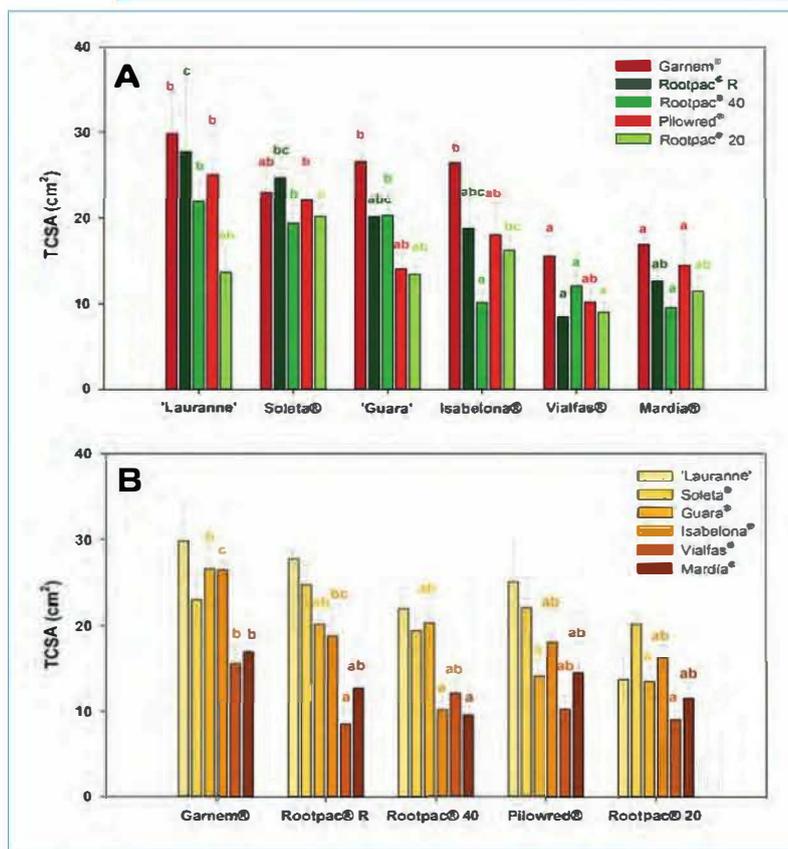
para Isabelona en el mercado (Socias i Company y Felipe 2007). Para completar el perfil nutricional de las muestras, se ha estudiado el contenido de proteína, la segunda fracción en importancia y que juega un papel esencial en la estructura del fruto. Actualmente, a nivel nutricional, se ha ampliado el estudio de la almendra, determinando el contenido en azúcares, importantes para el valor sensorial del fruto, los oligoelementos mayoritarios como son calcio, magnesio, potasio y fósforo, y la fibra alimentaria, fracciones todas ellas relevantes en la dieta. Otra línea de gran interés en el programa de mejora es el conocimiento de compuestos bioactivos en la almendra con la determinación de grupos de compuestos antioxidantes totales como los polifenoles, flavonoides y proantocianidinas (o taninos condensados)

(**cuadro III**), así como la evaluación de la capacidad antioxidante (Moreno-Gracia *et al.*, 2021).

Mejora genética de portainjertos

La elección del patrón es un factor determinante en el diseño de las plantaciones modernas ya que dicha elección afectará a características finales del árbol como son su vigor, anclaje, tamaño, productividad y calidad de fruto, así como su tolerancia a estreses abióticos y bióticos (Felipe *et al.*, 2022). Con la expansión del cultivo en regadío era necesario incorporar la resistencia a nematodos presentes en el sur de España. El CITA desarrolló la serie de híbridos rojos Garfi x Nema-red (GxN) Garnem, Felinem y Monegro (Felipe, 2009), y Pilowred (Bielsa *et al.*,

FIG. 1 Vigor (TCSA) de las variedades obtenidas por el CITA y la variedad Lauranne en un ensayo de marco intensivo injertadas en los portainjertos de la serie Rootpac y los dos híbridos rojos Garnem y Pilowred, mostrando la interacción portainjerto-variedad en treinta combinaciones distintas.



2023) (figura 1), que entre sus características destaca la resistencia a nematodos agalladores del género *Meloydogyne* spp. El híbrido de reciente comercialización, Pilowred, reduce considerablemente el vigor y tiene menos necesidades de frío, aspecto importante en un contexto climático de falta de horas de frío en muchas áreas frutícolas, además de su mayor uso eficiente del agua (Bielsa et al., 2018a) y tolerancia a clorosis.

En la actualidad, los patrones comerciales empleados son principalmente híbridos interespecíficos entre almendro x melocotonero y otras especies de

Prunus, como la serie Rootpac (Pinochet, 2010), que incorporan tolerancias a estreses abióticos y resistencias a enfermedades con gran relevancia socioeconómica, como son la podredumbre de raíces causada por *Armillaria mellea* o la podredumbre de cuello y raíz causada por especies del género *Phytophthora* (Palacio et al., 2017). En esta línea, resultados recientes obtenidos en ensayos realizados en el CITA, han revelado distintas preselecciones que presentan pocos o ausencia de síntomas asociados a *A. mellea* y *Phytophthora* spp., lo que les otorga un gran potencial para su uso como portainjertos

comerciales resistentes a estos hongos (Rubio-Cabezas et al., 2025).

Biotecnología aplicada a la mejora

El grupo actual de mejora genética de variedades y portainjertos de almendro del CITA incorpora las herramientas biotecnológicas, implementado estrategias -ómicas que permitirán la selección precisa de los caracteres de interés. La publicación del genoma del almendro cv. Texas (Alioto et al., 2020), ha proporcionado la primera referencia genómica de alta calidad para esta especie.

Este avance permitió identificar regiones génicas relevantes y facilitó el desarrollo de marcadores moleculares asociados a caracteres de interés agronómico. Una de las aplicaciones destacadas es la selección asistida por marcadores (SAM) para la mejora de la autocompatibilidad (gen *Sf*) y de floración tardía (gen *Lb*). Además, la genómica y la transcriptómica han sido disciplinas fundamentales para descifrar bases moleculares complejas y analizar la expresión diferencial de genes en respuesta a condiciones ambientales adversas. Por ejemplo, mediante tecnologías como RNA-seq, se han identificado redes de regulación génica implicados en la respuesta a la sequía, heladas y enfermedades en diversas variedades de almendro. Esto ha permitido la identificación de marcadores de tolerancia al frío útiles en selecciones futuras (Bielsa et al., 2021). La genómica también ha sido clave para profundizar en las bases moleculares de la tolerancia a la asfixia radicular en ciruelos mirabolanes (Rubio-Cabezas et al., 2018) y de la resistencia a la sequía en Garnem (Bielsa et al., 2018a, 2018b, 2019).

En particular, se ha determinado que Pilowred posee un uso más eficiente del agua aún mayor que los otros híbridos rojos (Rubio-Cabezas et al., 2025), lo que representa un avance significativo en la mejora de portainjertos para suelos con

escasez hídrica. En la misma línea, se han estudiado los mecanismos moleculares que regulan la arquitectura del almendro y la interacción entre la variedad y el portainjerto, analizando cómo estas combinaciones influyen en el porte y en el desarrollo de unas ramificaciones determinadas. Estos estudios han sido esenciales para seleccionar portainjertos y variedades con distintos tamaños y portes adaptados a nuevos sistemas de cultivo intensivo en marcos de plantación más estrechos (Montesinos *et al.*, 2021, 2023, 2024) (foto 1).

Adicionalmente, en el CITA se han llevado a cabo estudios de genotipado mediante arrays de SNPs y secuenciación de nueva generación (NGS), lo que ha permitido analizar la diversidad genética y la estructura poblacional del almendro. Estos análisis permiten la identificación de variantes genéticas y sirven de base para el desarrollo de estudios de asociación de genoma completo (GWAS). La reciente publicación de la tercera versión del genoma del almendro cv. Texas (Phase 0 y Phase 1) (Castanera *et al.*, 2024) ha supuesto un gran avance en la investigación genómica de esta especie. Esta nueva versión ha refinado la resolución del ensamblaje genómico, mejorando así la anotación de genes. Como resultado, se ha incrementado la precisión de los análisis moleculares y transcriptómicos, permitiendo la detección más exacta de variantes funcionales y facilitando la implementación de estrategias avanzadas de mejora genética.

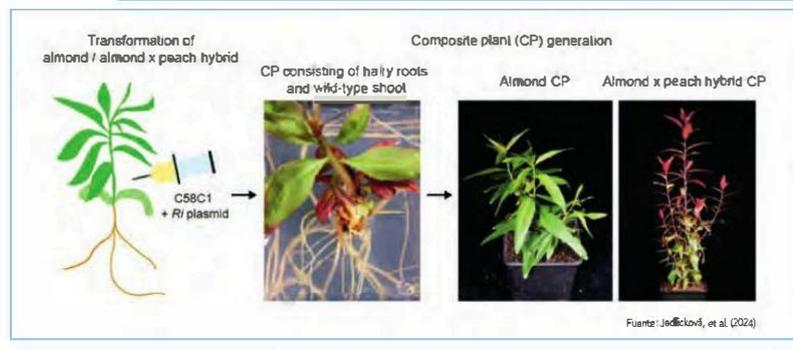
Los desafíos del futuro

Con la entrada en vigor de la Agenda 2030, que pretende la reducción del uso de agroquímicos que, en muchos casos, generan importantes problemas medioambientales, es crucial la búsqueda de alternativas que proporcionen equilibrio entre productividad y sostenibilidad. Asi-



Foto 1. Porte y arquitectura de selecciones avanzadas del programa de mejora del CITA injertadas en los portainjertos Pilowred (izquierda) y Garnem (derecha).

FIG. 2 Esquema del proceso de edición genética mediante CRISPR-Cas9 en el que se obtienen y seleccionan raíces adventicias transformadas a partir de las cuales se obtienen plantas completas.



mismo, en lo que respecta al desarrollo de nuevas variedades, en el CITA, además de haber desarrollado la variedad Mardía, resistente a mancha ocre, se están evaluando fuentes de resistencia a enfermedades, como son el cribado causado por *Thyrostoma carpophilum*, chancros y seca de ramas causados por *Neofusicoccum amygdali* y *Diphorte amygdali*. Actualmente, se están identificando los marcadores del gen *RMia*, asociado a la resistencia de nematodos agalladores en almendro para la selección de los múltiples de genotipos híbridos, para desarrollar variedades con mayor número de resistencias, así como la identificación de los genes *R* en el nuevo genoma del almendro. Por otro lado, el CITA, para la implementación de estrategias ómicas, está desarrollando metodo-

logía para el estudio de grandes poblaciones de variedades locales, silvestres o de descendencia. Esto permitirá identificar fuentes de adaptabilidad al medio ambiente para promover la resistencia a estrés abiótico y enfermedades. Además, el acceso a los genes de interés para la mejora del almendro ha permitido desarrollar estrategias de edición genética. Desde el CITA, se ha avanzado en este aspecto con la puesta a punto de un protocolo de edición genética mediante CRISPR-Cas9 en raíces (figura 2) para la evaluación funcional de genes de interés en mejora (Jedlicková, *et al.* 2024). ■

BIBLIOGRAFÍA

Existe una amplia relación bibliográfica a disposición de los lectores en el correo electrónico relacion@eumedia.es.