

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

MÁSTER INTERUNIVERSITARIO EN MEJORA GENÉTICA VEGETAL



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

‘DIVERSIDAD A NIVEL RADICULAR DE ACCESIONES DE *CAPSICUM SP.* BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE CULTIVO’

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

ALUMNO:

Josué Saiz Pérez

DIRECTORA ACADÉMICA:

Ana María Fita Fernández



Instituto de Conservación y Mejora
de la Agrodiversidad Valenciana

Valencia, Julio de 2018



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Instituto de Conservación y Mejora
de la Agrodiversidad Valenciana

La Doctora D^a ANA MARÍA FITA FERNÁNDEZ profesora del Master Oficial Interuniversitario en Mejora Genética Vegetal, en calidad de directora del Trabajo de Fin de Máster, por la Presente,

RECONOCE

Que el Trabajo Fin de Máster realizado por el/la alumno/a D./D^a.: JOSUE SAIZ PEREZ, con el título: “DIVERSIDAD A NIVEL RADICULAR DE ACCESIONES DE CAPSICUM SP. BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE CULTIVO” y realizado bajo mi dirección, reúne las condiciones necesarias para completar la formación del alumno y por tanto,

AUTORIZA

La presentación del citado Trabajo Final de Máster para su defensa ante el correspondiente Tribunal.

Y para que así conste a los efectos oportunos así lo firmo,

Le Rheu (Francia), 20 de Julio de 2018

Fdo: ANA MARÍA FITA FERNÁNDEZ
Máster Oficial en Mejora Genética Vegetal

Resumen

El género *Capsicum* sp. es uno de los cultivos hortícolas más importantes y extendidos a nivel mundial. El auge de manejos agrarios distintos al convencional, como es el caso del ecológico, hace necesaria la investigación de la interacción de los cultivos hortícolas con los distintos sistemas de cultivo utilizados. Por ello, en el presente trabajo se ha procedido a realizar un análisis fenotípico del sistema radicular de 19 genotipos pertenecientes a varias especies cultivadas de este género bajo dos regímenes de cultivo: convencional y ecológico. Para su fenotipado, se utilizaron dos plataformas diferentes disponibles en el mercado, como son: Plataforma de fenotipado de pimiento y WinRhizo. Los resultados obtenidos, mostraron la gran diversidad intraespecífica e interespecífica del sistema radicular existente en este género, así como su interacción con el sistema de cultivo utilizado. Estas diferencias fueron constatables en los distintos caracteres morfológicos medidos, lo cual muestra la idoneidad de cada genotipo para cada sistema de cultivo.

Abstract

The genus *Capsicum* sp. is one of the most important and spread vegetables all over the world. The rise of different agricultural production systems to conventional, as the organic system is, make necessary the research about the interaction of crops with the agricultural production systems used. For that, in the present study we have proceeded to analyse phenotypically the root systems of 19 genotypes from different cultivated species of this genus under two different agricultural production systems: Conventional and organic. We have used two commercial phenotyping platforms to achieve that: Pepper Shovelomics Scoreboard & WinRhizo. Our results, shown the enormous intraspecific and interspecific diversity existent on the root system of *Capsicum* sp., as well as its interaction with both agricultural production systems. These differences were significant for different morphological traits measured, which shows the suitability of each genotype for each agricultural production system.

Palabras clave: *Capsicum* sp., sistema radicular, agricultura convencional, agricultura orgánica, caracterización fenotípica.

Keywords: *Capsicum* sp., root system, conventional farming, organic farming, phenotypic characterization

AGRADECIMIENTOS

Dos años han pasado ya... y concluye otro ciclo. Querría dar las gracias en primer lugar a mis padres, ejemplo constante de lucha: Raimundo y Amparo, sin cuyo sumo esfuerzo me habría sido imposible seguir cursando mis estudios superiores. A mi tía Conchi, por su ayuda y comprensión; a Angelita y Jose A., mis segundos padres; y a Mari y a la matriarca Carmen por su ayuda.

Agradecer también -como no-, a esa familia sin vinculación genética, la que se elige: mis amigos. Gracias a los Carlos, Jorges, Pablo, Pepe, Sergio, Resu, Antonio, Juanfran, Ana, Araceli... ellos saben quiénes son. Por ayudarme a desconectar y por escucharme cuando lo he necesitado, tanto para lo bueno como para lo malo.

A M^a Carmen, por aguantarme en mis altibajos y manías, por comprender mis metas y objetivos, siendo un sacrificio mutuo.

Finalmente, a Ana y Adrián, por haberme ayudado en todo lo que han podido en estos dos años. También a Estela, Carla y Ana, sin cuya ayuda este proyecto no habría podido salir adelante. Gracias también al conjunto del profesorado del máster, el cual nos ha brindado una formación excepcional.

A los que me apoyaron y ayudaron, a los que me siguen apoyando y ayudando: mil gracias. El viaje continúa...

ÍNDICE

1. **INTRODUCCIÓN**

| | |
|--|----|
| 1.1. El género <i>Capsicum sp.</i> : Taxonomía y botánica..... | 1 |
| 1.2. Importancia económica..... | 4 |
| 1.3. Domesticación y expansión del cultivo..... | 8 |
| 1.4. Especies cultivadas y tipos varietales..... | 12 |
| 1.4.1. <i>Capsicum annuum</i> | 13 |
| 1.4.2. <i>Capsicum baccatum</i> | 14 |
| 1.4.3. <i>Capsicum chinense</i> | 15 |
| 1.4.4. <i>Capsicum frutescens</i> | 16 |
| 1.4.5. <i>Capsicum pubescens</i> | 17 |
| 1.5. Manejo agrario del cultivo..... | 18 |
| 1.5.1. Sistemas de altos y bajos insumos..... | 19 |
| 1.5.1.1. Características del cultivo convencional..... | 20 |
| 1.5.1.2. Características del cultivo ecológico..... | 21 |
| 1.6. Importancia del sistema radicular..... | 22 |

2. **OBJETIVOS**..... 24

3. **MATERIAL Y MÉTODOS**..... 25

| | |
|--|----|
| 3.1. Material vegetal..... | 25 |
| 3.2. Condiciones de cultivo y diseño experimental..... | 25 |
| 3.2.1. Condiciones de cultivo..... | 25 |
| 3.2.2. Diseño experimental..... | 27 |
| 3.3. Extracción de muestras y fenotipado..... | 27 |
| 3.4. Análisis estadístico..... | 30 |

4. **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**..... 31

| | |
|---|----|
| 4.1. Resultados..... | 31 |
| 4.1.1. Parámetros fenotípicos evaluados con WinRhizo..... | 31 |
| 4.1.2. Parámetros fenotípicos evaluados con plataforma de fenotipado de pimiento..... | 34 |
| 4.1.3. Otros parámetros fenotípicos evaluados..... | 41 |
| 4.2. Análisis de correlaciones..... | 48 |
| 4.3. Discusión..... | 50 |

5. **CONCLUSIONES**..... 54

6. **BIBLIOGRAFÍA**..... 55

Índice de figuras:

| | |
|---|----|
| Figura 1. Árbol filogenético según Carrizo-García <i>et al.</i> , 2016, basado 2 genes plastidiales (<i>matK</i> y <i>psbA-trnH</i>) y 1 gen nuclear de copia única (<i>waxy</i>)..... | 3 |
| Figura 2. Datos de la producción, rendimiento y área cosechada en pimiento fresco (amarillo, rojo y azul claro, respectivamente) y deshidratado (azul oscuro, violeta y verde, respectivamente). Según FAOSTAT, 2018 | 5 |
| Figura 3. Porcentaje de producción en toneladas de cada continente respecto a la producción global en el periodo de 1994-2016. Según FAOSTAT, 2018..... | 6 |
| Figura 4. Mapas de distribución en su continente originario de las 5 especies domesticadas del género <i>Capsicum sp.</i> | 9 |
| Figura 5. Distribución y relaciones de flujo genético de los distintos clados propuestos por Carrizo García <i>et al.</i> , 2016. | 11 |
| Figura 6. Frutos de <i>C. annum</i> tipo 'Bell' variedad California. A: Frutos de la primera variedad comercializada en 1925 por la empresa Southern California (Extraído de Biodiversity Heritage Library). B: Variedades comerciales actuales (Extraído de supermercadoslatorre.com) | 12 |
| Figura 7. Diversidad de frutos y flor de <i>C. annum var. annum</i> . Extraído de Universidad de Wagenigen y jon.techno.cc, respectivamente. | 14 |
| Figura 8. Frutos y flor representativas de <i>C. baccatum var. pendulum</i> . Imágenes extraídas de Aguilar Medina, 2017. | 14 |
| Figura 9. Frutos de <i>chile habanero</i> y flor representativas de <i>C. chinense</i> Imágenes extraídas de Aguilar Medina, 2017. | 16 |
| Figura 10. Frutos de la variedad <i>Tabasco</i> de <i>C. frutescens</i> . Imágen extraída de Onalee's Seeds ©. | 17 |
| Figura 11. Flor y frutos de <i>C. pubescens</i> variedad <i>Rocoto</i> . Imágen extraída de Magic Garden Seeds ©. | 18 |
| Figura 12. Lamina escaneada en WinRHIZO con parte del sistema radicular de una planta, genotipo 'Ají dulce'. | 29 |
| Figura 13. Gráfico de medias y barras de error de la longitud radicular total (cm) para cada uno de los genotipos analizados..... | 32 |
| Figura 14. Gráfico de medias y barras de error del volumen radicular (cm ³) para cada uno de los genotipos analizados. | 32 |
| Figura 15. Gráfico de medias y barras de error del área proyectada (cm ²) para cada uno de los genotipos analizados. | 33 |

| | |
|--|----|
| Figura 16. Gráfico de medias y barras de error del área proyectada (cm ²) para cada uno de los genotipos analizados. | 33 |
| Figura 17. Gráfico de medias y barras de error del diámetro medio (mm) para cada uno de los genotipos analizados. | 34 |
| Figura 18. Gráfico de medias y barras de error del ángulo radicular (°) para cada uno de los genotipos analizados. | 36 |
| Figura 19. Gráfico de medias y barras de error de la longitud radicular evaluada (cm) para cada uno de los genotipos analizados. | 37 |
| Figura 20. Gráfico de medias y barras de error del grosor radicular promedio (cm) para cada uno de los genotipos analizados. | 37 |
| Figura 21. Gráfico de medias y barras de error del diámetro del tocón (cm) para cada uno de los genotipos analizados. | 38 |
| Figura 22. Gráfico de medias y barras de error de la distancia internodal radicular (cm) para cada uno de los genotipos analizados. | 39 |
| Figura 23. Gráfico de las diferentes clases observadas para cada genotipo en el manejo convencional. Clase A n° de raíces de grosor superior a 0.2 cm <10, Clase B [10-20), Clase C [20-30] y Clase D >30. | 40 |
| Figura 24. Gráfico de las diferentes clases observadas para cada genotipo en el manejo ecológico. Clase A n° de raíces de grosor superior a 0.2 cm <10, Clase B [10-20), Clase C [20-30] y Clase D >30. | 40 |
| Figura 25. Gráfico de medias y barras de error del peso del tocón seco (g) para cada uno de los genotipos analizados. | 42 |
| Figura 26. Gráfico de medias y barras de error del peso radicular en seco (g) para cada uno de los genotipos analizados. | 43 |
| Figura 27. Gráfico de medias y barras de error del peso de la parte aérea (kg) para cada uno de los genotipos analizados. | 43 |
| Figura 28. Gráfico de medias y barras de error la longitud radicular específica (m/g) para cada uno de los genotipos analizados. | 45 |
| Figura 29. Gráfico de medias y barras de error del ratio R/P (g/g) para cada uno de los genotipos analizados. | 46 |
| Figura 30. Gráfico de medias y barras de error de la densidad del tejido radicular (g/cm ³) para cada uno de los genotipos analizados. | 47 |

Figura 31. Se muestra una imagen lateral de los genotipos Numex 6-4, Piquillo y ECU-994 (De izquierda a derecha). Las imágenes superiores corresponden al manejo convencional, las inferiores al ecológico. 47

Índice de tablas:

Tabla 1. Jerarquía taxonómica del género *Capsicum sp.* según *The Integrated Taxonomic Information System*..... 1

Tabla 2. Clados establecidos atendiendo a razones genéticas y morfológicas del género *Capsicum sp.* Según Carrizo García *et al.*, 2016..... 2

Tabla 3. Media de la producción en toneladas de pimiento fresco en el periodo de 1994-2016 de los principales países productores..... 5

Tabla 4. Media de la producción en toneladas de pimiento deshidratado en el año 2016 y en el periodo de 1994-2016 de los principales países productores.. 6

Tabla 5. Datos de producción en España del año 2017 desglosados por comunidades autónomas. Se muestran: superficies de secano y regadío protegidas o al aire libre, junto con el rendimiento por hectárea y la producción total. Modificada de MAPAMA, 2017..... 7

Tabla 6. Genotipo, especie y zona de origen de los genotipos evaluados..... 26

Tabla 7. Caracteres fenotípicos evaluados con la Plataforma de fenotipado de pimiento y con *WinRhizo*..... 29

Tabla 8. Otros caracteres fenotípicos evaluados o derivados de los datos obtenidos..... 30

Tabla 9. Tabla de cuadrados medios resultantes del análisis de la varianza (ANOVA) para los parámetros analizados con *WinRhizo*. *: significativo para $p < 0,05$, **: significativo para $p < 0,01$ y ***: significativo para $p < 0,001$. ns: no significativo..... 31

Tabla 10. Tabla de cuadrados medios resultantes del análisis de la varianza (ANOVA) para los parámetros analizados con Plataforma de fenotipado de pimiento. *: significativo para $p < 0,05$, **: significativo para $p < 0,01$ y ***: significativo para $p < 0,001$. ns: no significativo..... 35

Tabla 11. Tabla de cuadrados medios resultantes del análisis de la varianza (ANOVA) para los parámetros relativos al peso de las distintas partes analizadas. *: significativo para $p < 0,05$, **: significativo para $p < 0,01$ y ***: significativo para $p < 0,001$ 41

Tabla 12. Tabla de cuadrados medios resultantes del análisis de la varianza (ANOVA) de los caracteres calculados con varios parámetros fenotípicos. *: significativo para $p < 0,05$, **: significativo para $p < 0,01$ y ***: significativo para $p < 0,001$ 44

Tabla 13. Análisis de correlaciones de Pearson, se muestran los valores r y su nivel de significatividad. *: significativo para $p < 0,05$, **: significativo para $p < 0,01$ y ***: significativo para $p < 0,001$ 49

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El género *Capsicum* sp. : Taxonomía y botánica

El género *Capsicum* L. perteneciente a la familia Solanaceae (Tabla 1), es uno de los cultivos hortícolas más diversificados a lo largo del planeta. Originario de las zonas templadas y tropicales de América del Sur, posee una gran diversidad en formas varietales, de las cuales algunas especies han sido domesticadas y utilizadas por el ser humano desde hace milenios. La necesidad de encontrar nuevas especias sustitutivas de la pimienta, cuyo comercio se encontraba monopolizado por la corona portuguesa, hizo que el pimiento -de ahí su nombre en castellano- fuese aceptado por la sociedad europea antes que otros componentes de la familia *Solanaceae* como el tomate (*Solanum lycopersicum*) y de este modo se extendió por todo el mundo. El descubrimiento de esta nueva especia en el nuevo mundo, compensó en parte la inversión promovida por la corona de Castilla y Aragón, gracias a la gran diversidad vegetal que se descubrió.

Tabla 1. Jerarquía taxonómica del género *Capsicum* sp. según *The Integrated Taxonomic Information System*

| | |
|----------------------|--------------------|
| Reino | Plantae |
| Subreino | Viridiplantae |
| Infrareino | Streptophyta |
| Superdivision | Embryophyta |
| Division | Tracheophyta |
| Subdivision | Spermatophytina |
| Clase | Magnoliopsida |
| Superorden | Asteranae |
| Orden | Solanales |
| Familia | Solanaceae |
| Género | <i>Capsicum</i> L. |

Actualmente se considera que el género está compuesto por más de 40 especies y subespecies diferentes (Según The Plant List), aunque algunos autores las reducen a 35 (Carrizo *et al.*, 2013) especies e incluso a 27 (Ibiza *et al.*, 2012). En cuanto a su nivel de ploidía y número de juegos cromosómicos ($x=2$), se han

encontrado especies con número cromosómico haploide de $n=12$ y $n=13$, siendo el más común $n=12$ (Sousa *et al.*, 2015). Este fenómeno, conocido como disploidía, ayuda a esclarecer los procesos de especiación que ha sufrido un género por los procesos biogeográficos. La clasificación y definición de especies, se ha realizado atendiendo a razones morfológicas, genéticas y citogenéticas. Entre los *taxa* de este género, encontramos las especies cultivadas: *Capsicum annum*, *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. pubescens*; sus formas silvestres, así como especies filogenéticamente próximas que pueden ser de gran interés para la búsqueda e introgresión de caracteres agrónomicamente útiles (Prohens *et al.*, 2017). Se han agrupado las distintas especies en 11 clados (Tabla 2), 4 de ellos monotípicos, atendiendo a sus similitudes filogenéticas y morfológicas, como puede ser el número cromosómico ($n=13$) de los clados Andinos y Atlánticos (Según Carrizo García *et al.*, 2016).

Tabla 2. Clados establecidos atendiendo a razones genéticas y morfológicas del género *Capsicum sp.* Según Carrizo García *et al.*, 2016

| Clade | Species/accessions | |
|--------------------|--------------------------------------|---|
| 1. Andean | <i>C. dimorphum</i> [*] | <i>C. rhomboideum</i> |
| | <i>C. geminifolium</i> | <i>C. scolnikianum</i> [*] |
| | <i>C. hookerianum</i> ^{1*} | <i>Capsicum aff. scolnikianum</i> |
| | <i>C. lanceolatum</i> | |
| 2. Caatinga | <i>C. caatingae</i> | <i>C. parvifolium</i> |
| 3. Flexuosum | <i>C. flexuosum</i> | <i>Capsicum aff. flexuosum</i> ^{2*} |
| 4. Bolivian | <i>C. caballeroi</i> [*] | <i>C. coccineum</i> [*] |
| | <i>C. ceratocalyx</i> [*] | <i>C. minutiflorum</i> [*] |
| 5. Longidentatum | <i>C. longidentatum</i> | |
| 6. Atlantic Forest | <i>C. campylopodium</i> | <i>C. recurvatum</i> |
| | <i>C. cornutum</i> | <i>C. schottianum</i> |
| | <i>C. friburgense</i> | <i>C. villosum</i> var. <i>villosum</i> ³ |
| | <i>C. hunzikerianum</i> [*] | <i>C. villosum</i> var. <i>muticum</i> ^{3*} |
| | <i>C. mirabile</i> | <i>Capsicum aff. mirabile</i> ^{2*} |
| | <i>C. pereirae</i> | <i>Capsicum sp. nov.</i> (GEB & CCG 3637) [*] |
| 7. Purple Corolla | <i>C. cardenasii</i> | <i>C. eximium</i> |
| | <i>C. eshbaughii</i> [*] | |
| 8. Pubescens | <i>C. pubescens</i> | |
| 9. Tovarii | <i>C. tovarii</i> | |
| 10. Baccatum | <i>C. baccatum</i> | <i>C. praetermissum</i> |
| | <i>C. chacoense</i> | |
| 11. Annum | <i>C. annum</i> | <i>C. frutescens</i> |
| | <i>C. chinense</i> | <i>C. galapagoense</i> |

La especiación, o divergencia, del ancestro común más reciente (ACMR) del género respecto a otras solanáceas filogenéticamente próximas como el tomate, la patata o la berenjena se produjo en el Terciario superior, hace 19,6 m.a., (Wu y Tanksley, 2010), como parecen indicar las traslocaciones cromosómicas y la

1. INTRODUCCIÓN

genómica comparada. Por el contrario, la diversificación del género se sucedería posteriormente, más concretamente en el Mioceno superior-Plioceno inferior (Figura 1), mediante eventos de especiación rápidos favorecidos por las oscilaciones climáticas de esa época (Turcheto-Zolet *et al.*, 2013). Hecho apoyado también por los datos del registro fósil y los análisis realizados en la familia *Solanaceae* por Sarkinen *et al.*, (2013) utilizando diversos genes nucleares y plastidiales.

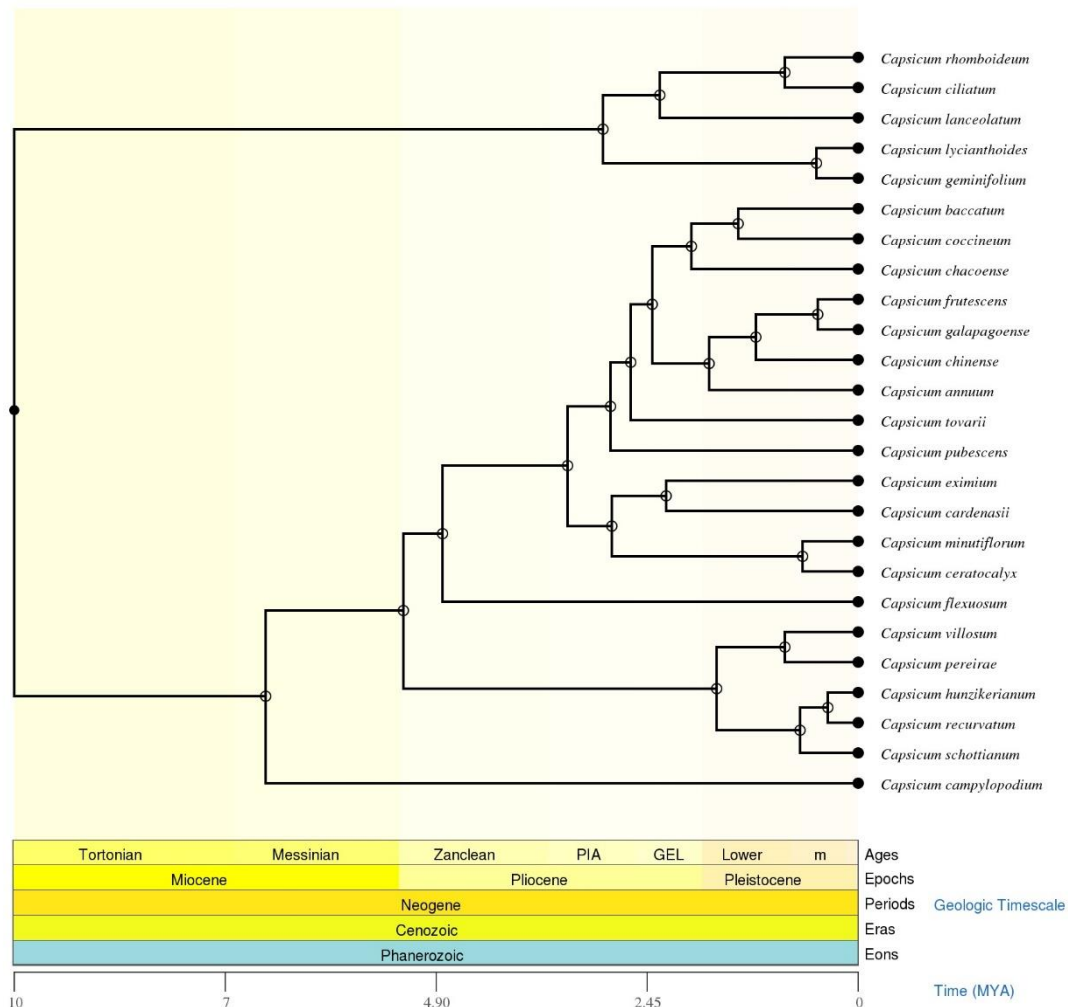


Figura 1. Árbol filogenético según Carrizo-García *et al.*, 2016, basado 2 genes plastidiales (*matK* y *psbA-trnH*) y 1 gen nuclear de copia única (*waxy*). Extraído de timetree.org

Si algo caracteriza a la mayoría de las especies o variedades consumidas de *Capsicum sp.* es su pungencia, generada por su capacidad para producir y almacenar compuestos capsaicinoides en el fruto (tipo baya). La mayor parte de estos compuestos se acumulan en la placenta del fruto, estando en menor parte en las semillas y el pericarpio.

1.2 Importancia económica

Las diferentes especies utilizadas del género *Capsicum sp.*, junto con su amplia expansión y apreciación a nivel mundial, le convierten en un cultivo de suma importancia económica. Más concretamente *Capsicum annum* var. *annuum*, la variedad más cultivada en superficie, y la que mayor producción de mercado genera si las comparamos con sus especies filogenéticamente más próximas. Actualmente el área destinada a su cultivo se ha visto ligeramente aumentada, pasando de 1.937.370 hectáreas en 2014 a 1.938.788 (FAOSTAT, 2018) en el caso de pimiento para consumo fresco. Lo mismo sucede con los destinados para consumo en seco, cuya cifra de hectáreas destinadas al cultivo ha pasado de 1.675.338 en 2014 a 1.798.847 en 2016 (FAOSTAT, 2018)

El pimiento es una ingrediente básico en muchas culturas gastronómicas del planeta. Su relevancia alimentaria reside asimismo en su completo perfil nutricional, superior al de otras variedades del género (Emmanuel-Ikpeme *et al.*, 2014 y Guil-Guerrero *et al.*, 2006).

La importancia económica de este cultivo también se debe a la multitud de productos industriales obtenibles de los frutos: oleorresinas, salsas, preparados alimenticios y principios activos de interés para la industria farmacéutica (Cichewicz y Thorpe, 1996 y Derry *et al.*, 2013). Una línea de investigación de importancia que se ha realizado es la caracterización de compuestos con capacidad anticancerígena en *Capsicum sp.*, aplicables a varios tipos de cáncer (Clark y Ho-Lee, 2016) y con efectos sinérgicos en presencia de otros principios activos (Morré y Morré, 2003).

Según datos de la FAO, encontramos dos grandes nichos de mercado, el del comercio de frutos frescos y el de frutos deshidratados. Ambos mercados están claramente diferenciados, siendo los principales países productores distintos en ambos casos. Como muestran los datos, el mercado de frutos frescos es significativamente superior en: superficie cultivada, producción total y rendimiento (Figura 2). El análisis de la progresión de este cultivo, indica una tendencia alcista, que ha ido incrementándose en las últimas décadas, llegando a duplicarse en los últimos 20 años en el caso del mercado de frutos 'verdes'.

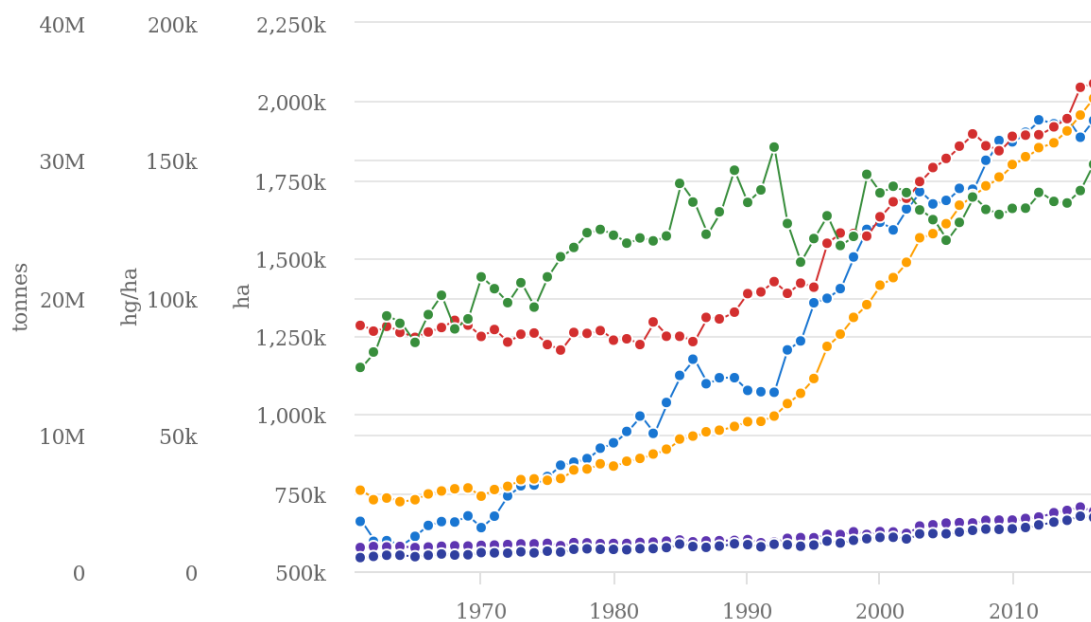


Figura 2. Datos de la producción, rendimiento y área cosechada en pimiento fresco (amarillo, rojo y azul claro, respectivamente) y deshidratado (azul oscuro, violeta y verde, respectivamente). Según FAOSTAT, 2018

La situación de las regiones productoras varía profusamente dependiendo de si el producto es en fresco o en seco. En el caso de producto fresco, España se sitúa entre los 10 mayores productores mundiales, si vemos los resultados de las últimas décadas, siendo también el principal productor europeo (Tabla 3). La lista está encabezada por China, como sucede en la producción de gran cantidad de cultivos.

Tabla 3. Media de la producción en toneladas de pimiento fresco en el periodo de 1994-2016 de los principales países productores.

| | |
|---------------------------|---------------|
| China | 11 869 716.83 |
| Méjico | 1 837 906.3 |
| Turquía | 1 717 952.7 |
| Indonesia | 1 165 313.52 |
| España | 974 858.35 |
| EE. UU | 856 908.26 |
| Nigeria | 712 440.57 |
| Egipto | 510 445.04 |
| República de Corea | 339 320.17 |
| Italia | 323 369.96 |

Si nos referimos a la producción continental en ese mismo periodo de tiempo para frutos frescos, encontramos a Asia como mayor productor, con más del 60% de la producción mundial, seguido de América, Europa, África y finalmente Oceanía, cuya producción es ínfima en comparación con el resto de continentes (Figura 3)

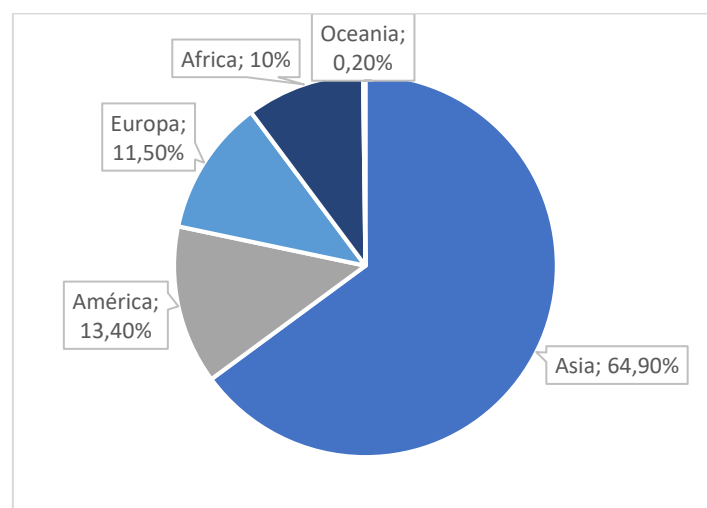


Figura 3. Porcentaje de producción en toneladas de cada continente respecto a la producción global en el periodo de 1994-2016. Según FAOSTAT, 2018

Los países involucrados en la producción y comercialización de pimientos deshidratados varían, a excepción de China. Reseñar que en el periodo 1994-2016, los principales países productores, al contrario que los de pimiento en fresco, si han sufrido grandes cambios a nivel productivo, duplicándose en algunos casos como es el de Costa de Marfil, como podemos ver en la tabla 4.

Tabla 4. Media de la producción en toneladas de pimiento deshidratado en el año 2016 y en el periodo de 1994-2016 de los principales países productores.

| 2016 | Toneladas | 1994-2016 | Toneladas |
|------------------------|-----------|------------------------|--------------|
| India | 1 389 000 | India | 1 165 432.22 |
| Tailandia | 379 349 | China | 241 968.91 |
| Etiopia | 329 804 | Tailandia | 155 088.26 |
| China | 306 980 | Pakistán | 127 245.78 |
| Costa de Marfil | 148 354 | Etiopia | 126 977.83 |
| Pakistán | 133 513 | Bangladesh | 117 447.09 |
| Bangladesh | 130 260 | Myanmar | 88 802.65 |
| Myanmar | 129 361 | Vietnam | 82 789.48 |
| Ghana | 115 558 | Ghana | 64 971.43 |
| Vietnam | 95 647 | Costa de Marfil | 63 313.26 |

1. INTRODUCCIÓN

Analizando la situación de España (Tabla 5), la principal productora es Andalucía, debido a dos causas principalmente: la posibilidad de cultivar en ciclo de invierno debido a las temperaturas cálidas y la expansión de los cultivos intensivos que se han realizado, poseyendo mayor producción de cultivo de invernadero con regadío (MAPAMA, 2017). Si bien, la producción se halla repartida por todo el estado, algo favorecido por la gran cantidad de variedades tradicionales y cultivos no intensivos que no han seguido esta tendencia en otras regiones. El mercado de las guindillas -tipo varietal de *C.annuum* var. *annuum*- también es de interés en España, aunque su cultivo no está tan extendido, ni su producción es tan cuantiosa (Datos MAPAMA, 2017)

Tabla 5. Datos de producción en España del año 2017 desglosados por comunidades autónomas. Se muestran: superficies de secano y regadío protegidas o al aire libre, junto con el rendimiento por hectárea y la producción total. Modificada de MAPAMA, 2017

| Comunidades Autónomas | Superficie (hectáreas) | | | | Rendimiento (kg/ha) | | | Producción (toneladas) |
|-------------------------------|---------------------------|------------|-----------|--------|------------------------|------------|-----------|---------------------------|
| | Regadío | | | | Regadío | | | |
| | Secano | Aire libre | Protegido | Total | Secano | Aire libre | Protegido | |
| GALICIA | – | 557 | 640 | 1.197 | – | 57.228 | 63.555 | 72.551 |
| P. DE ASTURIAS | 42 | 10 | – | 52 | 7.900 | 14.600 | – | 478 |
| CANTABRIA | 3 | – | – | 3 | 12.000 | – | – | 36 |
| PAÍS VASCO | 93 | 128 | 47 | 268 | 8.425 | 15.713 | 32.170 | 4.307 |
| NAVARRA | – | 1.090 | 27 | 1.117 | – | 30.345 | 35.000 | 34.021 |
| LA RIOJA | – | 179 | 3 | 182 | – | 31.000 | 42.000 | 5.675 |
| ARAGÓN | – | 172 | 3 | 175 | – | 17.326 | 47.000 | 3.121 |
| CATALUÑA | 3 | 210 | 52 | 265 | 7.060 | 22.273 | 44.277 | 7.000 |
| BALEARES | – | 65 | 31 | 96 | – | 20.870 | 37.000 | 2.504 |
| CASTILLA Y LEÓN | – | 118 | 3 | 121 | – | 20.534 | 28.500 | 2.509 |
| MADRID | – | 11 | 1 | 12 | – | 27.000 | 50.000 | 347 |
| CASTILLA-LA MANCHA | 2 | 1.076 | – | 1.078 | 8.000 | 38.113 | – | 62.540 |
| C. VALENCIANA | – | 459 | 388 | 847 | – | 38.369 | 108.696 | 59.786 |
| R. DE MURCIA | – | 268 | 1.257 | 1.525 | – | 58.000 | 128.000 | 176.440 |
| EXTREMADURA | – | 674 | 12 | 686 | – | 40.854 | 254.084 | 30.584 |
| ANDALUCÍA | 15 | 1.557 | 10.879 | 12.451 | 6.033 | 38.262 | 67.624 | 795.335 |
| CANARIAS | 3 | 59 | 182 | 244 | 10.000 | 41.949 | 80.027 | 17.030 |
| ESPAÑA | 161 | 6.633 | 13.525 | 20.319 | 8.130 | 37.410 | 74.185 | 1.274.264 |

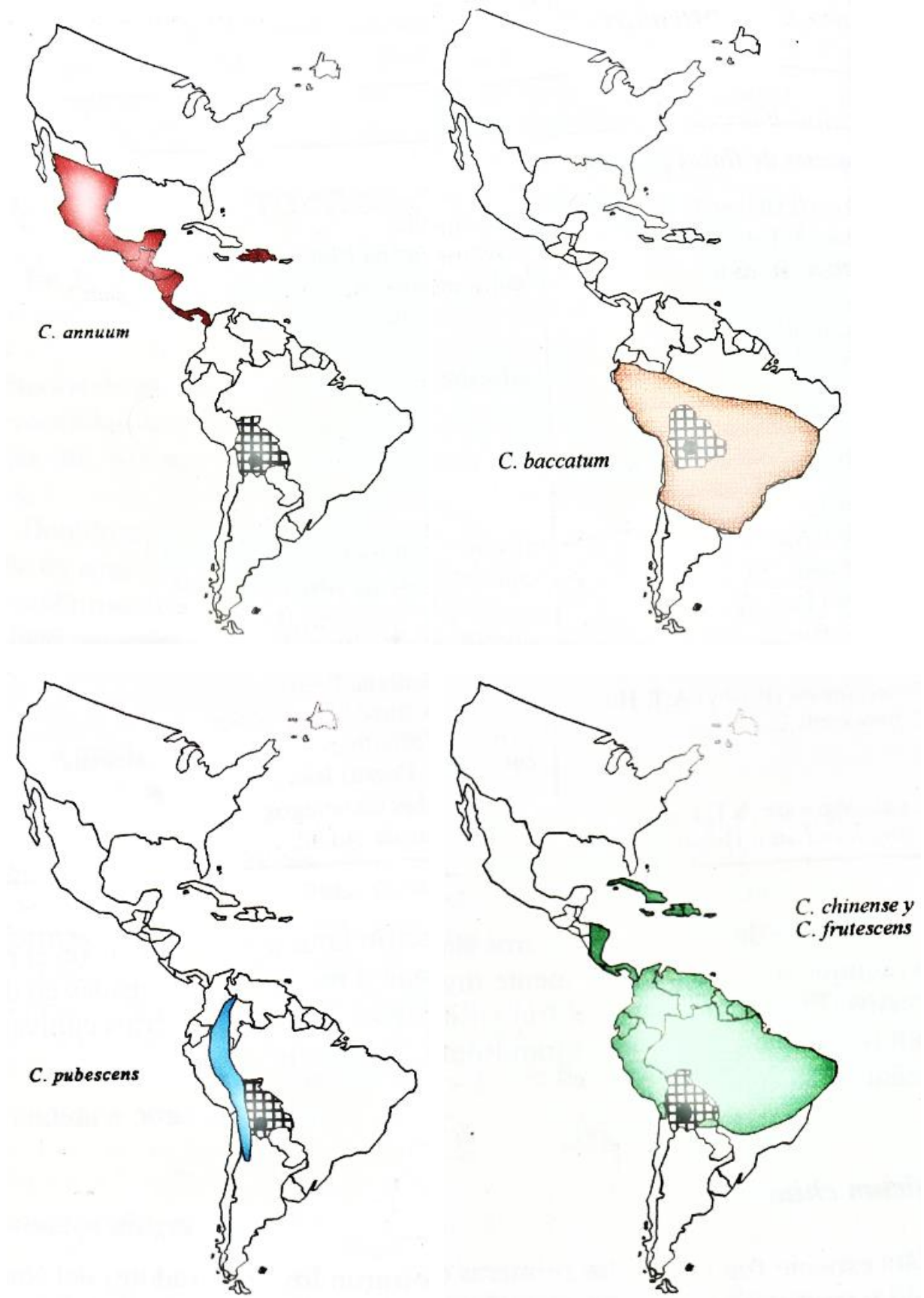
El valor de mercado en el año 2015 del comercio de frutos, sin contar los derivados para pimentón u otros, alcanzó un valor superior a los mil millones de euros en el estado español. Pese a que la superficie en cultivo se ha visto reducido en los últimos años, el rendimiento ha aumentado, alcanzando cotas de producción de 2006 (Anuario de Estadística, MAPAMA 2016).

1.3 Domesticación y expansión del cultivo

A lo largo del siglo pasado se han propuesto diversas hipótesis sobre el origen y domesticación de las formas cultivadas de *Capsicum sp.*; sin embargo, la hipótesis comúnmente más aceptada fue la propuesta por Mc Leod *et al.* (1982). Esta sitúa el centro de origen del género en Bolivia, que tras posteriores expansiones e introducciones habría dado lugar a los diversos grupos conocidos siguiendo un modelo de evolución oligocéntrico. Este origen en Bolivia, podría ser resultado de la combinación de los macroclimas que se dan en esta región: Tropical, Subtropical y Templado, características geobotánicas que habrían favorecido su diversificación.

Mc Leod *et al.* (1982) clasifica sistemáticamente al género en 3 grupos diferenciados: *C. gr. pubescens* con flores púrpuras, expandido por las zonas altas de los Andes (1200-3000 msnm), en el que se incluyen *C. eximium*, *C. cardenasii*, y *C. pubescens*; y los grupos de flores blancas, que se dividen a su vez en otros dos: *C. gr. baccatum* y *C. gr. annuum*, que incluye *C. chinense*, *C. annuum* y *C. frutescens* (Ibiza *et al.*, 2007, Ince *et al.*, 2009). Un ancestro común a todos ellos habría sido el acervo genético base sobre el cual la evolución habría generado esos grupos diferenciados. Gracias a la colonización de nuevos hábitats y, a la explotación de nuevos nichos ecológicos a lo largo del continente (junto con los procesos de especiación inherentes que esto conlleva) la influencia antropogénica habría creado las formas cultivadas de manera posterior, utilizando como material base los genotipos de los que disponían en sus zonas de influencia. En la figura 4 se muestran las zonas de distribución de las 5 especies cultivadas (Extraído de Nuez *et al.*, 1998).

Figura 4. Mapas de distribución en su continente originario de las 5 especies domesticadas del género *Capsicum* sp.



La proximidad genética entre *C. chinense* y *C. annuum*, parece indicar que son dos formas distintas domesticadas a partir del mismo ancestro común en dos regiones geográficas: Mesoamérica y la Amazonia (Figura 5), por lo que habría sido domesticado de manera independiente en dos ocasiones (Moscone *et al.*, 2007, Votava *et al.*, 2004). Estas dos especies cultivadas, también poseen un estrecho vínculo filogenético con *C. frutescens*. Los estudios moleculares también indican que la especie más próxima a las del grupo *annuum* es *C. galapagoense*, hecho que refuerza la hipótesis de migración desde Bolivia hacia Centroamérica. La mayor conexión filogenética encontrada entre *C. annuum*, *C. chinense* y *C. frutescens*, se refleja también en la posibilidad de realizar cruces viables entre estas tres especies de flor blanca (Hill *et al.*, 2013). *C. annuum* var. *annuum* se habría originado mediante una transdomesticación en la zona de Méjico a partir de la forma silvestre *C. annuum* var. *gabriusculum*, tal y como parecen indicar las muestras arqueológicas (Perry *et al.*, 2007), genéticas (Carrizo García *et al.*, 2016), y lingüísticas (Kraft *et al.*, 2014).

El grupo *C. baccatum*, y sus integrantes: *C. baccatum* var. *baccatum*, *C. baccatum* var. *umbilicatum*, *C. baccatum* var. *pendulum* (forma domesticada), *C. praetermissum* y *C. chacoense*, pese a su proximidad genética con al clado Anuum, no parecen estar relacionados con la domesticación de éste. Su forma cultivada debió de generarse de manera independiente a través de la especie silvestre *C. baccatum* var. *baccatum*, en Bolivia y zonas adyacentes (Pickersgill, 1988). El ancestro común a *C. gr. baccatum* habría sido la que se encontraría relacionada con el ancestro del grupo *C. annuum*

La posterior expansión mundial post-colombina por parte de los Imperios Hispánico y Portugués resultaría en la dispersión de *C. annuum* por las distintas partes del planeta, generando diferentes centros secundarios de diversidad en las regiones donde mayor calado obtuvieron, como es el caso de India, España u otros países del continente Africano.

Figura 5. Distribución y relaciones de flujo genético de los distintos clados propuestos por Carrizo García *et al.*, 2016



1.4. Especies cultivadas y tipos varietales

Las distintas especies cultivadas del género *Capsicum sp.* reflejan la amplitud ecológica y geográfica que el género ha alcanzado en su continente originario. La clasificación de los tipos varietales intraespecíficos cultivados se ha realizado en base a las características morfológicas de planta y fruto: porte de las partes vegetativas, forma y color del fruto; así como por sus cualidades organolépticas: ausencia o presencia de pungencia, aroma y sabor. Siendo estos últimos, los factores determinantes para el uso al que van a ser sometidos, los cuales pueden ser para su consumo: en fresco, deshidratado -molido o no- y en conserva. La diversidad varietal se refleja también en las cualidades organolépticas y químico-sensoriales de los frutos, como indican los análisis de los perfiles aromáticos de distintas especies y variedades del género (Moreno *et al.*, 2012)

Las variedades se han ido mejorando agronómicamente en el pasado gracias a la mejora genética clásica, con el fin de obtener: cultivares más resistentes a estreses bióticos y abióticos, con mayor rendimiento agronómico y con mejores cualidades químico-sensoriales. Este proceso, es apreciable en la figura 6, en la cual se muestra un pimiento tipo 'Bell' variedad 'California' (*Capsicum annuum*) actual, en comparación a las primeras variedades comercializadas a principios del s. XX.

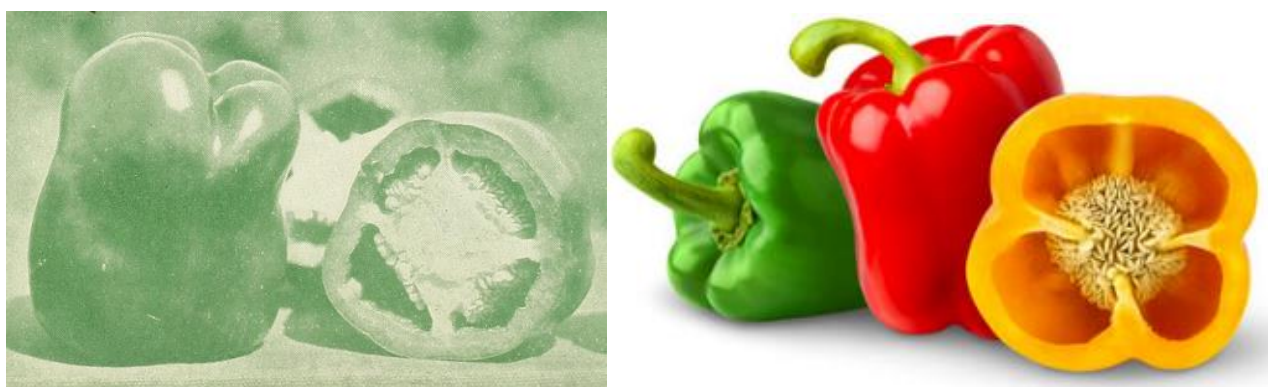


Figura 6. Frutos de *C. annuum* tipo 'Bell' variedad California. A: Frutos de la primera variedad comercializada en 1925 por la empresa Southern California (Extraído de Biodiversity Heritage Library). B: Variedades comerciales actuales (Extraído de supermercadoslatorre.com)

1.4.1. *Capsicum annuum*

Conocido vulgarmente como *pimiento* (*C. annuum* var. *annuum*), se trata de la forma domesticada con mayor número de tipos varietales (Figura 7), así como la más consumida en las zonas de América del Norte, Europa y Asia. Son comunes a esta especie los tipos de carne dulce -no pungente-, al contrario que en el resto de las especies cultivadas del género, en el que la mayoría de tipos son pungentes. Hecho producido por modificaciones a nivel de secuencia en el gen *Pun1* -entre otros- (Hill *et al.*, 2013). Con flores blancas no punteadas y únicas en cada nudo (Figura 7), posee un número cromosómico $2n=24$ ($x=2$). El proceso de diversificación varietal ha sido generado gracias a la gran expansión a la que se ha visto sometida esta especie, cultivada en la mayor parte de las regiones templadas de la tierra, al contrario que sus congéneres, los cuales no se han expandido significativamente más allá de la América meridional.

Entre los tipos varietales de *C. annuum* var. *annuum* podemos diferenciar una gran cantidad de formas cultivadas. Según Bosland y Votava (2000), podrían clasificarse en al menos 22 tipos a nivel mundial, entre ellos incluye la forma silvestre de *C. annuum*: *C. annuum* var. *gabriusculum*, que botánicamente es clasificada como otra variedad. El consumo de esta última variedad no se ha expandido más allá de Mesoamérica, debido a los cambios morfológicos sufridos en los frutos y en el porte vegetativo de la planta al ser cultivada fuera de su hábitat natural.

En cuanto a las variedades presentes en España, Nuez *et al.*, (1998) y Rodríguez-Burruezo *et al.*, (2016) realizan una caracterización de los tipos varietales más comunes, atendiendo a la clasificación más utilizada para esta especie (Pochard, 1966) y los descriptores establecidos por el IBPGR (1983), revisados posteriormente por el IPGRI (1995). De esta manera, se han definido 16 grupos utilizando criterios fenotípicos, los cuales estarían incluidos en 4 tipos en base a su uso. Una descripción más exhaustiva y extensa de los tipos varietales encontrados en esta especie podemos encontrarla en la bibliografía mencionada en el presente párrafo.



Figura 7. Diversidad de frutos y flor de *C. annuum* var. *annuum*. Extraído de Universidad de Wagenigen y jon.techno.cc, respectivamente

1.4.2. Capsicum baccatum

Conocido en castellano como *ají amarillo*, *ají cristal* o *ají escabeche*. Número cromosómico $n=12$ ($x=2$). Plantas con flores únicas en cada nudo. Sus pétalos blancos con punteaduras amarillas, verde oscuras o marrones son un carácter morfológico identificativo de la especie (Figura 8). Podemos diferenciar de manera concisa tres variedades botánicas: *C. baccatum* var. *baccatum*, que comprende las formas silvestres; *C. baccatum* var. *pendulum* y *C. baccatum* var. *umbilicatum*, que comprenden las formas domesticadas.



Figura 8. Frutos y flor representativas de *C. baccatum* var. *pendulum*.

Imágenes extraídas de Aguilar Medina, 2017

En Sudamérica es una de las especies más cultivadas, siendo el *Capsicum spp.* más común en Bolivia, Chile, Ecuador y Perú. Este mercado es muy distinto en

Europa, debido a los hábitos alimenticios europeos, donde esta especie es relegada a una posición meramente presencial.

Según Tong, (1998) dos especies silvestres poseen parentesco con *C. baccatum*: *C. praetermissum* y *C. tovarii*. En esta línea argumentativa, los resultados obtenidos mediante el análisis molecular realizado por Carrizo García *et al.*, (2016) respaldan esta hipótesis, aunque relaciona de una manera filogenéticamente más próxima a *C. chacoense* que a *C. tovarii*. Como sucede en la mayoría de los cultivos domesticados, la diversidad genética en las variedades silvestres es mayor; y a su vez, la diversidad es mayor en las variedades tradicionales que en las comerciales (Votava *et al.*, 2005). Los frutos de mayor tamaño son más comunes en las accesiones de germoplasma de *C. baccatum* var. *pendulum* del este de Sudamérica (Según Albrecht *et al.*, 2012), como han mostrado los estudios de caracterización fenotípica.

En cuanto a su cruzabilidad, los híbridos producidos entre ambas variedades de *C. baccatum* producen descendencia fértil, tanto en F1 como en F2. Aunque algunos cruces entre determinados genotipos ven reducida la fertilidad de la descendencia, prueba que parece indicar el aislamiento genético al que se han visto sometidas (Según Eshbaugh, 1963)

En sus formas domesticadas, encontramos una diversidad comparable a la encontrada en *C. annuum* para forma, color y tamaño del fruto. Sin embargo, no están extendidos los genotipos con fruto dulce, siendo su pungencia de suave a muy intensa.

1.4.3. *Capsicum chinense*

Esta especie se caracteriza por sus dos inflorescencias por nudo, aunque excepcionalmente pueden encontrarse flores solitarias. Sus frutos sufren de una constricción anular en la unión con el pedicelo, otro de sus rasgos diferenciadores. Entre sus tipos varietales encontramos formas de renombre como los *chiles habaneros* (Figura 9), famosos por su gran pungencia, que en algunas variedades puede superar las 500.000 unidades Scoville -escala cuantitativa por la que se mide la pungencia-. Con un número cromosómico

$2n=24$ ($x=2$) es común su cultivo en la zona del Caribe, aunque encontramos la mayor diversidad varietal cultivada en la zona amazónica



Figura 9. Frutos de *chile habanero* y flor representativas de *C. chinense*
Imágenes extraídas de Aguilar Medina, 2017.

Es reseñable su gran calado en la cultura gastronómica de Perú, donde tras *C. baccatum* var. *pendulum*, es la segunda especie más consumida. Otras formas varietales muy conocidas a las ya mencionadas en esta región son: el 'Ají Panca', el 'Ají Pucomucho' o el 'Ají Limo'.

Finalmente, hay que especificar que es en esta especie donde encontramos las formas varietales más picantes del mundo, como es el caso de la variedad 'Ghost', que ostentaba el récord Guinness llegando a alcanzar más de 1.000.000 unidades Scoville (Bosland y Baral, 2007).

1.4.4. *Capsicum frutescens*

Planta con flores únicas en cada nudo, sin constricción anular del pedicelo en los frutos, los cuales se encuentran erguidos debido al pedicelo erecto (Figura 10). Número cromosómico $2n=24$ ($x=2$). Esta especie sería la menos diversificada en tipos varietales si la comparamos con sus taxones más próximos. Si bien, su consumo está ampliamente extendido gracias a la gran aceptación de la que goza una salsa derivada de sus frutos, el Tabasco® producida por la compañía Mc Ilhenny®. Junto al tipo varietal 'Tabasco', encontramos otro en Brasil reseñable, como es el caso de 'Malagueta'. No es raro encontrar esta especie como ornamental en algunas casas. Algunos autores han considerado esta especie como una subespecie de *C. annum*, si bien, las características

morfológicas y moleculares indican que son especies diferentes (Carvalho *et al.*, 2013). Junto con *C. pubescens* son las especies con menor diversidad varietal



Figura 10. Frutos de la variedad *Tabasco* de *C. frutescens*. Imágen extraída de Onalee's Seeds ©

1.4.5. *Capsicum pubescens*

Especie con flores solitarias en cada nudo, pedicelos erectos en la antesis, corola púrpura, semillas oscuras (Figura 11) y número cromosómico $2n=24$ ($x=2$). Ampliamente extendido desde la zona de los Andes peruanos, hasta las tierras altas de Méjico. Posee gran diversidad de variedades tradicionales, entre las cuales encontramos los tipos 'Manzano', 'Peron', 'Caballo', 'Locoto'; y, el más conocido debido a su importancia gastronómica: 'Rocoto'



Figura 11. Flor y frutos de *C. pubescens* variedad *Rocoto*. Imagen extraída de Magic Garden Seeds ©

1.5. Manejo agrario del cultivo

El pimiento *sensu lato* -en todos sus formas cultivadas- requiere de suelos con conductividad eléctrica baja o moderada, siendo la EC_{max} tolerable de 1,5 mS/cm (Cadahía, 2005) y de altas temperaturas medias que oscilen entre 16°C y 30°C durante el día (siendo la óptima de 25°C a 30°C), y 13°C a 18° durante la noche; tanto para la germinación, como para un desarrollo vegetativo y producción óptima (Nonnecke, 1989 y Maroto, 2008). Además, es necesaria una exposición lumínica intensa, al tratarse de una planta heliófila. Edafológicamente se necesita un sustrato rico en nutrientes (Materia orgánica >3%) para un desarrollo radicular y vegetativo óptimo. En el cultivo intensivo se puede optar por el uso de sustratos artificiales si las condiciones edafológicas no son las apropiadas (Nuez *et al.*, 1998). Ha de realizarse un subsolado previo a la plantación y abonados para enriquecer la materia orgánica presente en el suelo, en caso de no alcanzar la concentración inicial. Los aportes de riego periódicos a lo largo del ciclo biológico de la planta van a ser indispensables en la mayoría de los genotipos utilizados. Aunque la cantidad necesaria a aportar es variable dependiendo del sistema de cultivo utilizado, el tipo de suelo, su localización (debido a las características bioclimáticas, que van a determinar la evapotranspiración) y el uso eficiente del agua (WUE) que posea la variedad que estamos utilizando (Penella, 2014). Actualmente encontramos cultivos de

secano con variedades adaptadas, caracteres que podrían ser de gran interés para el desarrollo de variedades más tolerantes al estrés hídrico.

Podemos encontrar dos tipos bien diferenciados de sistemas de cultivo para hortalizas: Intensivo y extensivo. Asociados al cultivo en intensivo encontramos: los sistemas de semiforzado, los cuales protegen a la planta temporalmente; y los sistemas de forzado, que constituyen su cultivo en invernadero (Nuez *et al.*, 1996), el de mayor extensión en España (MAPAMA, 2017). Una de las grandes diferencias entre estos sistemas de cultivo es la cantidad de insumos aplicados durante todo el ciclo biológico de la planta.

1.5.1. Sistemas de altos y bajos insumos

Los sistemas de altos y bajos insumos se encuentran caracterizados por la cantidad de aportes nutricionales, en forma de abonados, aplicados durante el ciclo de cultivo o etapas previas. Mientras que en los de altos insumos los aportes son en gran cantidad y regulares, en los de bajos insumos se mantiene una cantidad de materia orgánica mínima en el sustrato.

En España, los sistemas de altos insumos han permitido aumentar la producción de manera significativa. Sin embargo, esto se ha hecho a costa de esquilmar grandes superficies de terreno para la creación de invernaderos, con el grave perjuicio -o eliminación- que conlleva para con los ecosistemas de esas zonas. En el caso de algunas regiones con ombrotipo semi-árido o árido (Rivas-Martínez. S., 1983), se han sobreexplotado cuencas hidrológicas deficitarias con el fin de abastecer una superficie de regadío que se ha visto aumentada de manera exacerbada e insostenible en las últimas décadas. Promoviendo con ello el desarrollo de extracciones ilegales de agua *in situ* (Agencia WWF, 2018) y, perpetuando una política de trasvases con graves perjuicios socioeconómicos y ecológicos en la cabecera de la cuenca afectada. A esto ha de sumarse la salinización de los suelos expuestos al riego tras varias campañas si las técnicas de riego no son las adecuadas, y la ausencia de necesidad de realizar una evaluación del impacto ambiental si la superficie afectada, en relación con el tipo de suelo, es menor a la establecida por la ley de evaluación ambiental. En práctica, y como hecho agravante de esta situación, esta evaluación parece tener una aplicación marginal actualmente (MAPAMA, 2017b).

Como han demostrado ensayos en este género (Gil-Villar, 2015 y Penella, 2015) bajo diferentes regímenes de aporte nutricional, se han hallado genotipos con mayor eficiencia de uso de fósforo y agua (PUE y WUE, respectivamente). El uso y desarrollo de variedades altamente eficaces, adaptadas a la zona y condiciones donde se va a realizar el cultivo, es un hecho indispensable si queremos alcanzar una agricultura sostenible con bajo impacto ambiental y huella ecológica.

1.5.1.1. Características del cultivo convencional

El cultivo convencional que se ha realizado en las últimas décadas ha sido de tipo intensivo, con una tendencia general al aumento de la superficie de invernadero y regadío a nivel nacional. Algunas características comunes a éste manejo agronómico son el abonado -complementado usualmente con fertirrigación-, manejo de suelos y uso de biocidas (herbicidas, fungicidas e insecticidas).

El abonado químico suele constar de una aplicación previa de compuestos nitrogenados, fosforados o ricos en potasio y magnesio en cantidades bastante altas. Es el caso de las propuestas por Rincón (1985), las cuales constan de: 600 kg/ha de sulfato amónico, 1400 kg/ha de superfosfato de cal, 250 kg/ha de potasa y 600 kg/ha de sulfato de magnesio. Estos manejos además pueden verse compaginados con procesos de desinfección del suelo, como es el de la solarización. Algunos de los biocidas más utilizados, y sus dosis, son: Bromuro de metilo (98%) y cloropicrina (2%), entre 500 y 700 kg/ha; Dicloropropeno (107% p/v o 112% p/v), entre 100 l/ha y 200 l/ha; Tetratiocarbonato de sodio (40% p/v), entre 600 y 1200 l/ha; N-metilditiocarbamato de sodio (50% p/v), entre 800 y 1200 l/ha; y el N-metilditiocarbamato de potasio (50% p/v), entre 800 y 1200 l/ha.

Como un ejemplo en cuanto a la fertirrigación de estos cultivos, las sustancias (y cantidades) aplicadas en el agua de riego serían: Ácido fosfórico (140,74 kg/ha), Nitrato potásico (1045,45 kg/ha), Nitrato cálcico (605 kg/ha), Sulfato de magnesio (669,37 kg/ha) y Nitrato amónico (179,70 kg/ha)

1.5.1.2. Características del cultivo ecológico

Las tendencias de mercado actuales se están inclinando a una producción ecológica, de bajos insumos. Los consumidores, cada vez más concienciados, exigen una agricultura con mayor trazabilidad y menor impacto ambiental.

La producción y etiquetado de estos productos, se encuentra regulada por el reglamento de la comisión europea EU 2018/848. Si bien, éste reglamento permite el uso de productos fitosanitarios, aunque el abanico de sustancias aceptadas es mucho menor y se encuentra estrictamente regulada. Éste reglamento obliga realizar buenas prácticas de labranza con el fin de evitar la compactación y erosión del suelo, aunque en algunas producciones se recurre al uso de coberturas vegetales con especies pratenses para reducir la necesidad de subsolado en cada ciclo de cultivo. El abonado se utilizará con el fin de mantener la biodiversidad y estabilidad edáfica, siempre y cuando el origen de este provenga de origen animal o materia orgánica compostada de origen también ecológico.

La superficie de cultivo bajo este sistema sigue en aumento en España y en Europa (MAPAMA, 2016 y Eurostat, 2017), al igual que su importancia económica, lo que refleja la necesidad de investigar las variedades más óptimas que consigan maximizar el rendimiento bajo este tipo técnicas agronómicas, ya que según algunos estudios el rendimiento tiende a ser menor en estos sistemas de cultivo (Gabriel *et al.*, 2013 y Birkhofer *et al.* 2016).

Hay que destacar que España es el mayor productor de productos ecológicos en Europa a nivel de superficie, superando los dos millones de hectáreas (Eurostat, 2017). En el año 2015 la superficie destinada en España para el cultivo del pimiento bajo régimen ecológico -sin contar las zonas en conversión- alcanzó las 422,8 hectáreas, con una producción estimada de 18.778 toneladas métricas, siendo 180 las hectáreas cultivadas en invernadero, lo que supone 42,5% de la producción de pimiento 'ecológico'.

Finalmente reseñar la dicotomía que encontramos sobre la implantación de estos cultivos en invernadero, los cuales pueden cumplir la normativa y reglamentos reguladores, pero no respetan los ecosistemas de vida silvestre donde se

implantan, por lo que en esencia tampoco podrían definirse como cultivos ecológicos (aunque reglamentariamente sí lo son). Lo mismo sucede con algunos productos fitosanitarios permitidos por el anexo II del reglamento de la comisión europea 889/2008 que también son nocivos para el medio ambiente, como es el caso de los derivados de cobre. Paradójicamente, algunas revisiones indican que este tipo de cultivo 'ecológico' produce mayor cantidad de gases de efecto invernadero y posee una menor sostenibilidad al tener un menor rendimiento por unidad de superficie (Birkhofer *et al.* 2016, Clark y Tilman 2017)

1.6 Importancia del sistema radicular

El sistema radicular va a ser una parte fundamental de la anatomía vegetal, al ser el principal órgano fuente de recursos hídricos, minerales y nutricionales que la planta va a captar del sustrato (Fita *et al.*, 2011); formando un *continuum* suelo-planta-atmósfera (Taiz y Zeiger, 2006) y funcionando de manera análoga al tracto digestivo de los eumetazoos (Barbero y Geldner 2014). El desarrollo de estas estructuras fue un hecho vital para la colonización y desarrollo de los *traqueófitos* en la superficie terrestre durante el periodo Silúrico-Devónico (Kenrick y Strullu-Derrien, 2014).

Las formas del género *Capsicum sp.* poseen un sistema radicular del tipo axonomórfico. En concreto, sobre el sistema radicular de sus formas cultivadas se han realizado pocos trabajos, poseyendo actualmente pocas referencias bibliográficas si hablamos de: su caracterización estructural, la diversidad existente y su interacción con los sistemas de cultivo predominantes actualmente. Por lo que la investigación de la arquitectura del sistema radicular (RSA), su diversidad intra e interespecífica, su adaptación a diferentes ambientes y, su relevancia para la mejora vegetal y agronómica de este, y otros cultivos no han sido explotadas todavía totalmente (Peláez-Anderica *et al.*, 2011). La mayoría de las investigaciones del sistema radicular se han centrado en otros cultivos, principalmente en cereales extensivos (Bucksch *et al.*, 2014). La metodología más común se ha centrado en el análisis radicular de plántulas en cultivo *in vitro*, con el fin de dilucidar los genes o QTLs involucrados en la formación, desarrollo, su respuesta ante la deficiencia en determinados nutrientes (Fita *et al.*, 2012), o la captación de los mismos, pero no en ensayos de campo (Atkinson *et al.*, 2014, Steffens y Rasmusen, 2016).

Por ello, es necesario el desarrollo de trabajos que ahonden en la importancia e interacciones de esta parte de la anatomía vegetal con el resto de las características fenotípicas de los cultivos. Ya que, de un correcto desarrollo radicular, van a depender un mayor vigor y producción por parte de la planta ante estreses bióticos y abióticos -edáficos y ambientales- o en condiciones normales (Nuez *et al.*, 1996, Bui *et al.*, 2015 y Julkowska *et al.*, 2017). Si a esto le sumamos la posibilidad de utilizar portainjertos con una mayor eficiencia en la captación de nutrientes, resistencia y tolerancia a estreses (Penella *et al.*, 2013, Penella *et al.*, 2014, Penella *et al.*, 2015b y Penella *et al.*, 2016) las posibilidades de mejora real aumentan de una manera cuantiosa (Bletsos y Olympios, 2014). Éste hecho no ha pasado desapercibido por las distintas empresas de mejora vegetal, las cuales ya cuentan entre sus productos con portainjertos de alto vigor y resistencia -o tolerancia- a estreses para el cultivo de hortalizas -como el pimiento- y leñosas. El fenotipado de los genotipos más cultivados y, sus sistemas radiculares, permitirá escoger las variedades idóneas para cada tipo de suelo y condiciones agronómicas de cultivo; en las especies domesticadas del género *Capsicum sp.*, o en cualquier otro, dado que actualmente el interés por la caracterización fenotípica o '*fenómica*' de los cultivos esta al auge (Tardieu *et al.*, 2017).

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

Los objetivos de la presente tesis de maestría consisten en:

El estudio de la diversidad morfológica radicular en diferentes genotipos y especies del cultivadas género *Capsicum sp.*

La evaluación de la plasticidad radicular en estos genotipos ante condiciones de cultivo y manejo agrario diferenciales, a fin de evaluar la existencia de interacción genotipo-sistema de cultivo. Esta información permitiría un mejor asesoramiento de las variedades a seleccionar para el cultivo por parte de los agricultores, ya sea por su interés productivo o para su uso como portainjertos.

Y finalmente, la validación de un método rápido de fenotipado del sistema radicular comparando dos plataformas disponibles: Una de ellas muy prolija en datos recabados, pero lenta y limitante a la hora de procesar grandes cantidades de plantas; y otra sencilla y utilizable a pie de campo. El establecimiento de una correlación entre ambas sería también de gran ayuda para su utilización en programas de mejora de una manera rápida, eficaz y económica.

3. MATERIAL Y **MÉTODOS**

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Material vegetal

Para el desarrollo del presente estudio se han utilizado 19 genotipos de distintas regiones mundiales (Mesoamérica, Suramérica y Europa), pertenecientes a 3 de las 5 especies cultivadas del género *Capsicum sp.*: *Capsicum annuum*, *C. chinense* y *C. baccatum*. Algunos de los genotipos utilizados, ostentan figuras reguladoras europeas sobre su producción, como son las denominaciones de interés geográfico protegido (I.G.P) o las denominaciones de origen protegido (D.O.P), lo que revaloriza su valor comercial, debido a su exclusividad y coevolución con sus regiones productoras. Este es el caso de los genotipos: Di Senise, Gernika, Najerano, Pimiento de Bola y Pimiento del Piquillo. En la tabla 6, podemos observar el nombre, especie y origen geográfico de los genotipos utilizados. La mayoría de han sido los pertenecientes a la especie de mayor importancia económica a nivel mundial, *C. annuum*.

3.2. Condiciones de cultivo y diseño experimental

3.2.1 Condiciones de cultivo

La germinación de las semillas se realizó en alveolos de 2x2 con un sustrato compuesto por tierra enriquecida y perlita en una proporción 4:1 bajo una temperatura constante de 24°C en invernadero. El trasplante se llevó a cabo con la plántula en un estado vegetativo con 5-6 hojas verdaderas a finales de abril del año 2016. El cultivo se realizó al aire libre, con un marco de plantación utilizado fue de 1x5 metros, entre plantas y surcos respectivamente. Se utilizaron dos parcelas próximas que se han visto sometidas a dos diferentes sistemas de cultivo en los últimos ciclos: de altos insumos -convencional- y bajos insumos -ecológico-. Ambos, debido a su proximidad, poseen las mismas condiciones climáticas (Clima mediterráneo, piso termomediterráneo). Las parcelas también poseían la misma composición y estructura edáfica, lo cual nos permite eliminar el efecto parcela sobre los diversos parámetros recabados. En sendas parcelas se realizaron aportes de riego por inundación, dos riegos previos al trasplante y posteriormente cada 8-10 días, dependiendo de las condiciones meteorológicas.

Tabla 6. Genotipo, especie y zona de origen de los genotipos evaluados

| Genotipo | Especie | Zona de origen |
|------------------------------|--------------------|---|
| Ají dulce | <i>C. chinense</i> | Venezuela |
| ECU-994 | <i>C. chinense</i> | Ecuador |
| BOL-37R | <i>C. baccatum</i> | Chuquisaca (Bolivia) |
| BOL-58 | <i>C. baccatum</i> | Cochabamba (Bolivia) |
| Arnoia | <i>C. annuum</i> | Misión biológica, Magebondo, Galicia (España) |
| Bierzo | <i>C. annuum</i> | León (España) Cons. Reg. I.G.P Pimiento asado del Bierzo |
| Di senise | <i>C. annuum</i> | Senise (Italia) Cons. Reg. I.G.P. Peperoni Di Senise |
| Doux Long des Landes | <i>C. annuum</i> | Francia |
| Espelette | <i>C. annuum</i> | País Vasco Francés (Francia) |
| Gernika | <i>C. annuum</i> | País Vasco (España) Cons. Reg. I.G.P. Pimiento de Gernika |
| Guindilla Ibarra | <i>C. annuum</i> | País Vasco (España) |
| Najerano | <i>C. annuum</i> | La Rioja (España) Cons. Reg. I.G.P. Pimiento Riojano |
| Numex 6-4 | <i>C. annuum</i> | Nuevo México (EE. UU) |
| Numex Conquistador | <i>C. annuum</i> | Nuevo México (EE. UU) |
| Pasilla | <i>C. annuum</i> | México |
| Pimiento de Bola | <i>C. annuum</i> | Murcia (España) Cons. Reg. I.G.P. Pimentón de Murcia |
| Pimiento de Padrón | <i>C. annuum</i> | Padrón, Galicia (España) |
| Pimiento del Piquillo | <i>C. annuum</i> | Navarra (España) Cons. Reg. D.O.P. Piquillo de Lodosa |
| Mojo palmero | <i>C. annuum</i> | La Palma, Islas Canarias (España) |

3. MATERIAL Y MÉTODOS

En el cultivo de bajos insumos se realizó un abonado de fondo, a base de estiércol de ganado ovino y equino, en una dosis de 4kg/m², de manera previa a la plantación. No fue necesario realizar ningún tipo de manejo fitosanitario en el cultivo de bajos insumos a lo largo del ciclo.

En el cultivo de altos insumos se realizó un subsolado mediante un rotovator previo a la plantación. Posteriormente se aplicaron dos manejos de abonado químico en los meses de Junio y Julio, los cuales consistían en: Quelato de hierro disuelto en el agua de riego (Dosis 500g/L) y la aplicación de abono mineral de la marca Triple 15®, un producto para aportar nitrógeno, fósforo y potasio (Dosis 25 kg/ha). Para evitar la presencia de caracoles y babosas se aplicó metaldehído (Dosis 1kg/ha) a principios del mes de Mayo. Asimismo, se realizaron cuatro tratamientos fitosanitarios más mediante pulverización a lo largo del ciclo de cultivo: dos por mes en los meses de Junio y Julio -a comienzos y a finales-, con el fin de evitar la presencia de hongos e insectos nocivos para el cultivo. Estos manejos consistieron en la aplicación de Clorpirifos ® al 48% (Dosis de 2ml/L), junto con Mancozeb al 17% de concentración (Dosis de 4ml/L) y oxiclóruo de cobre al 22 % (Dosis de 2ml/L).

3.2.2 Diseño experimental

El diseño experimental consistió en un diseño en bloques con una distribución de plantas al azar de los genotipos (N:19) en ambas parcelas. Procedimos a utilizar este diseño para minimizar el efecto posición dentro de parcela, lo cual produciría sesgos en nuestros resultados. Cada genotipo en cada manejo - Ecológico y convencional-, se encuentra representado por ocho plantas -en un inicio-, distribuidas a su vez en dos subparcelas con cuatro plantas en cada una de ellas.

3.3. Extracción de muestras y fenotipado

Las muestras fueron extraídas manualmente mediante el socavamiento de un cuadrado aproximado de 0,5 m². La parte aérea fue cortada a nivel del suelo de manera previa a la extracción, a fin de obtener su peso en fresco. Tras haberlas extraído, se procedió a su lavado mediante su inmersión en agua. Una vez limpias, se fenotiparon con la plataforma de fenotipado de pimiento, de la cual se obtuvieron los caracteres reflejados en la tabla 7. Los caracteres obtenidos

3. MATERIAL Y MÉTODOS

mediante esta plataforma consistieron en el análisis de diversas partes como: la distancia radicular internodal, medida como la distancia entre las ramificaciones radiculares terciarias de las raíces secundarias mejor conservadas y más representativas de cada genotipo; o la longitud radicular evaluada, que consistiría en la suma de las longitudes de las 3 raíces secundarias más largas. Lo mismo sucede con el grosor radicular promedio, estimado mediante el diámetro de las tres raíces más gruesas de cada planta.

Tras el transcurso de tiempo que duró el procesado de muestras, las raíces se almacenaron en cámara frigorífica a 4°C para evitar así su degradación. Después de haber sido fenotipadas en la primera plataforma, se procedió a la separación del tocón y las raíces de cada planta para su pesado por separado. Las raíces por separado fueron posteriormente analizadas con un escáner de gran tamaño, utilizando el programa informático WinRHIZO©. *Regent Instruments Inc* para la obtención de los diversos parámetros fenotípicos de interés (Tabla 7). Es necesaria la separación parcial de las raíces para poder obtener unos datos más fidedignos con poco error de medida. En la figura 12 se muestra un ejemplo de cómo eran distribuidas las raíces separadas para su escaneo y análisis posterior, evitando solapamientos entre las distintas partes obtenidas. Tras haber procedido a su escaneo, tanto el tocón como las raíces fueron deshidratadas en una estufa a 60°C durante cinco días para su pesado posterior.

Otros parámetros fenotípicos evaluados como el peso de la parte vegetativa aérea (sin frutos), u otros derivados de los datos obtenidos, comunes en la bibliografía, se muestran en la tabla 8. Algunos de estos parámetros derivados como: Longitud radicular específica (m/g), densidad radicular (g/cm³) y ratio raíz:parte aérea (g raíz/g parte aérea), sirven para caracterizar el sistema radicular de las plantas, tanto en cultivos, como en especies silvestres (Ostonen *et al.*, 2007, Kramer-Walter *et al.*, 2016 y Agren y Ingestad 1987). La longitud radicular específica es resultado de la división entre la masa longitud radicular -en metros- y la masa radicular -en gramos-; la densidad radicular, es producto de la división del peso radicular -en gramos- y el volumen radicular -en centímetros cúbicos-;

3. MATERIAL Y MÉTODOS

y finalmente, el ratio raíz: parte aérea, el cual se obtiene de la división del peso de las raíces -en gramos- entre el peso de la parte aérea -en gramos-.

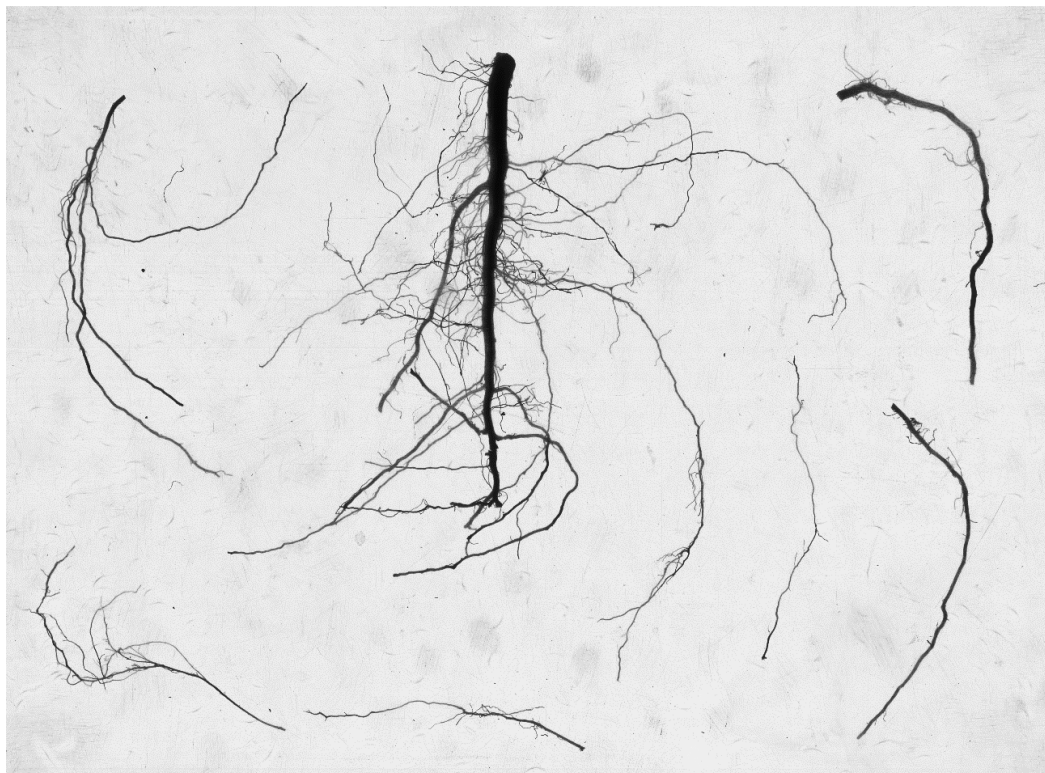


Figura 12. Lamina escaneada en WinRHIZO con parte del sistema radicular de una planta, genotipo Ají dulce

Tabla 7. Caracteres fenotípicos evaluados con la Plataforma de fenotipado de pimiento y con *WinRhizo*

| Caracteres fenotípicos evaluados WinRhizo | Caracteres fenotípicos evaluados Plataforma de fenotipado de pimiento |
|---|---|
| Longitud total (cm) | Angulo radicular (Grados, °) |
| Superficie radicular (cm ²) | Distancia radicular internodal (cm) |
| Volumen radicular (cm ³) | Longitud radicular evaluada (cm) |
| Diámetro medio (mm) | Grosor radicular promedio (cm) |
| Área proyectada (cm ²) | Diámetro del tocón (cm) |
| | Nº raíces de grosor > 0,2 cm (%) |

Tabla 8. Otros caracteres fenotípicos evaluados o derivados de los datos obtenidos

| |
|--|
| Caracteres fenotípicos evaluados |
| Peso radicular seco (g) |
| Peso tocón seco (g) |
| Peso parte aérea (kg) |
| Longitud radicular específica (m/g) |
| Densidad radicular (g/cm³) |
| Ratio raiz:parte aérea (g_{raiz}/g_{parte aérea}) |

3.4. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se procedió a realizar un análisis de la varianza (ANOVA), junto con un examen de correlaciones de Pearson entre los parámetros radiculares fenotipados en ambas plataformas, así como con sus pesos y el resto de los parámetros evaluados. La diferencia entre las medias dentro de cada genotipo fue analizada mediante el test LSD de Fisher. Todo ello realizado mediante el programa informático de análisis estadístico *Statgraphics XVII*©. de *Statgraphics Technologies Inc.*

4. RESULTADOS Y **DISCUSIÓN**

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Parámetros fenotípicos evaluados con WinRhizo

Los datos obtenidos por la plataforma de fenotipado WinRhizo reflejan el dispar comportamiento de los genotipos utilizados en el ensayo. En la tabla 9, podemos observar que existen efecto de genotipo ($p < 0.001$), de condición de cultivo ($p < 0.001$) y su interacción para los parámetros de longitud, superficie, volumen y área proyectada de la raíz. Los cuadrados medios mostraron que en todos estos parámetros el efecto condición de cultivo fue el más importante. En el caso del diámetro de la raíz por el contrario el efecto de genotipo fue el más importante no existiendo interacción.

Tabla 9. Tabla de cuadrados medios resultantes del análisis de la varianza (ANOVA) para los parámetros analizados con WinRhizo. *: significativo para $p < 0,05$, **: significativo para $p < 0,01$ y ***: significativo para $p < 0,001$. ns: no significativo

Tabla de cuadrados medios (ANOVA)

| Efectos principales | g.l. | Longitud total (cm) | Superficie radicular (cm ²) | Volumen radicular (cm ³) | Diámetro medio (mm) | Área proyectada (cm ²) |
|---------------------|------|--------------------------|---|--------------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| Genotipo | 18 | 9,31 x10 ^{6***} | 0,64 x10 ^{6***} | 371*** | 0,24*** | 65 x10 ^{3***} |
| Manejo | 1 | 39,9 x10 ^{6***} | 2,48 x10 ^{6***} | 890*** | 0,07* | 251 x10 ^{3***} |
| Genotipo x manejo | 18 | 1,8 x10 ^{6***} | 0,12 x10 ^{6***} | 84* | 0,02 ^{ns} | 12 x10 ³ |
| Error | 124 | 0,6 x10 ⁶ | 0,04 x10 ^{6***} | 50 | 0,02 | 4 x10 ³ |

En la figura 13, correspondiente a la longitud total del sistema radicular, encontramos como la media en el cultivo ecológico es sustancialmente superior del orden de 2200 cm en ecológico y 1100 cm en convencional. El efecto de interacción se debe a que algunos genotipos mantienen su longitud en ambos sistemas y otros aumentan claramente (Figura 14). De los 19 genotipos estudiados 11 mostraron raíces más largas en ecológico destacando el caso de Najerano, Mojo Palmero, Doux long des landes, Padrón, Pasilla y Piquillo. Los genotipos con sistemas radiculares más largos en ambos manejos fueron Ají dulce, BOL37-R y ECU-994.

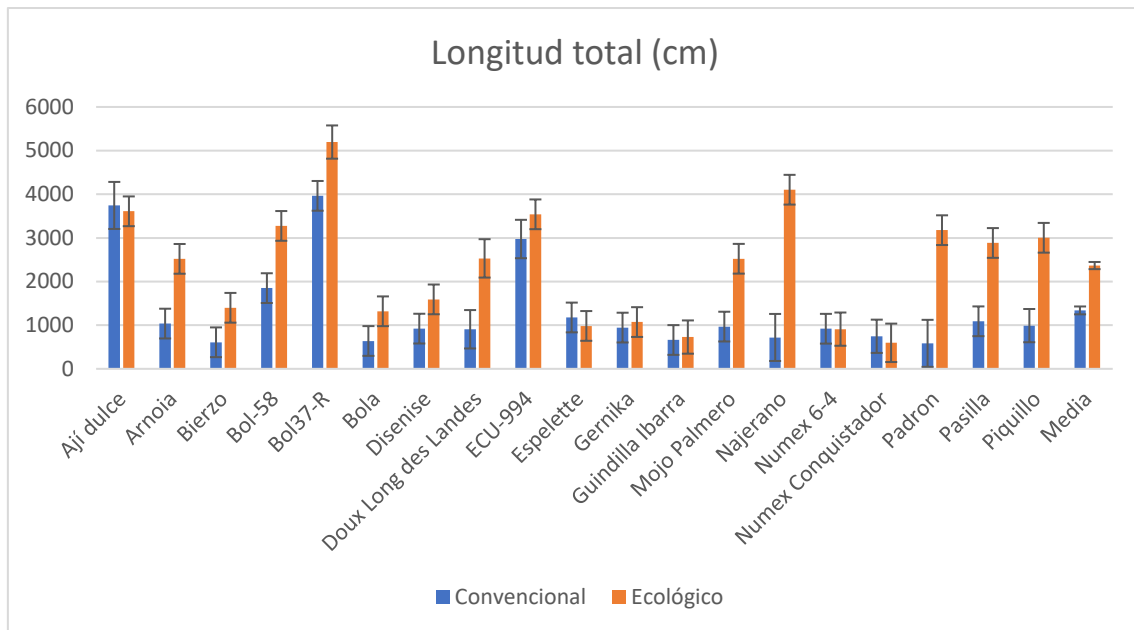


Figura 13. Gráfico de medias y barras de error de la longitud radicular total (cm) para cada uno de los genotipos analizados.

El volumen radicular siguió una tendencia similar siendo en promedio mayor en el campo ecológico. Sin embargo, en este caso los dos genotipos de tipo Numex mostraron mayor volumen radicular en el cultivo convencional (Figura 14). El área proyectada (Figura 15) y el área superficial (Figura 16) presentaron la misma tendencia que la longitud total.

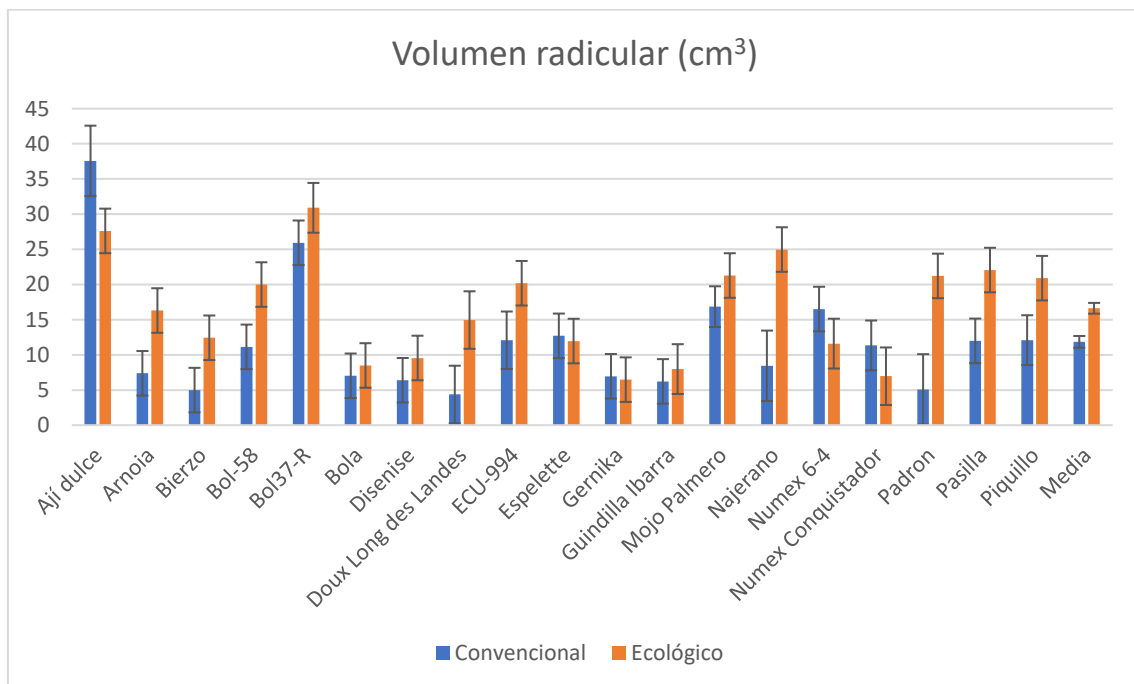


Figura 14. Gráfico de medias y barras de error del volumen radicular (cm³) para cada uno de los genotipos analizados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

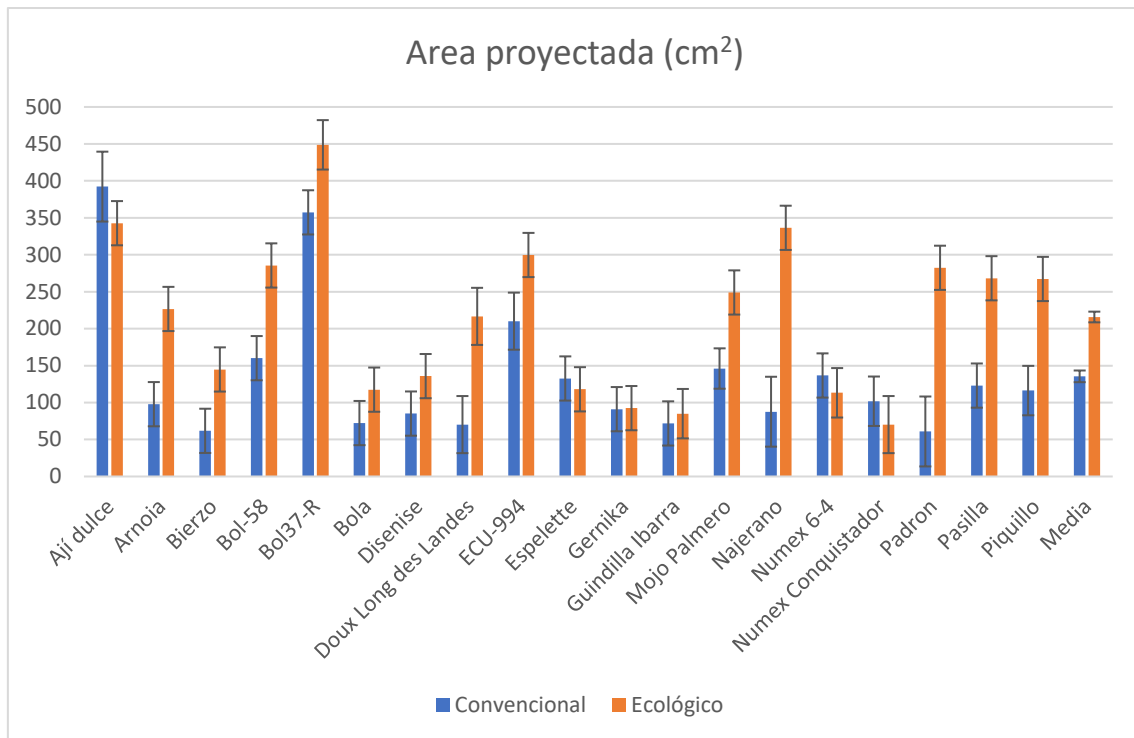


Figura 15. Gráfico de medias y barras de error del área proyectada (cm²) para cada uno de los genotipos analizados.

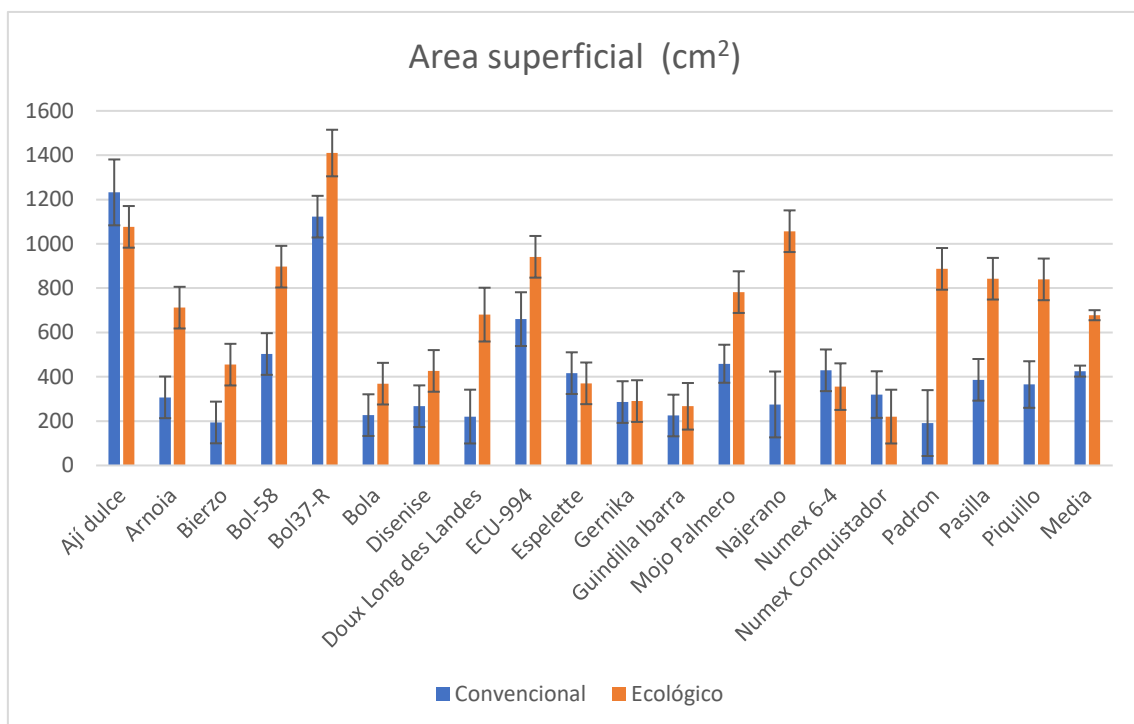


Figura 16. Gráfico de medias y barras de error del área proyectada (cm²) para cada uno de los genotipos analizados.

Las diferencias encontradas en el diámetro medio (Figura 17) fueron más importantes entre genotipos que entre los dos manejos testados, donde las plantas cultivadas en convencional presentaron un diámetro medio de 1,2 mm y las cultivadas en el campo de manejo ecológico de 1,15 mm. Esta diferencia en promedio de todos los genotipos fue fundamentalmente provocada por las grandes diferencias en diámetro en genotipos como Najerano, Padrón y Pasilla, con un aumento del 27,2%, 19,1% y 13,3% -respectivamente- en diámetro en convencional frente a ecológico. Los genotipos de mayor diámetro en general fueron Espellete, Guindilla Ibarra, Numex 6-4 y Numex Conquistador, mientras que los de menor diámetro fueron Doux long des landes y ECU-994

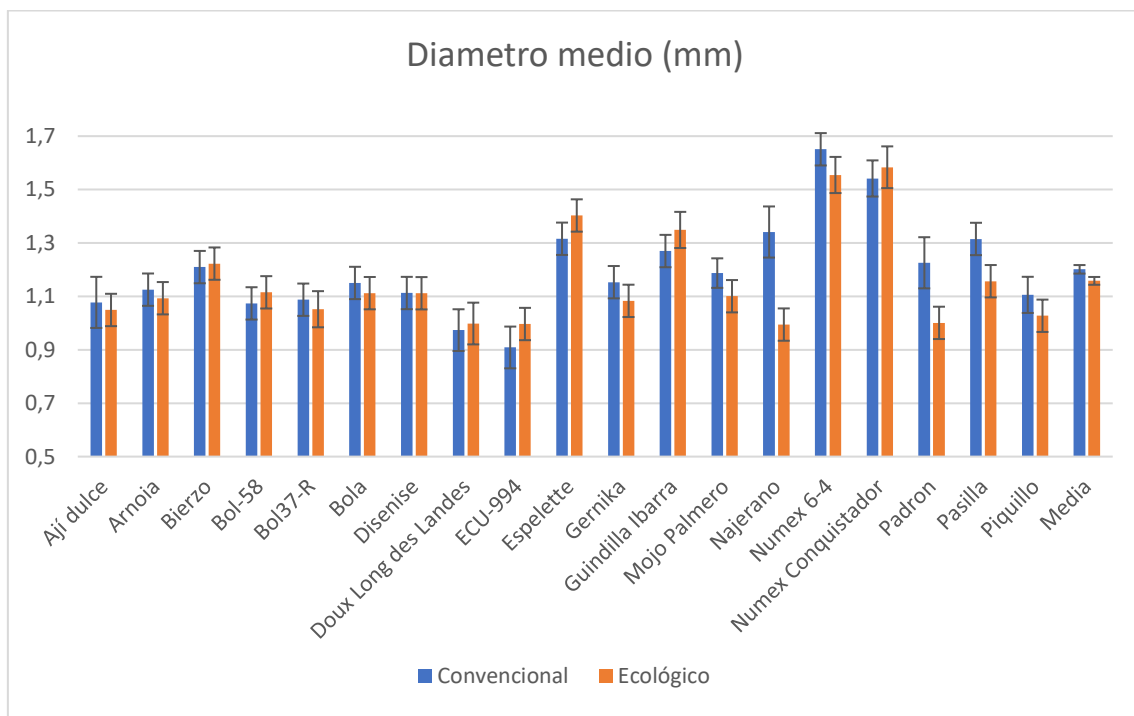


Figura 17. Gráfico de medias y barras de error del diámetro medio (mm) para cada uno de los genotipos analizados.

4.1.2 Parámetros fenotípicos evaluados con Plataforma de fenotipado de pimiento

En cuanto a las características analizadas mediante la plataforma de fenotipado de pimiento, encontramos diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) a nivel de genotipo en todos los parámetros analizados, siendo la distancia radicular internodal la de menor grado de significación ($p < 0,05$). No sucede lo mismo con el manejo, ni con su interacción con el genotipo (Tabla 10). En el caso del efecto

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

del manejo agrario, solo el ángulo radicular y la longitud radicular evaluada poseen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,001$). Por otro lado, la interacción entre genotipo y manejo resulta significativa para la longitud radicular evaluada, el grosor radicular promedio y el diámetro del tocón (para $p < 0,01$, $p < 0,01$ y $p < 0,001$, respectivamente). La distancia radicular internodal no mostró diferencias significativas, ni para el manejo, ni para su interacción.

Tabla 10. Tabla de cuadrados medios resultantes del análisis de la varianza (ANOVA) para los parámetros analizados con Plataforma de fenotipado de pimiento. *: significativo para $p < 0,05$, **: significativo para $p < 0,01$ y ***: significativo para $p < 0,001$. ns: no significativo

Tabla de cuadrados medios (ANOVA)

| Efectos principales | g.l. | Angulo radicular (Grados °) | Longitud radicular evaluada (cm) | Grosor radicular promedio (cm) | Diámetro tocón (cm) | Distancia radicular internodal (cm) |
|---------------------|------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| Genotipo | 18 | $2,44 \times 10^4$ *** | $4,94 \times 10^4$ *** | 0,88*** | 29,5*** | 1,11* |
| Manejo | 1 | $1,07 \times 10^4$ *** | $1,58 \times 10^4$ *** | 0,00 ^{ns} | 0,05 ^{ns} | 0,01 ^{ns} |
| Genotipo x manejo | 18 | $1,16 \times 10^4$ ^{ns} | $3,70 \times 10^4$ ** | 0,20** | 7,98*** | 0,77 ^{ns} |
| Error | | $5,26 \times 10^4$ | $10,9 \times 10^4$ | 0,59 | 18,3 | 3,87 |
| g. l. totales | | 161 | 167 | 151 | 167 | 159 |

Respecto al ángulo radicular, como se muestra en la figura 18, el ángulo varió entre 80° para Najerano en convencional y 160° para Bierzo en ecológico. La media del cultivo ecológico fue mayor, es decir, sus raíces fueron más superficiales. Los genotipos que generaron esta diferencia fueron 9: Bierzo, Bol-37R, Bola, Di Senise, Guindilla Ibarra, Mojo Palmero, Najerano, Padrón y Piquillo.

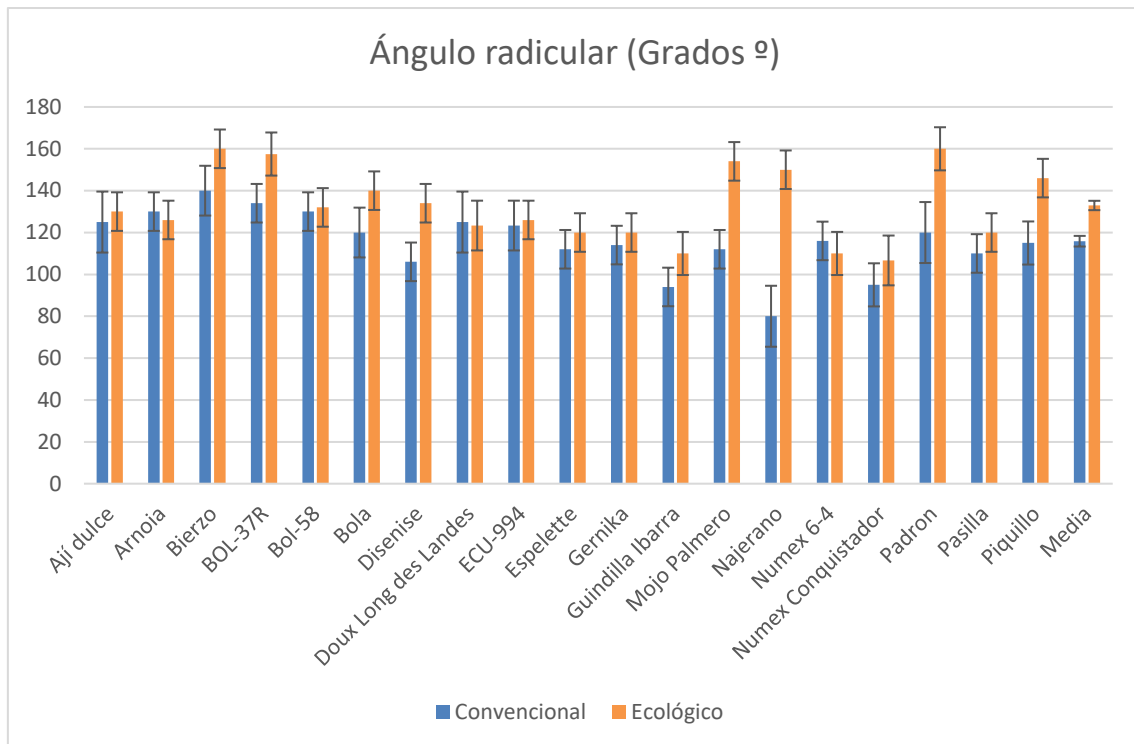


Figura 18. Gráfico de medias y barras de error del ángulo radicular (°) para cada uno de los genotipos analizados.

En la longitud radicular evaluada, las diferencias entre manejos agrarios siguen las mismas tendencias que en el resto de los parámetros hasta ahora expuestos, la media del cultivo de bajos insumos es superior. Sin embargo, en este caso, además de la variación genotípica hubo una gran interacción genotipo/manejo. Así 10 genotipos: Ají Dulce, Bierzo, Bol-57, Bol-37R, Bola, Doux Long des Landes, ECU994, Mojo palmero, Najerano y Piquillo presentaron mayores valores en cultivo ecológico, frente a tres genotipos: Espelette, y los dos Numex, que presentaron mayor longitud radicular evaluada en convencional. Estas diferencias intragenotípicas fueron estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en los casos de: Bierzo, Doux Long des Landes Bola, ECU-994, Mojo Palmero, Numex Conquistador y Piquillo.

Al igual que sucedía con el diámetro medido con Winrhizo, en el grosor radicular promedio las mayores diferencias se debieron al efecto del genotipo, variando entre un grosor medio de 0,2 cm en Bola y 0,6 cm en Ají dulce. No hubo una respuesta común de los genotipos en los distintos manejos, sino más bien indistinta; por ejemplo: Ají dulce, Najerano y Numex aumentaron en convencional

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

y Bola y ECU-994 aumentaron en el manejo ecológico. Estas diferencias en los genotipos fueron significativas ($p < 0,05$) para todos estos genotipos mencionados, exceptuando Numex 6-4, con un valor superior, pero sin significación

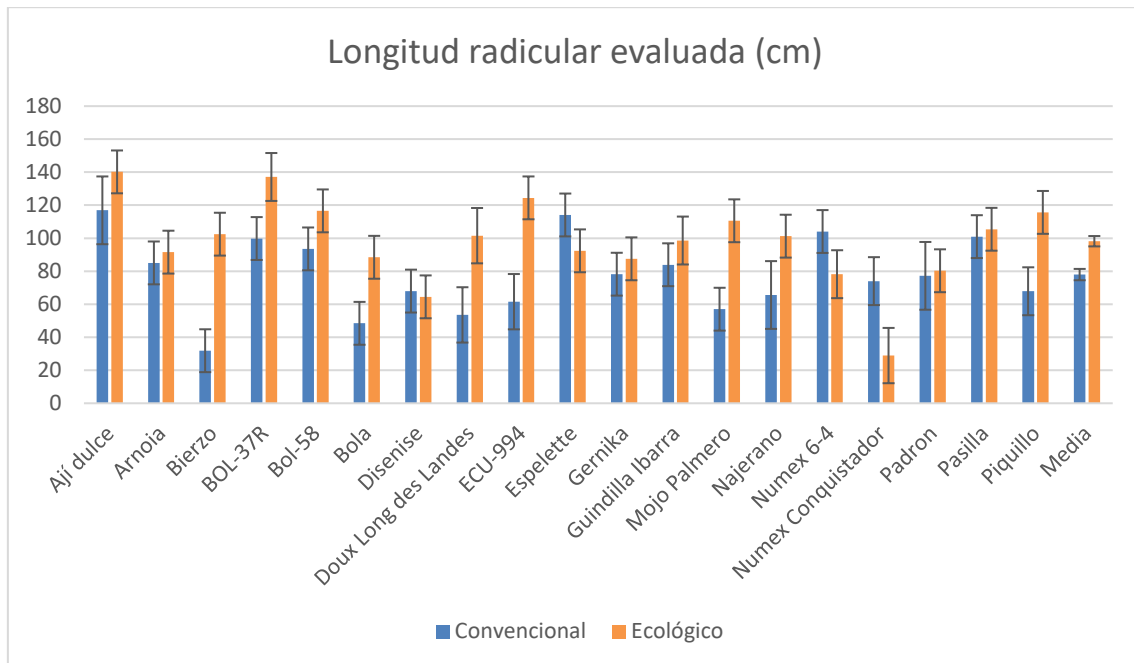


Figura 19. Gráfico de medias y barras de error de la longitud radicular evaluada (cm) para cada uno de los genotipos analizados.

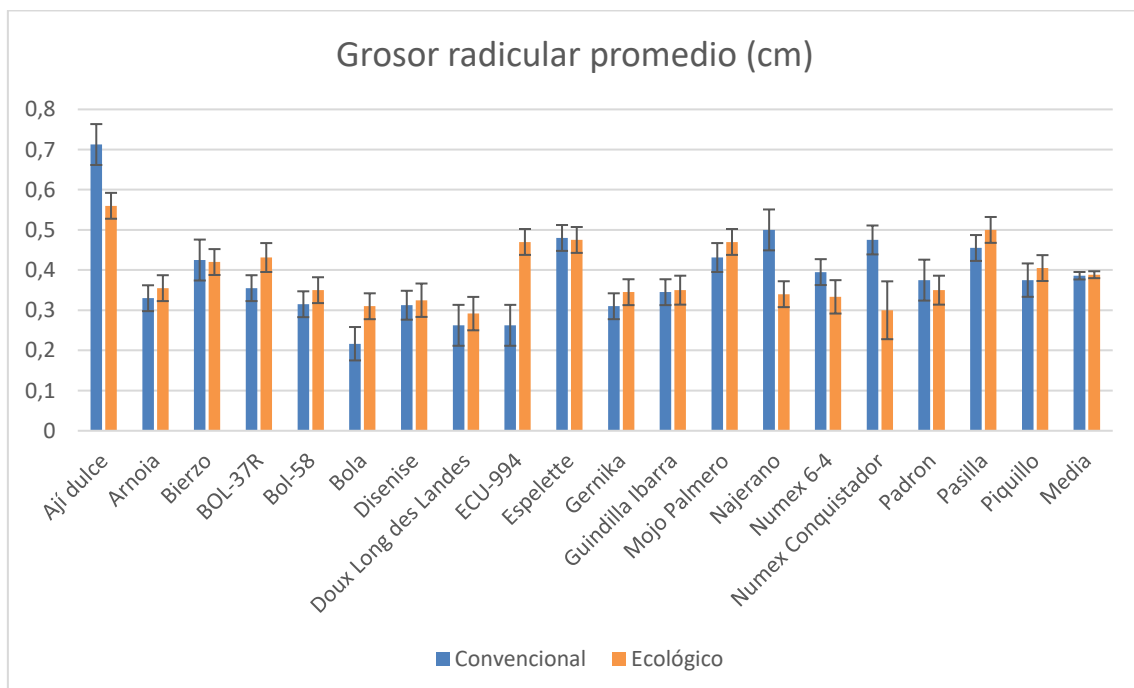


Figura 20. Gráfico de medias y barras de error del grosor radicular promedio (cm) para cada uno de los genotipos analizados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diámetro del tocón resultó ser similar en ambos manejos si observamos la media total. Aunque en este caso, se hallaron diferencias significativas a nivel genotípico y en cuanto a su interacción con el modo de cultivo. En este parámetro, junto con los genotipos que exhibían mejor comportamiento en el cultivo convencional para parte de los expuestos hasta el momento: Ají Dulce, Numex-6-4 y Numex Conquistador; encontramos, para este carácter, los genotipos Gernika, Guindilla Ibarra y Mojo Palmero con un mejor comportamiento en el cultivo de altos insumos (Figura 21).

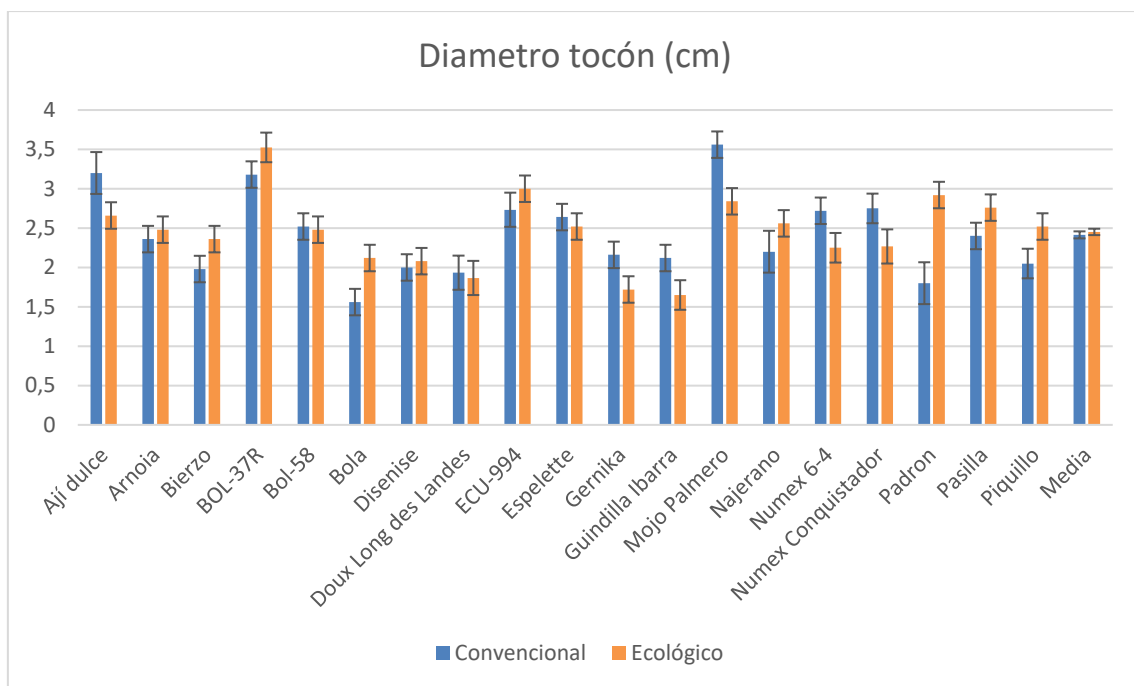


Figura 21. Gráfico de medias y barras de error del diámetro del tocón (cm) para cada uno de los genotipos analizados.

La distancia internodal radicular resultó ser muy similar en la mayoría de los genotipos y media total (Figura 22). No obstante, algunos de ellos mostraron unas diferencias altamente significativas respecto al genotipo. En los casos de Mojo Palmero, ambos Numex y Pasilla, se exhibieron las mayores distancias internodales aunque en distintos sistemas de cultivo. Siendo las mayores diferencias entre ambos manejos las encontradas en los casos de Numex Conquistador para el cultivo convencional -60% superior- y Mojo Palmero para el cultivo ecológico -62% superior-

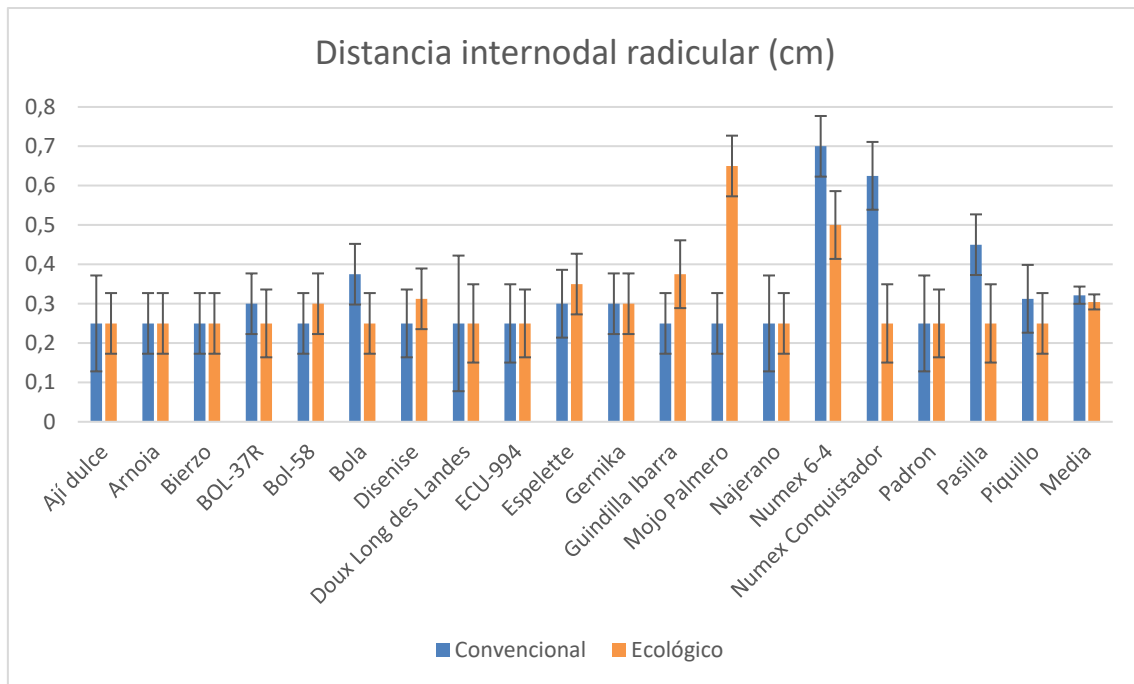


Figura 22. Gráfico de medias y barras de error de la distancia internodal radicular (cm) para cada uno de los genotipos analizados.

Se procedió también al análisis del número de raíces laterales con un grosor superior a 0,2 cm para cada genotipo en cada manejo. Se definieron cuatro clases: Clase A nº de raíces <10, Clase B [10-20), Clase C [20-30) y Clase D >30. Como observamos en la figura 23, correspondiente al cultivo convencional, ninguna planta estaba incluida en la clase D, perteneciendo la mayoría a la clase A o B. En el cultivo ecológico si que observamos la presencia de todas las clases expuestas (Figura 24), lo cual denota la mayor diversidad radicular intragenotípica generada por este tipo de cultivo. Comparando ambas (Figura 23 y figura 24), encontramos también como algunos genotipos no varían para el nº de clases en los manejos, como son Espelette, Gernika y Guindilla Ibarra.

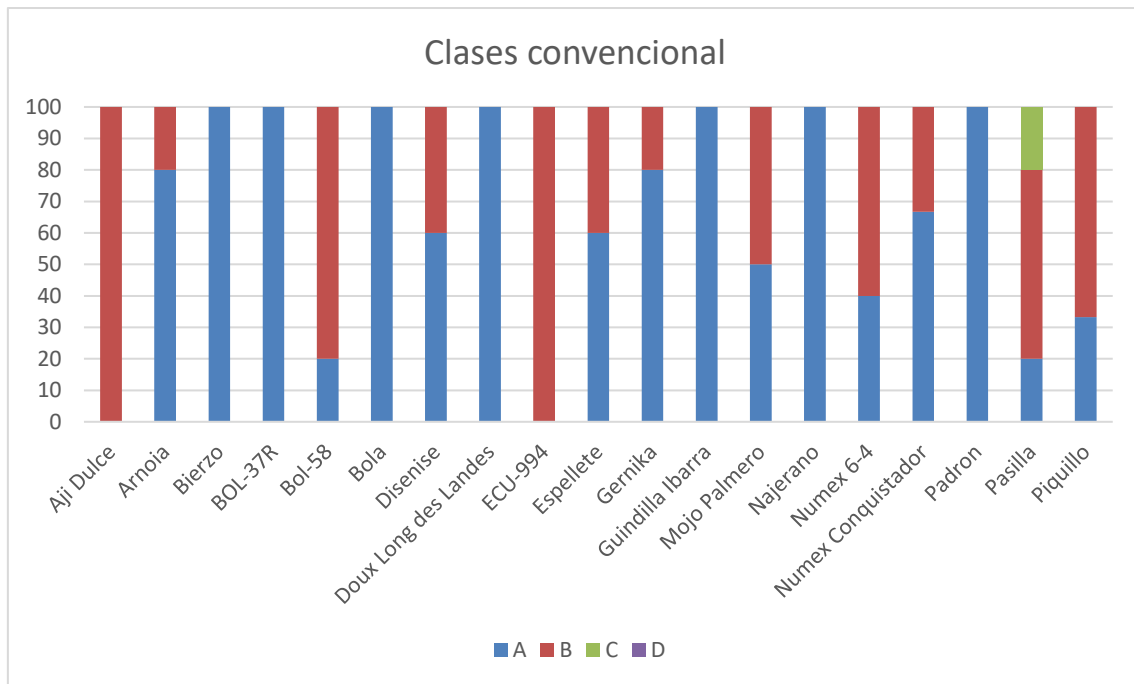


Figura 23. Gráfico de las diferentes clases observadas para cada genotipo en el manejo convencional. Clase A nº de raíces de grosor superior a 0.2 cm <10, Clase B [10-20), Clase C [20-30) y Clase D >30

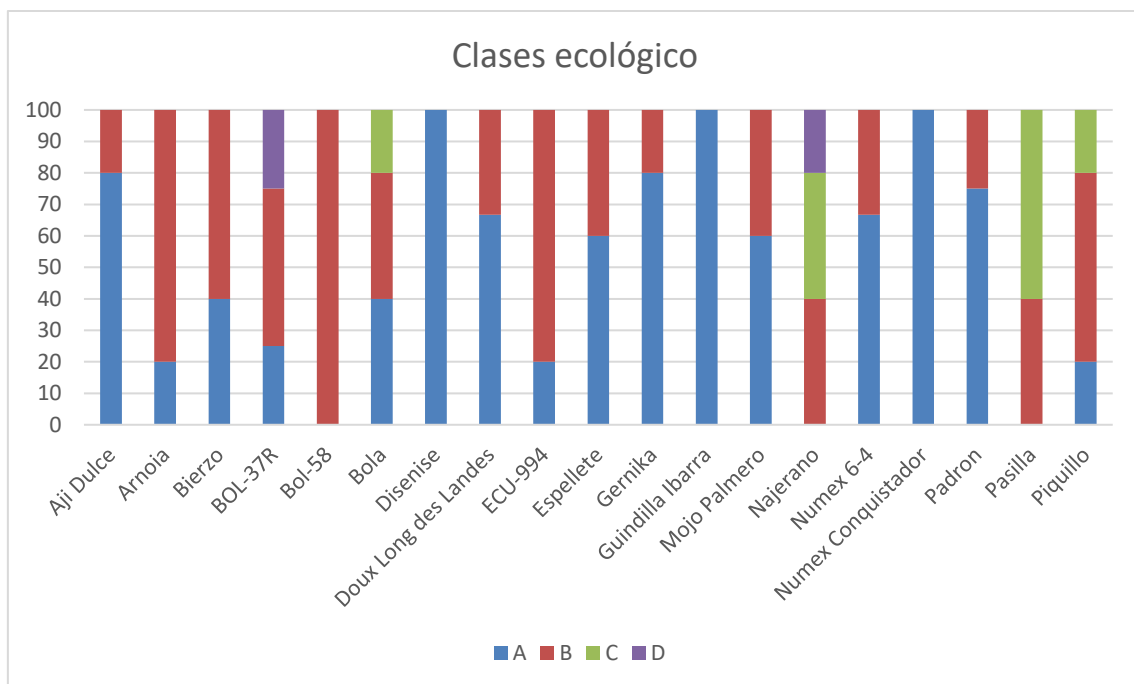


Figura 24. Gráfico de las diferentes clases observadas para cada genotipo en el manejo ecológico. Clase A nº de raíces de grosor superior a 0.2 cm <10, Clase B [10-20), Clase C [20-30) y Clase D >30

4.1.3 Otros parámetros fenotípicos evaluados

Junto con los parámetros analizados por ambas plataformas de fenotipado, se realizó el análisis de otras características ya mencionadas, como son: los pesos en seco, de tocón y raíces; el peso en fresco de la parte aérea; la longitud radicular específica (m/g), la densidad del tejido radicular (g/cm^3), y el ratio raíz: parte aérea (g/g), el cual abreviaremos a R/P.

En la tabla 11, correspondiente al análisis de la varianza de los pesos, observamos como el factor genotipo posee una alta significatividad ($p > 0.001$) para cada uno de los parámetros evaluados. El efecto manejo mostró diferencias significativas únicamente para el peso radicular seco ($p < 0,001$). La interacción entre el genotipo y el manejo resultó significativa para estos tres parámetros. Si bien, las mayores diferencias producidas por el efecto de la interacción se dieron en la parte aérea y el peso radicular en seco ($p < 0,001$), seguidas del peso del tocón seco ($p < 0,01$).

Tabla 11. Tabla de cuadrados medios resultantes del análisis de la varianza (ANOVA) para los parámetros relativos al peso de las distintas partes analizadas. *: significativo para $p < 0,05$, **: significativo para $p < 0,01$ y ***: significativo para $p < 0,001$

Tabla de cuadrados medios (ANOVA)

| Efectos principales | g.l. | Peso tocón seco (g) | Peso radicular seco (g) | Peso parte aérea (kg) |
|---------------------|------|---------------------|-------------------------|-----------------------|
| Genotipo | 18 | 458*** | 79*** | 0,32*** |
| Manejo | 1 | 0,99 ^{ns} | 187*** | 0,04 ^{ns} |
| Genotipo x manejo | 18 | 147** | 12,2*** | 0,09*** |
| Error | 130 | 70,7 | 3,56 | 0,02 |
| g. l. totales | 167 | | | |

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El peso del tocón seco no mostró diferencias significativas entre ambos manejos agrarios (Figura 25). De nuevo, encontramos genotipos con un comportamiento favorable al cultivo convencional para al peso del tocón, como es el caso Mojo Palmero, el de mayor valor. Otros de los genotipos exhiben un peso significativamente mayor ($p < 0,05$) para el sistema de bajos insumos, es el caso de: Bol-37R, ECU-994 y Piquillo.

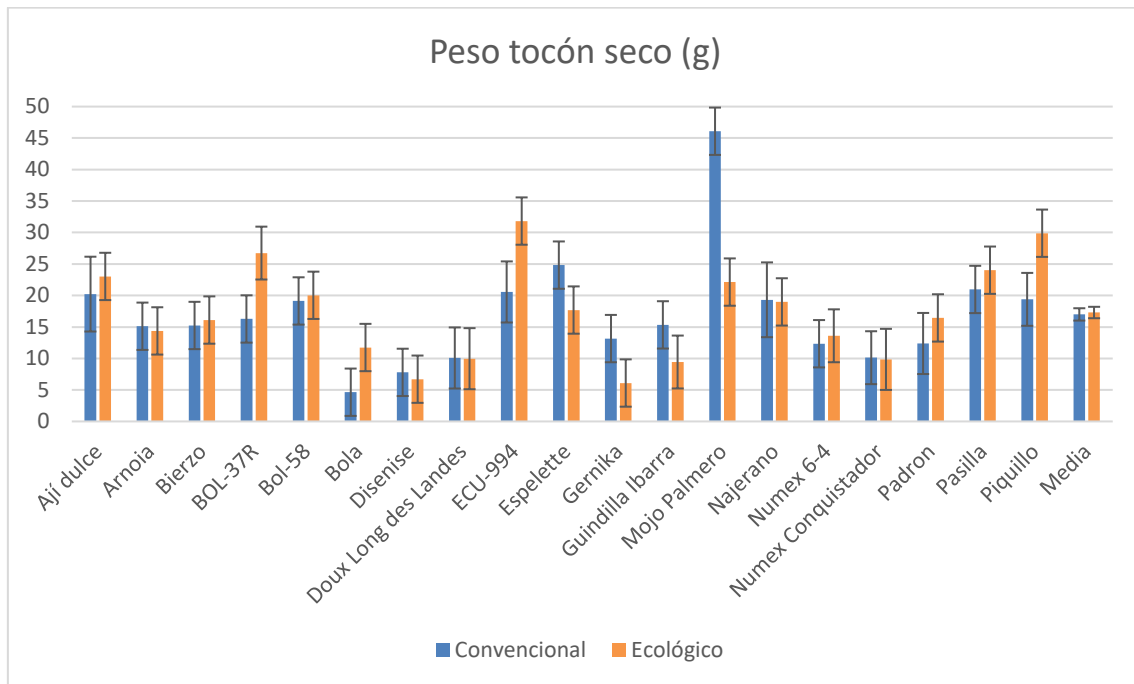


Figura 25. Gráfico de medias y barras de error del peso del tocón seco (g) para cada uno de los genotipos analizados.

En lo que al peso radicular respecta, la media total resultó significativamente mayor en el cultivo ecológico (Figura 26). Se encontraron grandes diferencias entre genotipos, siendo Ají dulce el de mayor valor medio (con 15,6 g) y Doux Long des Landes el de menor valor (con 1,9 g). Las diferencias intragenotípicas debidas al manejo agrario fueron significativas ($p < 0,001$) para las variedades Bol-37R, Bol-58, ECU-994, Mojo Palmero, Pasilla y Piquillo, siendo superiores todas ellas en el cultivo de bajos insumos.

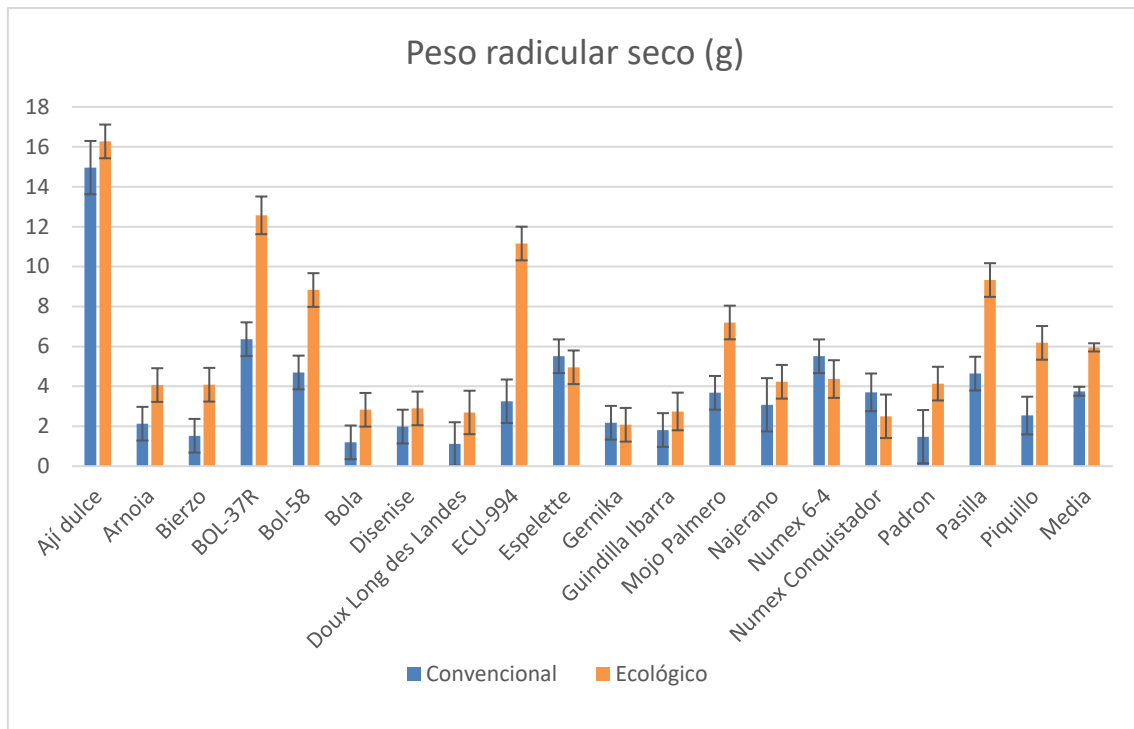


Figura 26. Gráfico de medias y barras de error del peso radicular en seco (g) para cada uno de los genotipos analizados.

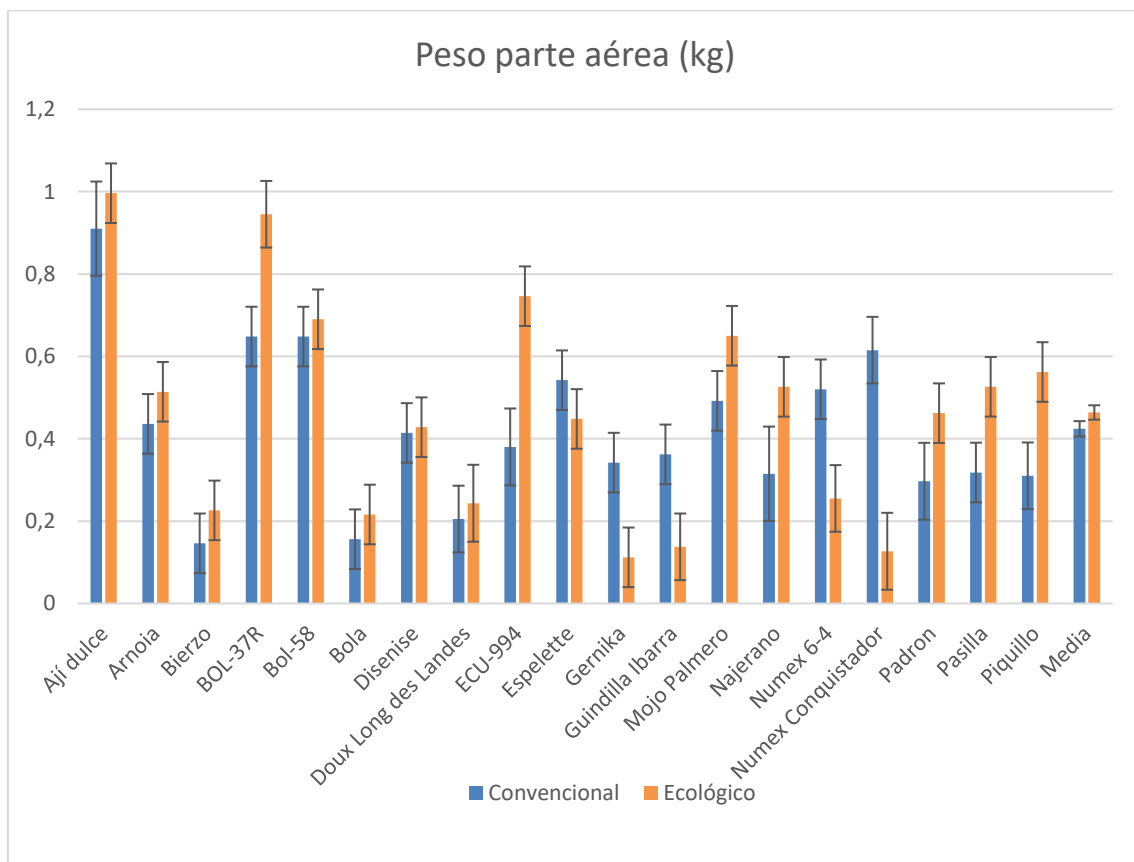


Figura 27. Gráfico de medias y barras de error del peso de la parte aérea (kg) para cada uno de los genotipos analizados.

El peso de la parte aérea no mostró diferencias estadísticamente significativas para el efecto del sistema de cultivo utilizado, aunque sí lo hizo para el genotipo ($p < 0,001$) y su interacción con el sistema de cultivo ($p < 0,001$). Las diferencias entre las medias para cada manejo fueron muy altas en algunas variedades, es el caso de 'ECU-994', 'Bol- 37R', 'Pasilla' y 'Piquillo', los cuales mostraron mayor peso en el cultivo ecológico ($p < 0,05$). Mientras que 'Gernika', 'Guindilla Ibarra', 'Numex 6-4' y 'Numex Conquistador' poseyeron un mejor comportamiento en el cultivo convencional ($p < 0,05$). Siendo también en este caso las diferencias entre manejos de gran medida (Figura 27).

Los caracteres obtenidos de los datos a través de los datos fenotípicos: longitud radicular específica (m/g), la densidad del tejido radicular (g/cm^3), y el ratio R/P (g/g), mostraron también diferencias estadísticas en las variedades estudiadas. El efecto producido por el genotipo, mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,001$), exceptuando su influencia sobre la densidad del tejido radicular, la cual no fue significativa. El tipo de sistema de cultivo sólo resultó ser altamente significativo para estos tres parámetros ($p < 0,001$. Tabla 12), mientras que la interacción entre ambos sólo fue estadísticamente diferencial en los casos de la longitud radicular específica y el ratio R/P ($p < 0,05$ y $p < 0,01$ respectivamente)

Tabla 12. Tabla de cuadrados medios resultantes del análisis de la varianza (ANOVA) de los caracteres calculados con varios parámetros fenotípicos. *: significativo para $p < 0,05$, **: significativo para $p < 0,01$ y ***: significativo para $p < 0,001$

Tabla de cuadrados medios (ANOVA)

| Efectos principales | g.l. | Longitud radicular específica (m/g) | Densidad tejido radicular (g/cm^3) | Ratio Raíz: Parte aérea (g/g) |
|---------------------|------|-------------------------------------|--|-------------------------------|
| Genotipo | 18 | 1,57*** | 0,23 ^{ns} | $1,1 \times 10^{-3***}$ |
| Manejo | 1 | 5,10*** | 1,90*** | $5,5 \times 10^{-3***}$ |
| Genotipo x manejo | 18 | 0,68* | 0,18 ^{ns} | $0,6 \times 10^{-3**}$ |
| Error | 130 | 0,34 | 0,14 | $0,2 \times 10^{-3}$ |
| g. l. totales | 167 | | | |

La longitud radicular específica fue superior en el manejo ecológico, siendo 'ECU-994' el único genotipo significativamente superior ($p < 0,05$) para este carácter en el cultivo convencional (Figura 28). 'Najerano' y 'Padrón' mostraron una media estadísticamente superior en el cultivo ecológico respecto al convencional ($p < 0,001$). A nivel de genotipo, encontramos Doux Long des Landes con el mayor valor medio (2,2 m/g), mientras que Numex 6-4 y Espelette exhibieron los valores mas bajos (0,5 m/g y 0,6 m/g respectivamente)

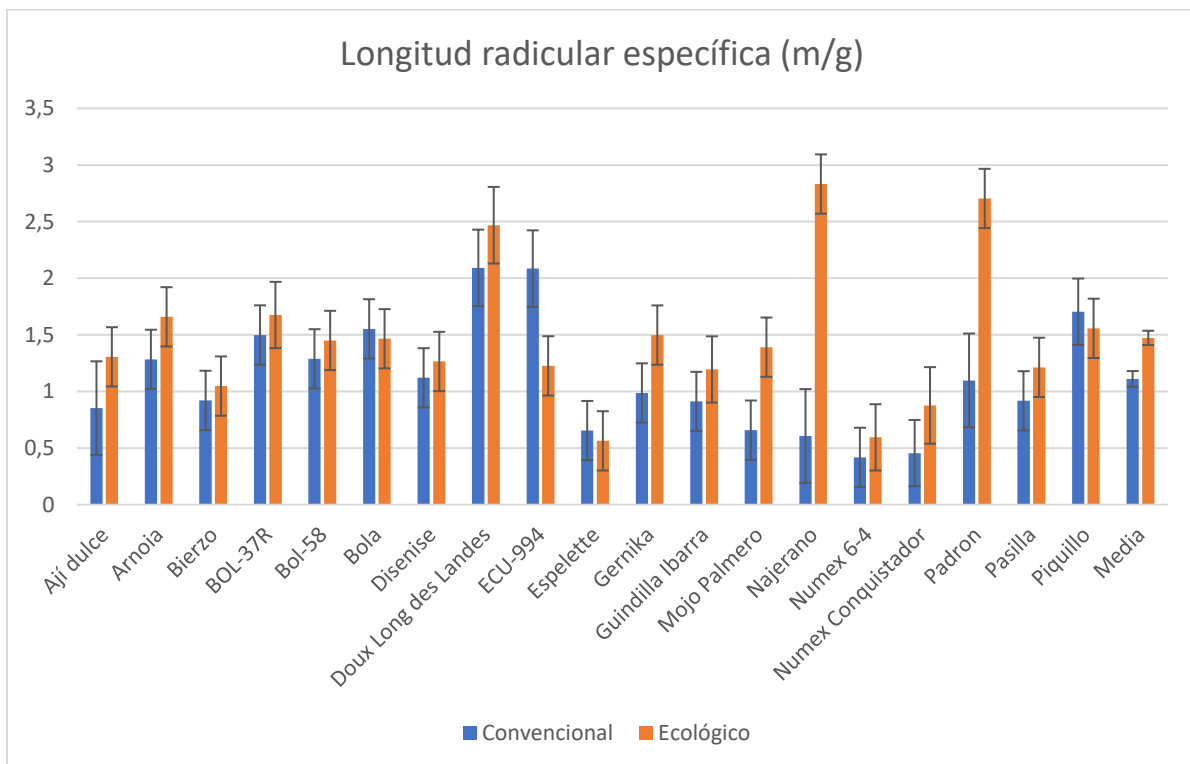


Figura 28. Gráfico de medias y barras de error la longitud radicular específica (m/g) para cada uno de los genotipos analizados.

El ratio R/P resultó ser significativamente superior en el cultivo ecológico ($p < 0,001$). Mostrando, como ya se ha mencionado, un fuerte efecto marcado por el genotipo y su interacción con el sistema de cultivo. Los bajos valores obtenidos reflejan que el peso de la parte aérea fue más de diez veces mayor que el de la parte radicular. En ninguno de los genotipos el valor obtenido fue significativamente superior (para $p < 0,05$) para el cultivo convencional, siendo estadísticamente mayor para el cultivo ecológico ($p < 0,05$) en los genotipos Doux Long des Landes, Gernika, Guindilla Ibarra y Numex Conquistador (Figura 29).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la densidad del tejido radicular el menor valor medio fue el encontrado en el genotipo Doux Long des Landes ($0,9 \text{ g/cm}^3$), mientras que el mayor valor medio corresponde a Mojo Palmero ($1,5 \text{ g/cm}^3$). Los genotipos Numex Conquistador, Najerano y Mojo Palmero exhibieron una media claramente superior ($p < 0,05$) a sus respectivos en el cultivo ecológico (Figura 30). En ninguno de los genotipos la densidad fue significativamente superior (para $p < 0,05$) en el cultivo de bajos insumos

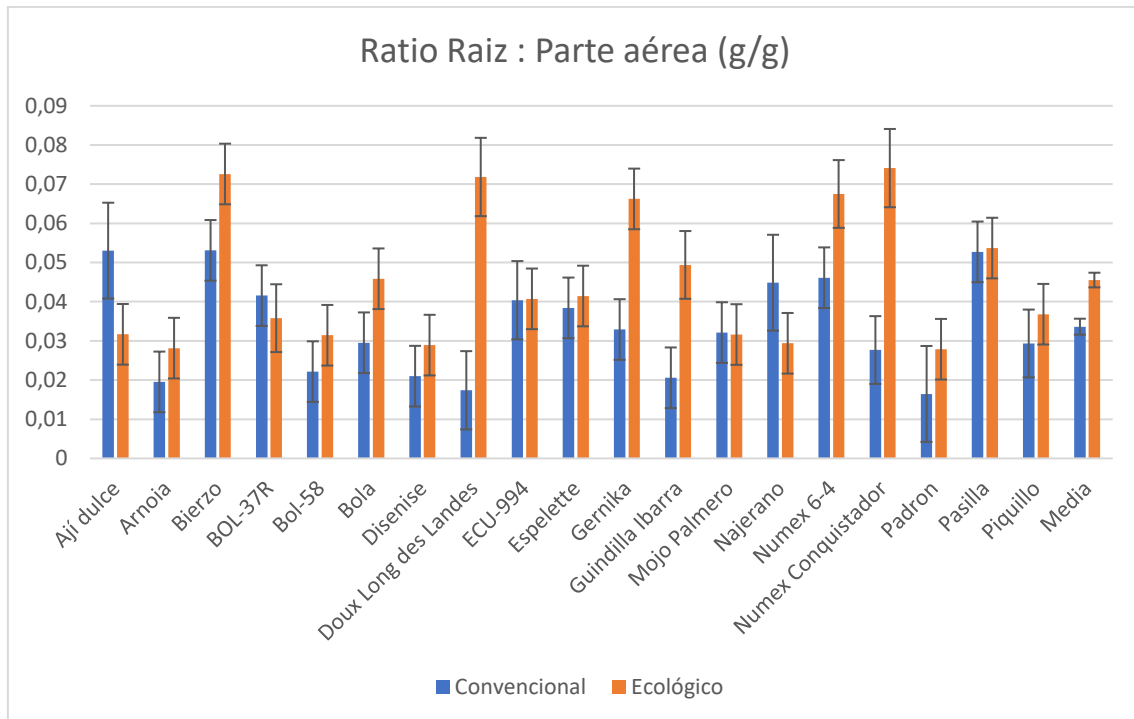


Figura 29. Gráfico de medias y barras de error del ratio R/P (g/g) para cada uno de los genotipos analizados.

Los diferentes parámetros expuestos en los resultados y sus diferencias por los efectos del manejo agrario, el genotipo, o la interacción de ambos son apreciables en la figura 31, en la cual se muestra el sistema radicular de algunos de las variedades analizadas en el presente estudio. Estas diferencias fenotípicas son destacables a simple vista en algunos individuos, como se puede ver en las diferencias de tamaño presentes entre ambos. Asimismo, también es apreciable su arquitectura radicular diferencial.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

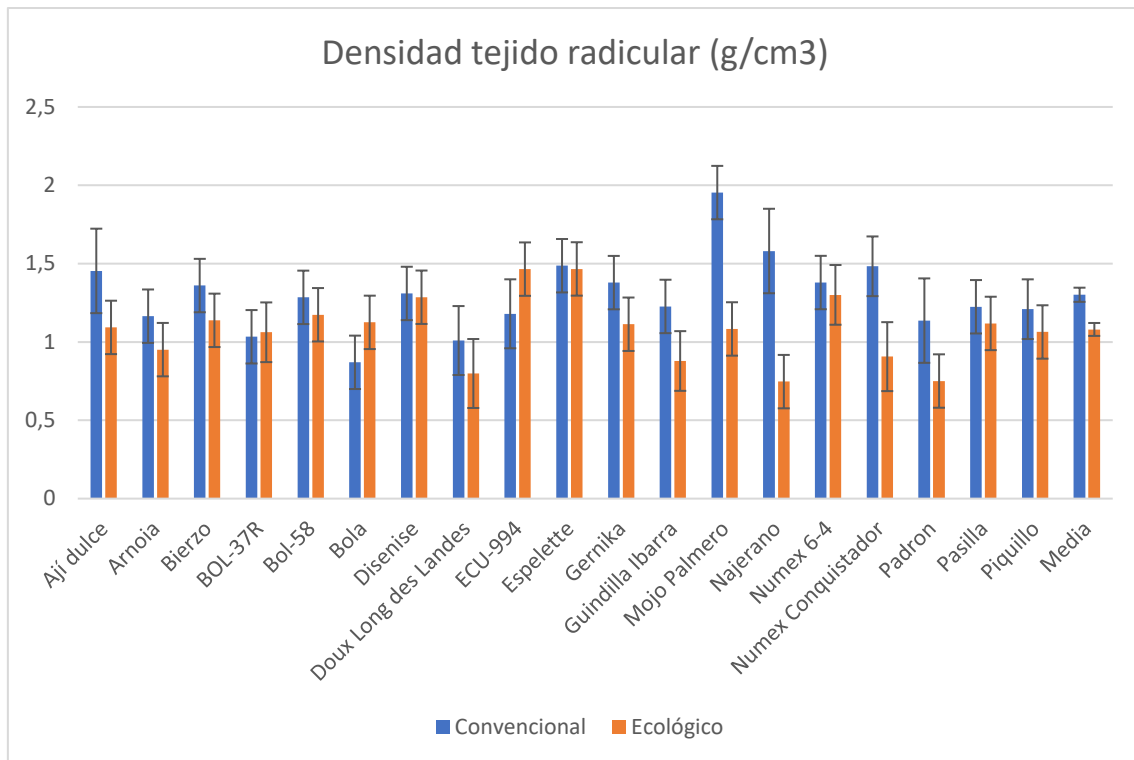


Figura 30. Gráfico de medias y barras de error de la densidad del tejido radicular (g/cm³) para cada uno de los genotipos analizados.



Figura 31. Se muestra una imagen lateral de los genotipos Numex 6-4, Piquillo y ECU-994 (De izquierda a derecha). Las imágenes superiores corresponden al manejo convencional, las inferiores al ecológico.

4.2 Análisis de correlaciones

El análisis de las correlaciones entre los diversos parámetros fenotipados, mediante la correlación de Pearson, arrojó datos clarificadores sobre las relaciones entre los diversos caracteres. La gran mayoría de los datos estaban significativamente correlacionados, tanto de manera positiva como negativa (Tabla 13).

Los mayores valores de correlación los encontramos entre: la longitud, área proyectada y área superficial ($r=0,97$); el área proyectada, área superficial y volumen radicular ($r=0,90$); el peso de la parte aérea y el peso de las raíces en seco ($r=0,77$); el peso de las raíces en seco también mostró una alta correlación con el área proyectada y superficial ($r=0,7$).

Las mayores correlaciones negativas, pese a estar en menor número, se encontraron entre: la longitud radicular específica y diámetro medio ($r=-0,67$); la densidad del tejido radicular y la longitud radicular específica ($r=-0,64$); el diámetro medio y la longitud ($r=-0,51$); y el diámetro medio y las áreas proyectada y superficial ($r=-0,42$).

Encontramos otros muchos valores con alta significatividad en sus valores de correlación, sin embargo, estos valores fueron menores a $r=0,7$. Entre los valores de correlación para $0,6 < r < 0,7$, encontramos: el peso de la parte aérea, correlacionada con el diámetro del tocón, el área proyectada y el área superficial ($r=0,61$ para los tres parámetros); también se halla en este intervalo la correlación del peso radicular seco con el volumen radicular ($r=0,63$). El parámetro menos correlacionado respecto al resto, fue la distancia radicular internodal, con valores no significativos para ninguno de los parámetros analizados, excepto por su baja correlación con el diámetro medio ($r=-0,34$, $p < 0,01$). El ratio R/P también exhibió una baja correlación con los parámetros fenotipados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 13. Análisis de correlaciones de Pearson, se muestran los valores r y su nivel de significatividad. *: significativo para p<0,05, **: significativo para p<0,01 y ***: significativo para p<0,001

| | Peso parte aérea (kg) | Peso tocón seco (g) | Peso radicular seco (g) | Grosor radicular promedio (cm) | Diámetro tocón (cm) | Distancia internodal radicular (cm) | Angulo radicular | Longitud total (cm) | Área proyectada (cm ²) | Área superficial (cm ²) | Volumen radicular (cm ³) | Diámetro medio (mm) | Longitud radicular específica (m/g) | Densidad tejido radicular (g/cm ³) | Ratio R/P |
|--|-----------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|--|-----------|
| Longitud radicular evaluada (cm) | 0,49*** | 0,25*** | 0,54*** | 0,31*** | 0,36*** | 0,07ns | 0,26*** | 0,52*** | 0,55*** | 0,55*** | 0,50*** | -0,20** | 0,12ns | -0,09ns | -0,04ns |
| Peso parte aérea(kg) | | 0,48*** | 0,77*** | 0,50*** | 0,61*** | 0,04ns | 0,19* | 0,57*** | 0,61*** | 0,61*** | 0,54*** | -0,14ns | -0,04ns | 0,15* | -0,38*** |
| Peso tocón seco (g) | | | 0,41*** | 0,37*** | 0,59*** | -0,07ns | 0,20** | 0,29*** | 0,31*** | 0,31*** | 0,27*** | -0,06ns | -0,17* | 0,34*** | -0,06ns |
| Peso radicular seco (g) | | | | 0,64*** | 0,55*** | 0,00ns | 0,21** | 0,66*** | 0,7*** | 0,7*** | 0,63*** | -0,14ns | -0,03ns | 0,08ns | 0,04ns |
| Grosor radicular promedio (cm) | | | | | 0,42*** | 0,02ns | -0,03ns | 0,16* | 0,26*** | 0,26*** | 0,35*** | 0,24** | -0,4*** | 0,32*** | 0,12ns |
| Diámetro tocón (cm) | | | | | | 0,00ns | 0,25** | 0,49*** | 0,54*** | 0,54*** | 0,53*** | -0,01ns | -0,11ns | 0,22** | -0,09ns |
| Distancia internodal radicular (cm) | | | | | | | -0,08ns | -0,13ns | -0,09ns | -0,09ns | -0,03ns | 0,34*** | -0,13ns | -0,00ns | -0,00ns |
| Angulo radicular | | | | | | | | 0,46*** | 0,42*** | 0,42*** | 0,28*** | -0,34*** | 0,29*** | -0,13ns | 0,02ns |
| Longitud total (cm) | | | | | | | | | 0,96*** | 0,96*** | 0,77*** | -0,51*** | 0,47*** | -0,27*** | -0,00ns |
| Área proyectada (cm ²) | | | | | | | | | | 1*** | 0,9*** | -0,42*** | 0,39*** | -0,31*** | 0,00ns |
| Área superficial (cm ²) | | | | | | | | | | | 0,9*** | -0,42*** | 0,39*** | -0,31*** | 0,00ns |
| Volumen radicular (cm ³) | | | | | | | | | | | | -0,24** | 0,28*** | -0,37*** | 0,02ns |
| Diámetro medio (mm) | | | | | | | | | | | | | -0,67*** | 0,28*** | 0,23** |
| Longitud radicular específica (m/g) | | | | | | | | | | | | | | -0,64*** | -0,17* |
| Densidad tejido radicular (g/cm ³) | | | | | | | | | | | | | | | 0,07ns |

4.3 Discusión

Los datos reflejados en el presente trabajo exhiben las diferencias mostradas entre manejos y genotipos, para gran parte de las características del sistema radicular utilizadas.

En primer lugar, hay que destacar la gran diversidad en cuanto a sistemas radiculares dentro del género *Capsicum sp.*, demostrada por el fuerte efecto del genotipo en todos los parámetros evaluados, así como la diversidad en su respuesta plástica a diferentes condiciones, en este caso dos suelos prácticamente idénticos pero con un historial de manejo distinto, ecológico frente a convencional. La mayor longitud total observada en el cultivo ecológico sería resultado de la respuesta radicular hacia la exploración de un mayor volumen de sustrato (Fita *et al.*, 2011), a fin de captar nutrientes que no se encontrarían tan disponibles como en el cultivo de altos insumos. Esta mayor longitud total para el cultivo ecológico consecuentemente va a estar estrechamente ligada a una mayor área proyectada, una mayor área superficial y, por ende, a un mayor volumen radicular en este tipo sistema de cultivo pese a poseer un diámetro medio inferior bajo este tipo de manejo agronómico. Esto va a ser constatable debido a que las diferencias entre genotipos y medias totales van a ser similares para: longitud total, volumen de raíz, área superficial y área proyectada.

El mayor diámetro medio observado en el cultivo convencional podría estar correlacionado también con los niveles de concentración de nutrientes -en concreto, nitrógeno-, su capacidad de absorción, capacidad de transporte y la tasa de respiración (Mc Cormack *et al.*, 2015). Si bien, las diferencias entre las medias totales de ambos manejos fueron de 0,05 mm. Esto podría indicar que el grosor mínimo promedio de los sistemas radiculares de *Capsicum sp.* serían de en torno a 0,95-1 mm. Los mayores grosores medios observados en nuestros datos corresponden a genotipos de *Capsicum annum* var. *annuum*; los ejemplares de *C. chinense* y *C. baccatum*,. Sin embargo, en ensayos realizados por Bui *et al.* (2015), *C. chinense* y *C. baccatum* mostraron diámetros promedio mayores a los encontrados en estas especies en nuestro ensayo, valores equiparables a los de *C. annum*; indicando que la diversidad de grosores radiculares también está presente en las poblaciones de estas dos especies cultivadas. No obstante, los valores obtenidos en nuestro ensayo en los

genotipos Numex 6-4 y Numex Conquistador superaron con creces los presentes en la bibliografía existente hoy en día para el sistema radicular de este género. Nuestros resultados para el diámetro medio, asimismo, reflejan respecto al análisis de clases que, pese a que el cultivo ecológico poseía un mayor número de raíces laterales > 0.2 cm en la mayoría de los genotipos, estas no presentaban un grosor uniforme. Ya que, si hubiese sido de esta manera, el diámetro medio en el cultivo ecológico habría sido superior.

Los cambios en el ángulo radicular podrían atribuirse a la diferencia en el sistema de abonados entre ambos manejos, más concretamente por las diferencias en los niveles de fósforo disponibles en el sustrato. El cultivo de altos insumos (con un mayor nivel de fósforo asimilable disponible en el sustrato) posee unas raíces más profundas, mientras que el cultivo de bajos insumos muestra unas raíces más superficiales (menor concentración de fósforo asimilable en el sustrato). Este tipo de respuesta adaptativa frente a bajos niveles de fósforo, debida a procesos moleculares subyacentes, ha sido constatada en diversas especies como *Oryza sativa* L. y *Phaseolus vulgaris* L. (Huang *et al.*, 2018 y Liao *et al.*, 2001); lo que parece indicar que este hecho es el causante de las diferencias observadas en este parámetro.

Respecto a los otros parámetros evaluados mediante la plataforma de fenotipado de pimiento (como la longitud radicular evaluada), los comportamientos fueron concordantes con los obtenidos mediante la plataforma WinRhizo. Por otro lado, el grosor radicular promedio obtenido mediante esta plataforma no exhibió diferencias significativas para manejo, aunque sí para el efecto del genotipo y su interacción. Este suceso, podría haber sucedido debido a que la plataforma de fenotipado de pimiento no posee una precisión tan alta como la plataforma informática. El diámetro del tocón, aunque no fue diferente entre manejos, sí lo fue entre genotipos y su interacción con el sistema de cultivo. Posiblemente las diferencias en grosor del tocón dependan del porte de los genotipos estudiados y sus componentes genéticos, hecho que se demuestra por los cambios morfológicos ocasionados por programas de mejora o hibridación (Naresh *et al.*, 2016). La distancia internodal radicular resultó ser muy homogénea entre manejos y genotipos, exceptuando algunas variedades que exhibieron un comportamiento muy distinto, lo cual denota su fuerte interacción con el sistema

de cultivo. En este parámetro morfométrico sería de interés que la distancia fuese la menor posible, lo cual aumentaría la densidad radicular, superficie, etc.

La mayor biomasa observada en seco en el manejo ecológico, tanto en el peso radicular como en el del tocón y la parte aérea, concuerda con los datos recabados para otros cultivos, en los cuales el manejo ecológico repercutió en un mayor peso de la parte radicular y en biomasa comparado con el manejo convencional (Hu *et al.*, 2018). Las diferencias en peso seco del tocón se vieron reducidas a nivel de manejo agrario, resultando no significativas únicamente para este factor. Lo cual indicaría que las variaciones observadas serían el resultado de las capacidades fisiológicas particulares de cada genotipo, así como su interacción edáfica, y por ende con el manejo agrario utilizado. Si bien, este suceso no ocurrió con el peso radicular en seco, el cual seguía siendo superior en el cultivo orgánico. Por tanto, las diferencias encontradas en esta parte vegetal, no serían causadas únicamente por su contenido en agua, sino también por su composición tisular; debida a su vez, a las diferencias en la biodiversidad de microorganismos y hongos del suelo -y su actividad enzimática- entre ambos sistemas de cultivo, junto con las diferencias en la excreción de exudados radiculares que permiten la captación de nutrientes (Eisenhauer *et al.*, 2017, Aguilar Medina, 2017 y Chirinda *et al.*, 2011).

Parámetros como la longitud radicular específica, según Kramer-Walter *et al.*, (2016) muestran una correlación negativa con la fertilidad del suelo, lo que explicaría que esta fuese mayor en el cultivo ecológico. Estos resultados también concuerdan con las diferencias observadas para la densidad del tejido radicular, la cual estaría correlacionada positivamente con la fertilidad del suelo, explicando que esta sea mayor para el manejo convencional. El ratio R/P obtenido de nuestros datos, pone en entredicho las conclusiones obtenidas por Agren y Ingestad (1987) los cuales correlacionan positivamente la cantidad de nitrógeno en el suelo con el ratio R/P. En nuestro caso, este ratio fue mayor en el cultivo ecológico, lo cual concuerda con la segunda hipótesis presentada por estos autores, que también relacionan positivamente el ratio R/P con la eficacia fotosintética y la concentración interna de nitrógeno (Agren y Franklin, 2003). Por lo que podría afirmarse, teniendo en cuenta esta hipótesis, que las variedades

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

con mayor R/P encontradas en el cultivo orgánico poseerían una mayor eficacia fotosintética, una mayor concentración interna de nitrógeno, o ambas.

Finalmente, nuestro análisis de correlaciones entre los diversos parámetros morfológicos analizados, indica que los parámetros de fácil medición, como los pesos de las distintas partes o el diámetro del tocón, son de gran utilidad para poder estimar las características morfológicas radiculares cuya medición resulta compleja, debido a la dificultad de extracción y procesado de las muestras. Estos parámetros serían, por ejemplo: el volumen radicular o la longitud total.

5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

El presente estudio ha servido para constatar varias puntualizaciones sobre el sistema radicular de varios integrantes del género *Capsicum sp.*:

Se ha demostrado la diversidad morfológica radicular intraespecífica e interespecífica existente en los genotipos y especies estudiadas, así como su respuesta a los dos sistemas de manejo agrario más utilizados para este cultivo actualmente. Esta información permite la selección de variedades, para su cultivo directo o su uso como portainjertos, por parte de los productores que deseen maximizar el rendimiento y estado óptimo de sus cultivos bajo estos tipos de manejo agrario; lo cual nos dirige a una agricultura con análisis pormenorizados, centrada en la maximización de la eficacia de los cultivos dependiendo de su manejo.

Hemos constatado de esta manera tres grupos bien diferenciados respecto a su respuesta a los sistemas de cultivo ecológico y convencional: Genotipos con mayor desarrollo radicular en cultivo ecológico (como Padrón y Piquillo), genotipos con mayor desarrollo en cultivo convencional (como Numex 6-4 y Numex Conquistador) y genotipos con respuestas ambivalentes a sendos sistemas de cultivo (como Najerano y Mojo Palmero).

A su vez, la utilización de dos plataformas de fenotipado, ha servido para correlacionar los caracteres de interés medidos en ambas; afianzando el uso y la importancia de estos sistemas para el desarrollo de programas de mejora con mayor presteza y sencillez de fenotipado en campo. La diversidad mostrada en este trabajo, también sirve como punto de partida para la realización de programas de mejora focalizados en el incremento del tamaño del sistema radicular, con el fin de conseguir cultivos más vigorosos y eficientes respecto a su relación fisiológica con el sustrato.

6. BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia WWF. (2018). La burbuja del regadío: El caso del mar menor. Evolución de los regadíos en el entorno del mar menor, Campo de Cartagena 1977-2017
- Agren, G. I., & Franklin, O. (2003). Root : shoot ratios, optimization and nitrogen productivity. *Ann Bot*, 92(6), 795-800. doi: 10.1093/aob/mcg203
- Ågren, G. I., & Ingestad, T. (1987). Root: shoot ratio as a balance between nitrogen productivity and photosynthesis. *Plant, Cell & Environment*, 10(7), 579-586. doi: doi:10.1111/1365-3040.ep11604105
- Aguilar Medina, C. L. (2017). Evaluación de la fertilidad del suelo en función de la actividad enzimática en cultivo ecológico y convencional de pimiento (*Capsicum sp.*). *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Albrecht, E., Zhang, D., Mays, A. D., Saftner, R. A., & Stommel, J. R. (2012). Genetic diversity in *Capsicum baccatum* is significantly influenced by its ecogeographical distribution. *BMC Genetics*, 13, 68. doi: 10.1186/1471-2156-13-68
- Atkinson, J. A., Rasmussen, A., Traini, R., Voss, U., Sturrock, C., Mooney, S. J., & Bennett, M. J. (2014). Branching out in roots: uncovering form, function, and regulation. *Plant Physiology*, 166(2), 538-550. doi: 10.1104/pp.114.245423
- Barberon, M., & Geldner, N. (2014). Radial Transport of Nutrients: The Plant Root as a Polarized Epithelium. *Plant Physiology*, 166(2), 528-537. doi: 10.1104/pp.114.246124
- Birkhofer, K. , Smith, H. G. and Rundlöf, M. (2016). Environmental Impacts of Organic Farming. In eLS, John Wiley & Sons, Ltd (Ed.). doi: 10.1002/9780470015902.a0026341
- Bletsos, F. A., & Olympios, C. M. (2008). Rootstocks and grafting of tomatoes, peppers, and eggplants for soil-borne disease resistance, improved yield and quality. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 2(1), 62-73.
- Bosland, P. W., & Baral, J. B. (2007). 'Bhut Jolokia'—The World's Hottest Known Chile Pepper is a Putative Naturally Occurring Interspecific Hybrid. *Horticultural Science*, 42(2), 222-224.

- Bosland, P. W., & Votava, E. J. (2000). *Peppers: Vegetable and Spice Capsicums*: CABI Publishing.
- Bucksch, A., Burridge, J., York, L. M., Das, A., Nord, E., Weitz, J. S., & Lynch, J. P. (2014). Image-based high-throughput field phenotyping of crop roots. *Plant Physiology*. doi: 10.1104/pp.114.243519
- Bui, H. H., Serra, V., & Pagès, L. (2015). Root system development and architecture in various genotypes of the Solanaceae family. *Botany*, 93(8), 465-474. doi: 10.1139/cjb-2015-0008
- Cadahia, C. (2005). *Fertirrigación: Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*: Mundiprensa.
- Carrizo Garcia, C., Barfuss, M. H., Sehr, E. M., Barboza, G. E., Samuel, R., Moscone, E. A., & Ehrendorfer, F. (2016). Phylogenetic relationships, diversification and expansion of chili peppers (Capsicum, Solanaceae). *Annals of Botany*, 118(1), 35-51. doi: 10.1093/aob/mcw079
- Carrizo Garcia, C., Volpi, P., Ummarino, M., & Saccardo, F. (2013). Wild capsicums: identification and in situ analysis of Brazilian species. In: Lanteri S, Rotino GL, eds. Breakthroughs in the genetics and breeding of Capsicum and eggplant. Turin: *Eucarpia*, 205–213.
- Carvalho, S. I., Ragassi, C. F., Bianchetti, L. B., Reifschneider, F. J., Buso, G. S., & Faleiro, F. G. (2014). Morphological and genetic relationships between wild and domesticated forms of peppers (Capsicum frutescens L. and C. chinense Jacquin). *Genetics & Molecular Research*, 13(3), 7447-7464. doi: 10.4238/2014.September.12.11
- Chirinda, N., Olesen, J. E., & Porter, J. R. (2011). High root biomass for cereal crops increases carbon sequestration in organic arable systems. *17th IFOAM Organic World Congress*.
- Cichewicz, R. H., & Thorpe, P. A. (1996). The antimicrobial properties of chile peppers (Capsicum species) and their uses in Mayan medicine. *Journal of Ethnopharmacology*, 52(2), 61-70.
- Clark, M., & Tilman, D. (2017). Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, 12(6).

- Clark, R., & Lee, S. H. (2016). Anticancer Properties of Capsaicin Against Human Cancer. *Anticancer Research*, 36(3), 837-843.
- Derry, S., Sven-Rice, A., Cole, P., Tan, T., & Moore, R. A. (2013). Topical capsaicin (high concentration) for chronic neuropathic pain in adults. *Cochrane Database Systematic Reviews*, Cd007393. doi: 10.1002/14651858.CD007393.pub3
- Eisenhauer, N., Lanoue, A., Strecker, T., Scheu, S., Steinauer, K., Thakur, M. P., & Mommer, L. (2017). Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. *Scientific Reports*, 7, 44641. doi: 10.1038/srep44641. <https://www.nature.com/articles/srep44641#supplementary-information>
- Emmanuel-Ikpeme, C., Henry, P., Augustine Okiri, O., (2014). Comparative Evaluation of the Nutritional, Phytochemical and Microbiological Quality of Three Pepper Varieties. *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2(3), 74-80 doi: 10.11648/j.jfns.20140203.15
- Eshbaugh, W. H. (1963) The role of cultivation in the evolution of the genus *Capsicum*. *American Journal of Botany*. 50, 633-634
- Eurostat. (2017). *Agriculture, forestry and fishery statistics* (R. Forti Ed.): Publications Office of the European Union.
- FAOSTAT. (2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1998). FAOSTAT statistics database.
- Fita, A. M., Bowen, H. C., Hayden, R. M., Nuez, F., Pico, B., & Hammond, J. P. (2012). Diversity in expression of phosphorus (P) responsive genes in *Cucumis melo* L. *PLoS ONE*, 7(4), e35387. doi: 10.1371/journal.pone.0035387
- Fita, A. M., Nuez, F., & y Picó, B. (2011). Diversity in root architecture and response to P deficiency in seedlings of *Cucumis melo* L. *Euphytica*, 181(323). doi: <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0432-z>
- Gabriel, D., Sait, S. M., Kunin, W. E., & Benton, T. G. (2013). Food production vs. biodiversity: comparing organic and conventional agriculture. *Journal of Applied Ecology*, 50(2). doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12035>
- Gil-Villar, D. (2015). Fenotipado de accesiones variables de *Capsicum* sp. frente a la deficiencia de fósforo. *Universidad Politécnica de Valencia*.

- Gobierno de España. Real Decreto 774/2014, de 12 de septiembre, por el que se desarrolla la aplicación del artículo 167 del Reglamento (UE) nº 1308/2013, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de diciembre de 2013 y se fijan los requisitos y el contenido de una norma de comercialización en el sector del vino, y se aprueban las medidas aplicables a la campaña 2013/2014 y se derogan determinadas normas en materia agraria y pesquera.
- Gobierno de España. (2016). Anuario de Estadística. Capítulo 13
- Guil-Guerrero, J. L., Martínez-Guirado, C., del Mar Reboloso-Fuentes, M., & Carrique-Pérez, A. (2006). Nutrient composition and antioxidant activity of 10 pepper (*Capsicum annuum*) varieties. *European Food Research and Technology*, 224(1), 1-9. doi: 10.1007/s00217-006-0281-5
- Hedges SB, Dudley J, & Kumar S (2006). TimeTree: A public knowledge-base of divergence times among organisms. *Bioinformatics* 22: 2971-2972
- Hill, T. A., Ashrafi, H., Reyes-Chin-Wo, S., Yao, J., Stoffel, K., Truco, M.-J., Van Deynze, A. . (2013). Characterization of *Capsicum annuum* Genetic Diversity and Population Structure Based on Parallel Polymorphism Discovery with a 30K Unigene Pepper GeneChip. *PLoS ONE*, 8(2). doi: 10.1371/journal.pone.0056200
- Hu, T., Sørensen, P., Wahlström, E. M., Chirinda, N., Sharif, B., Li, X., & Olesen, J. E. (2018). Root biomass in cereals, catch crops and weeds can be reliably estimated without considering aboveground biomass. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 141-148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.024>
- Huang, G., Liang, W., Sturrock, C. J., Pandey, B. K., Giri, J., Mairhofer, S., & Zhang, D. (2018). Rice actin binding protein RMD controls crown root angle in response to external phosphate. *Nature Communications*, 9(1), 2346. doi: 10.1038/s41467-018-04710-x
- Ibiza, V. P., Blanca, J., Cañizares, J., & Nuez, F. (2012). Taxonomy and genetic diversity of domesticated *Capsicum* species in the Andean region. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 59(6), 1077-1088. doi: 10.1007/s10722-011-9744-z

- IBPGR. (1983). *Genetic resources of Capsicum: a global plan of action.*: International Board for Plant Genetic Resources.
- Ince, A. G., Karaca, M., & Onus, A. N. (2010). Genetic relationships within and between Capsicum species. *Biochemical Genetics*, 48(1-2), 83-95. doi: 10.1007/s10528-009-9297-4
- Integrated Taxonomic Information System, retrieved from the (ITIS) (<http://www.itis.gov>).
- IPGRI., AVRDC., & CATIE. (1995). Descriptors for Capsicum (Capsicum spp.). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy; the Asian Vegetable Research and Development Center, Taipei, Taiwan, and the Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica.
- Julkowska, M., Koevoets, I. T., Mol, S., Hoefsloot, H. C., Feron, R., Tester, M., & Testerink, C. (2017). Genetic Components of Root Architecture Remodeling in Response to Salt Stress. *The Plant Cell*. doi: 10.1105/tpc.16.00680
- Kenrick, P., & Strullu-Derrien, C. (2014). The origin and early evolution of roots. *Plant Physiology*. 166(2), 570-580. doi: 10.1104/pp.114.244517
- Kraft, K. H., Brown, C. H., Nabhan, G. P., Luedeling, E., Luna Ruiz Jde, J., Coppens d'Eeckenbrugge, G., & Gepts, P. (2014). Multiple lines of evidence for the origin of domesticated chili pepper, *Capsicum annuum*, in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A*, 111(17), 6165-6170. doi: 10.1073/pnas.1308933111
- Kramer-Walter, K. R., Bellingham, P. J., Millar, T. R., Smissen, R. D., Richardson, S. J., & Laughlin, D. C. (2016). Root traits are multidimensional: specific root length is independent from root tissue density and the plant economic spectrum. *Journal of Ecology*, 104(5), 1299-1310. doi: doi:10.1111/1365-2745.12562
- Liao, H., Rubio, G., Yan, X., Cao, A., Brown, K. M., & Lynch, J. P. (2001). Effect of phosphorus availability on basal root shallowness in common bean. *Plant Soil*, 232(1-2), 69-79.
- Maroto Borrego, J. V. (2008). *Elementos de Horticultura General*: Mundiprensa.

- McCormack, M. L., Dickie, I. A., Eissenstat, D. M., Fahey, T. J., & Fernandez, C. W. (2015). Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist*, 207(3), 505-518. doi: 10.1111/nph.13363
- McLeod, M. J., Guttman, S. I., & Eshbaugh, W. H. (1982). Early evolution of chili peppers (*Capsicum*). *Economic Botany*, 36(4), 361-368. doi: 10.1007/bf02862689
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación, & y Medio Ambiente. (2016). Agricultura Ecológica Estadísticas 2015. *Gobierno de España*.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación, & y Medio Ambiente. (2017). Estadística Anual de Superficies y Producciones de Cultivos. *Gobierno de España*.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación, & y Medio Ambiente. (2017 b). Perfil Ambiental de España 2016. *Gobierno de España*.
- Moreno, E., Fita, A., González-Mas, M. C., & Rodríguez-Burruezo, A. (2012). HS-SPME study of the volatile fraction of *Capsicum* accessions and hybrids in different parts of the fruit. *Scientia Horticulturae*, 135, 87-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.12.001>
- Morre, D. J., & Morre, D. M. (2003). Synergistic *Capsicum*-tea mixtures with anticancer activity. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 55(7), 987-994. doi: 10.1211/0022357021521
- Moscone, E. A., Scaldaferrro, M. A., Grabiele, M., Cecchini, N. M., Sánchez García, Y., Jarret, R., & Ehrendorfer, F. (2007). The evolution of chile peppers (*Capsicum* - Solanaceae): A Cytogenetic Perspective. *Acta Horticulturae*, 745, 137-170. doi: 10.17660/ActaHortic.2007.745.5
- Naresh, P., Bhatt, R. M., Venkatachalapathi, V., Gangadhararao, P., & Reddy, K. M. (2017). Inheritance of Root Traits in an Interspecific Cross of *Capsicum annuum* × *C. chinense* in the Presence of Low Moisture. *International Journal of Vegetable Science*, 23(6), 575-583. doi: 10.1080/19315260.2016.1221016
- Nonnecke, L. (1989). *Vegetable Production*: Springer US.

- Nuez, F., Diez, M. J., Ruiz, J. J., Fernandez de Cordova, P., Costa, J., Catalá, M. S., & Rodriguez, A. (1998). *Catálogo de semillas de pimiento*: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (España).
- Nuez, F., Ortega, R. G., & Costa, J. (1996). *El cultivo de pimientos, chiles y ajíes*: Mundiprensa
- Ostonen, I., Püttsepp, Ü., Biel, C., Alberton, O., Bakker, M. R., Lõhmus, K., & Brunner, I. (2007). Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 141(3), 426-442. doi: 10.1080/11263500701626069
- Peláez-anderica, E., Rodríguez-Burruezo, A., Prohens, J., & Fita, A. (2011). Root Seedling Morphology Diversity in Capsicum spp. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture*, 68(1). doi: 10.15835/buasvmcn-hort:6999
- Penella, C., González Nebauer, S., López Galarza, S. V., San Bautista Primo, A., Gorbe, E., & Calatayud, Á. (2013). Evaluation for salt stress tolerance of pepper genotypes to be used as rootstocks. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 11(3), 1101-1107. doi: <http://hdl.handle.net/10251/74087>
- Penella, C., González Nebauer, S., López Galarza, S. V., San Bautista Primo, A., Rodríguez Burruezo, A., & Calatayud, A. (2014). Evaluation of some pepper genotypes as rootstocks in water stress conditions. *Horticultural Science*, 41, 192-200. doi: <http://hdl.handle.net/10251/73283>
- Penella, C., Landi, M., Guidi, L., Nebauer, S. G., Pellegrini, E., San Bautista, A., & Calatayud, A. (2016). Salt-tolerant rootstock increases yield of pepper under salinity through maintenance of photosynthetic performance and sinks strength. *Journal of Plant Physiology*, 193, 1-11. doi: 10.1016/j.jplph.2016.02.007
- Penella, C., Nebauer, S. G., Quiñones, A., San Bautista, A., López-Galarza, S., & Calatayud, A. (2015). Some rootstocks improve pepper tolerance to mild salinity through ionic regulation. *Plant Science*, 230, 12-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.10.007>

- Penella, C. (2015 b). Screening pepper genotypes to obtain tolerant rootstocks to salt and water stress. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Perry, L., Dickau, R., Zarrillo, S., Holst, I., Pearsall, D. M., Piperno, D. R., & Zeidler, J. A. (2007). Starch fossils and the domestication and dispersal of chili peppers (*Capsicum* spp. L.) in the Americas. *Science*, 315(5814), 986-988. doi: 10.1126/science.1136914
- Pickersgirll B. (1988). The genus *Capsicum*: a multidisciplinary approach to the taxonomy of cultivated and wild plants. *Biologisches Zentralblatt*. 107: 381-389.
- Pochard, E. (1966). Donnees experimentales sur la selection du piment (*Capsicum annum* L.). *An. Am. Plantes*, 16(2), 185-197.
- Prohens, J., Gramazio, P., Plazas, M., Dempewolf, H., Kilian, B., Díez, M. J. & Vilanova, S. (2017). Introgressiomics: a new approach for using crop wild relatives in breeding for adaptation to climate change. *Euphytica*, 213(7), 158. doi: 10.1007/s10681-017-1938-9
- Rincón, L. (1985). Abonado y riego por goteo del pimiento en invernadero. *Consejería de Agricultura de Murcia*, 9/85.
- Rivas-Martínez, S. (1983). Pisos bioclimáticos de España. *Lazaroa* (5), 33-43.
- Rodriguez-Burruezo, A., Pereira, L., & Fita, A. M. (2016). Pimiento. In Jose Ignacio Ruiz de Galarreta, Jaime Prohens & Roberto Tierno (Eds.), *Las variedades locales en la mejora genética de plantas* (pp. 405-426): Eusko Jauriaritzen Argitalpen Zerbitzu Nagusia.
- Sarkinen, T., Bohs, L., Olmstead, R. G., & Knapp, S. (2013). A phylogenetic framework for evolutionary study of the nightshades (Solanaceae): a dated 1000-tip tree. *BMC Evolutionary Biology*, 13, 214. doi: 10.1186/1471-2148-13-214
- Sousa, W. R. d. N., Lopes, A. C. d. A., Carvalho, R. d., Gomes, R. L. F., & Peron, A. P. (2015). Karyotypic characterization of *Capsicum* sp. accessions. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 37, 147-153.
- Steffens, B., & Rasmussen, A. (2016). The Physiology of Adventitious Roots. *Plant Physiology*, 170(2), 603-617. doi: 10.1104/pp.15.01360
- Taiz, L. and Zeiger, E. (2006). *Plant physiology*. Sunderland, Mass.: Sinauer Associates.

- Tardieu, F., Cabrera-Bosquet, L., Pridmore, T., & Bennett, M. (2017). Plant Phenomics, From Sensors to Knowledge. *Current Biology*, 27(15), 770-783. doi: 10.1016/j.cub.2017.05.055
- The Plant List (2013). Version 1.1. Published on the Internet; <http://www.theplantlist.org/> (accessed 1st January).
- Turchetto-Zolet, A. C., Pinheiro, F., Salgueiro, F., & Palma-Silva, C. (2013). Phylogeographical patterns shed light on evolutionary process in South America. *Molecular Ecology*, 22(5), 1193-1213. doi: 10.1111/mec.12164
- Union Europea. Reglamento (UE) 2018/848 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, sobre producción ecológica y etiquetado de los productos ecológicos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n.o 834/2007 del Consejo.
- Union Europea. Reglamento (CE) n o 889/2008 de la Comisión, de 5 de septiembre de 2008 , por el que se establecen disposiciones de aplicación del Reglamento (CE) n o 834/2007 del Consejo sobre producción y etiquetado de los productos ecológicos, con respecto a la producción ecológica, su etiquetado y su control
- Votava, E. J., Baral, J. B., & Bosland, P. W. (2005). Genetic diversity of Chile (*Capsicum annuum* var. *annuum* L.) landraces from Northern New Mexico, Colorado, and Mexico. *Economic Botany*, 59(1), 8-17.
- Wu, F., & Tanksley, S. D. (2010). Chromosomal evolution in the plant family Solanaceae. *BMC Genomics*, 11, 182. doi: 10.1186/1471-2164-11-182