

**Respuesta de la fenología, crecimiento y desarrollo del olivo (*Olea europaea* L.)  
a la temperatura primaveral**

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Ciencias Agropecuarias*

Leila Mariam Hamze

Ingeniera Agrónoma - Universidad de Buenos Aires - 2016

Lugar de trabajo: Centro Regional de Investigaciones Científicas y Transferencia  
Tecnológica de La Rioja



**FAUBA**

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



## COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

**María Cecilia Rousseaux**

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)  
Doctora en Cs. Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Co-director

**Peter Stoughton Searles**

B.S. in Biology (University of Maryland)  
Ph.D. (Utah State University)

Consejero de Estudios

**Eduardo Rafael Trentacoste**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Cuyo)  
Doctor en Cs. Agropecuarias (Universidad Politécnica de Madrid)

## JURADO DE TESIS

JURADO

**Hava Rapoport Goldberg**

Ph.D. en Botánica (Universidad de California, Davis)

JURADO

**Luca Testi**

Doctor Ingeniero Agrónomo (Universidad de Córdoba)

JURADO

**Nadia Soledad Arias**

Doctora en Biología (Universidad del COMAHUE)

Fecha de defensa de la tesis: 20 de 02 de 2024

A La Rioja, por las innumerables enseñanzas

*Córdoba es linda*

*Salta es mejor*

*pero mi Rioja es un ramo de flor*

*Chaya del pago, Los Hermanos Albarracín*

## Agradecimientos

Gracias a Cecilia y Peter, mi directora y codirector y a Eduardo, mi consejero de estudios que me guiaron, impulsaron y acompañaron en todo el proceso. Gracias por poner tanto de su parte para mi formación como científica aún en los momentos difíciles.

Gracias a mis compañeros del grupo de Ecofisiología de olivo, especialmente Andrea, Federico, Carlos y Magdalena y al equipo de INTA Junín, especialmente Facundo y Octavio.

Gracias a todos los que colaboraron para que nuestros experimentos fueran posibles: Juan, Hernán, José Luis, Charly y Gustavo en el CRILAR. A quienes me abrieron el portón de sus fincas Alberto Leborán, Carlos Blanch, Emilio Caimi y Pablo Quiroga y las personas que allí nos recibieron y ayudaron en toda forma especialmente Natalia, Walter, Ariel y Juan Ignacio.

Gracias a todos mis amigos y compañeros del CRILAR: Tamara, Gimena, Sergio, Victoria, Nicolás, Valeria, Marcos, Léa y Gabriela, que me enseñaron de cerca otras disciplinas y formas de pensar, y con quienes compartimos cinco años de vida y una pandemia.

Gracias a mi familia, que confió en mí y me enseñó la importancia de estudiar, pensar, cuestionarme y, sobre todo, me apoyó para salir a buscar mis motivaciones, trabajando con esmero, pero sobre todo con amor y alegría. Gracias a mis viejos, Osvaldo y Viviana, a Andresito, a mi Tía Nora y a la Abuela Elba, mi ejemplo siempre. Gracias también a mis hermanas del corazón y colegas Andrea y Gabi y a Damián, mi compañero de vida durante este proceso y mi soporte en tantos momentos.

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

**Publicaciones derivadas de la tesis**

Hamze, L. M., Trentacoste, E. R., Searles, P. S., & Rousseaux, M. C. (2022). Spring reproductive and vegetative phenology of olive (*Olea europaea* L.) cultivars at different air temperatures along a latitudinal-altitudinal gradient in Argentina. *Scientia Horticulturae*, 304, 111327.

**RESPUESTA DE LA FENOLOGÍA, CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL  
OLIVO (*OLEA EUROPAEA* L.) A LA TEMPERATURA PRIMAVERAL**

<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>xviii</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>xx</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xxi</b>
<b>CAPITULO I</b> .....	<b>22</b>
<b>Introducción general</b> .....	<b>22</b>
1.1 El cambio climático y sus posibles impactos sobre los cultivos frutales .....	23
1.1.1 Aspectos generales del cambio climático .....	23
1.1.2 Efectos del cambio climático sobre los cultivos .....	24
1.1.3 El estudio de la fenología en ciencias agrarias .....	24
1.1.4 Impacto del calentamiento global sobre la fenología de las plantas .....	26
1.1.5 Influencia del calentamiento global sobre la fenología de árboles frutales .....	27
1.1.6 Influencia del calentamiento global sobre el crecimiento en de las plantas .....	29
1.1.7 Efectos del calentamiento global observados en cultivos de olivo.....	30
1.2 El cultivo del olivo en el oeste argentino .....	32
1.2.1 Historia .....	32
1.2.2 Características climáticas.....	34
1.2.3 Comportamiento del olivo en ambientes del Oeste de Argentina .....	36
1.3 El control de la fenología en olivo .....	37
1.4 El control del crecimiento vegetativo en olivo .....	41
1.5 El control del crecimiento del fruto en olivo .....	43
1.6 Objetivos e Hipótesis .....	44
1.6.1 Objetivo general.....	44
1.6.2 Objetivos específicos e hipótesis .....	44
1.7 Estructura de la Tesis .....	48
<b>CAPITULO II</b> .....	<b>51</b>

<b>Fenología reproductiva y vegetativa primaveral de cultivares de olivo (<i>Olea europaea</i> L.) a diferentes temperaturas del aire a lo largo de un gradiente latitudinal-altitudinal en Argentina .....</b>	<b>51</b>
2.1 Introducción .....	52
2.2 Materiales y Métodos .....	55
2.2.1. Región y material vegetal .....	55
2.2.2 Observaciones fenológicas .....	60
2.2.3 Análisis estadísticos .....	62
2.3 Resultados .....	63
2.3.1 Temperatura del aire y acumulación de frío .....	63
2.3.2 Variabilidad explicada por localidad, temporada y cultivar .....	65
2.3.3 Observación de los estadios fenológicos reproductivos .....	68
2.3.4. Observación de los estadios fenológicos vegetativos .....	70
2.3.5 Duración de períodos entre estadios fenológicos en función de la temperatura del aire .....	73
2.4 Discusión .....	74
2.5. Conclusiones .....	81
<b>CAPITULO III .....</b>	<b>82</b>
<b>Respuesta de la fenología reproductiva y vegetativa de dos cultivares de olivo al calentamiento primaveral.....</b>	<b>82</b>
3.1 Introducción .....	83
3.2 Materiales y Métodos .....	87
3.2.1 Material vegetal y sitio experimental.....	87
3.2.2 Tratamientos y diseño experimental .....	88
3.2.3 Observaciones fenológicas .....	91
3.2.4 Análisis Estadísticos .....	95
3.3 Resultados .....	96
3.3.1 Temperatura .....	96
3.3.2 Impacto del calentamiento sobre la fenología .....	97
3.3.3 Impacto del calentamiento sobre los períodos determinantes del rendimiento .	102
3.4 Discusión .....	104
3.5 Conclusiones .....	110

<b>CAPITULO IV .....</b>	<b>111</b>
<b>Respuestas del crecimiento y la producción de biomasa al calentamiento primaveral en dos cultivares de olivo .....</b>	<b>111</b>
4.1 Introducción .....	112
4.2 Materiales y métodos .....	117
4.2.1 Producción de órganos reproductivos.....	118
4.2.2 Medición del crecimiento vegetativo.....	119
4.2.3 Determinaciones de biomasa .....	120
4.2.4 Análisis estadísticos.....	121
4.3. Resultados .....	122
4.3.1. Temperatura ambiente .....	122
4.3.2 Intensidad de floración y cuaje de frutos .....	123
4.3.3 Dinámica del crecimiento vegetativo .....	125
4.3.4 Biomasa reproductiva y vegetativa.....	127
4.4 Discusión.....	132
4.5 Conclusiones .....	139
<b>CAPITULO V .....</b>	<b>141</b>
<b>Desarrollo y crecimiento del fruto en un gradiente de temperatura ambiental a campo .....</b>	<b>141</b>
5.1 Introducción .....	142
5.2 Materiales y Métodos.....	146
5.2.1 Región y material vegetal .....	146
5.2.2 Endurecimiento de carozo .....	147
5.2.3 Acumulación de peso seco del fruto.....	148
5.2.4 Acumulación de aceite en el fruto .....	149
5.2.5 Análisis estadísticos.....	151
5.3 Resultados .....	152
5.3.1 Temperatura del aire .....	152
5.3.2 Variabilidad en la fecha de endurecimiento de carozo explicada por localidad, temporada y cultivar .....	154
5.3.3 Variabilidad en el crecimiento del fruto explicada por localidad, temporada y cultivar .....	155

5.3.4 Variabilidad en la dinámica de crecimiento del fruto y acumulación de aceite explicada por la localidad, cultivar y temporada .....	158
5.3.5 Relación entre la tasa y la duración para el crecimiento del fruto y la acumulación de aceite .....	162
5.4 Discusión.....	163
5.5 Conclusiones .....	171
<b>CAPITULO VI .....</b>	<b>172</b>
<b>Discusión General .....</b>	<b>172</b>
6.1 Importancia y originalidad de la tesis .....	173
6.2 Validación de hipótesis de la tesis .....	174
6.3 Posibles líneas de investigación futuras .....	181
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>185</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 2.1.</b> Información climática geográfica e histórica de las seis localidades argentinas y dos localidades españolas. Se muestran los valores temperatura del aire media, máxima y mínima diaria media anual, amplitud térmica anual, precipitación anual y humedad relativa anual promedio (HR) desde 1987 hasta 2019 aproximadamente. Algunos valores corresponden solo al año 2019 (*) o al período de dos años de 2018-2019 (**) por falta de series de datos más extensas. msnm: metros sobre el nivel del mar nd: sin datos disponibles.....	56
<b>Cuadro 2.2.</b> Frio invernal acumulado en las seis localidades durante 2018 y 2019 expresado como chilling units (CU) (De Melo-Abreu et al., 2004) y chilling portions (CP) (Fishman et al., 1987a).....	64
<b>Cuadro 2.3</b> - Variabilidad (%) como fracción del cuadrado medio total explicado por cultivar (C), localidad (L) y temporada (S) para uno de los estadios fenológicos en todo el conjunto de datos. Los estadios considerados fueron: 11 (primer par de hojas completamente separadas), 37 (70% de elongación del brote), 53 (apertura de las yemas florales), 60 (inicio de la floración), 65 (plena floración), 69 (final de la floración, cuaje). Se observaron cinco árboles (replicas) por cada combinación de CxLxS. gl: grados de Libertad.....	65
<b>Cuadro 2.4.</b> - Estadios fenológicos reproductivos y vegetativos (día del año, DOY) para todas las localidades (L) y dos temporadas de crecimiento (S) en los dos cultivares más comunes evaluados (C; Arbequina y Picual). Se observaron cinco arboles (replicas) por cada combinación de C x L x S. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ). Cada estadio (BBCH 11, 37, 53, 60, 65, 69) se explica en el Cuadro 3.....	66
<b>Cuadro 2.5.</b> - Estadios fenológicos reproductivos y vegetativos (DOY, día del año) para los cinco cultivares más evaluados (C) en tres localidades (L) y las dos temporadas de crecimiento (S). Se observaron cinco arboles (replicas) por cada combinación de C x L x S. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ). Cada uno de los estadios (BBCH 11, 37, 53, 60, 65, 69) se explica en el Cuadro 3.....	68
<b>Cuadro 3.1.</b> –Fecha de ocurrencia (día del año) de estadios reproductivos para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (2018-2019; 2019-2020). Hubo cuatro repeticiones para cada combinación de cultivar x tratamiento térmico x temporada. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando LSD-Fischer ( $p < 0,05$ ). Cada estadio (BBCH53, 57, 60, 65, 69, EC, PSF50) está explicado en la Fig. 3.....	99

**Cuadro 3.2.** –Fecha de ocurrencia (día del año) de estadios vegetativos para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (2018-2019; 2019-2020). Hubo cuatro repeticiones para cada combinación de cultivar x tratamiento térmico x temporada. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando LSD-Fischer ( $p < 0,05$ ). Cada estadio (BBCH11 y 37) está explicado en la Fig. 3.5.....100

**Cuadro 3.3.**– Duración media de los periodos (días) entre el estadio BBCH11 y dos estadios reproductivos: BBCH53 (BBCH11-53) y BBCH65 (BBCH11-65) para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (2018-2019 y 2019-2020). Hubo cuatro repeticiones para cada combinación de cultivar x tratamiento térmico x temporada. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando LSD-Fischer ( $p < 0,05$ ) Cada estadio (BBCH11, 53, 65) está explicado en la Fig. 3.5.....101

**Cuadro 4.1.** Incremento en biomasa vegetativa (media  $\pm$ EE) total y por órganos ocurrido durante los tratamientos térmicos (T0 y T+). Se realizó un ANOVA factorial ( $n=4$ ) para cada temporada (2018, 2019) y variable con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) y la interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha = 0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $< 0,05$  (\*), p-valor  $< 0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes indican diferencias significativas.....129

**Cuadro 4.2.**- Número de hojas caídas, aparecidas e incremento porcentual durante el periodo de tratamiento en ambas temporadas (2018 y 2019), tratamientos térmicos (T0 y T+) y cultivares (Arb y Cor). Se realizó un ANOVA factorial ( $n=4$ ) con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) y la interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha = 0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $< 0,05$  (\*), p-valor  $< 0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes indican diferencias significativas.....129

**Cuadro 4.3.** Cociente (media  $\pm$ EE) entre la biomasa de frutos y la biomasa vegetativa (Frutos/BV) para ambos cultivares (Arb y Cor) al finalizar los tratamientos térmicos (T+ y T0) en cada temporada (2018 y 2019). Se realizó un ANOVA factorial ( $n=4$ ) para cada temporada y variable con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) y la interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha = 0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $< 0,05$  (\*), p-valor  $< 0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes indican diferencias significativas.....130

**Cuadro 5.1.** Variabilidad (%) como fracción del cuadrado medio total explicado por cultivar (C), localidad (L) y temporada (S) para cada uno de los estadios de Desarrollo del fruto en todo el conjunto de datos. Los estadios considerados fueron: fecha de inicio y fin del endurecimiento de carozo (ECini y ECfin), fecha en la que se alcanza la mitad o la totalidad

del peso seco del fruto (PSF50, PSF100) y la fecha en la que se alcanza la máxima concentración de aceite (AC100).....153

**Cuadro 5.2.** Estadios (día del año, DOY) de desarrollo del fruto: inicio (ECini) y fin (ECfin) de endurecimiento del carozo, momento en que se alcanza la mitad (PSF50) o la totalidad (PSF100) del peso seco máximo del fruto y momento en que se alcanza la máxima concentración de aceite en el fruto (AC100) para todas las localidades (L) y dos temporadas de crecimiento (S) en los dos cultivares más comunes evaluados (C; Arbequina y Picual), Se observaron cinco arboles (replicas) por cada combinación de C x L x S, Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ).....154

**Cuadro 5.3.** Estadios (día del año, DOY) de desarrollo del fruto para todas los cultivares (C), tres localidades (L) y dos temporadas de crecimiento (S), Se observaron cinco arboles (réplicas) por cada combinación de C x L x S, Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ). Los estadios están detallados en el Cuadro 5.3.....155

**Cuadro 5.4.** Variabilidad (%) como fracción del cuadrado medio total explicado por cultivar (C), localidad (L) y temporada (S) para los parámetros de las funciones ajustadas para crecimiento del fruto y acumulación de aceite en el fruto en todo el conjunto de datos. Las variables analizadas fueron: tasa de acumulación, duración de la acumulación y máximo acumulado de peso seco en el fruto (PSFtasa, PSFdur, PSFmax) y tasa de acumulación, duración de la acumulación y máxima concentración de aceite en el fruto (ACtasa, ACdur, ACmax).....157

**Cuadro 5.5.** – Parámetros de crecimiento del fruto (PSFtasa, PSFdur y PSFmax) y acumulación de aceite (ACtasa, ACdur, ACmax) para todas las localidades (L) y dos temporadas de crecimiento (S) en los dos cultivares más comunes evaluados (C; Arbequina y Picual), Se observaron cinco árboles (replicas) por cada combinación de C x L x S, Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ).....158

**Cuadro 5.6.** - Parámetros de crecimiento del fruto (PSFtasa, PSFdur y PSFmax) y acumulación de aceite (ACtasa, ACdur, ACmax) para tres localidades (L) y dos temporadas de crecimiento (S) en cinco cultivares (C; Arbequina, Arbosana, Changlot, Coratina y Picual), Se observaron cinco arboles (replicas) por cada combinación de C x L x S. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ).....159

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1.** - a) Temperatura media anual (°C) en la región andina argentina 1960-2010; b) Cambio de la temperatura media anual (°C) por la tendencia lineal para el mismo período, nivel de significancia en la barra derecha; serie anual de la temperatura media integrada en las provincias del Jujuy, Salta, Catamarca, La Rioja, San Juan y Mendoza. Tomado de Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2015).....35
- Figura 2.1.** - Se realizaron observaciones fenológicas en olivos en seis localidades de la principal región olivícola del oeste argentino. Las localidades fueron seleccionadas con el fin de obtener un gradiente latitudinal y altitudinal. El recuadro en blanco y negro de Argentina muestra el área de estudio dentro del cuadrado punteado.....55
- Figura 2.2.** - Representaciones y fotografías de los estadios fenológicos vegetativos (A, B) y reproductivos (C, D, E, F, G, H, I, J) observados. BBCH 11: primeras hojas completamente separadas, color gris verdoso (A, B). BBCH 53: Yemas reproductivas abiertas (comienza el desarrollo del racimo de inflorescencia) (C, D). BBCH 60: Primeras flores abiertas (E, F). BBCH 65: Plena floración (al menos el 50% de las flores abiertas) (G, H). BBCH 69: Fin de la floración, cuaje de frutos, caída de ovarios no fecundados (I, J). Las escalas están expresadas en centímetros (cm).....61
- Figura 2.3.** - Temperatura (°C) del aire máxima (A) y mínima (B) diaria media mensual desde abril de 2018 hasta junio de 2020 para las seis localidades argentinas evaluadas. Se colocó un sensor de temperatura por finca junto a uno de los árboles observados a 1,5 m de altura. Las temperaturas corregidas por diferencias estacionales entre hemisferios también se muestran durante la mayor parte de un período de 2 años en Andalucía y las Islas Canarias, España utilizando los datos disponibles de Medina-Alonso et al. (2020). Los períodos durante los cuales se realizaron observaciones fenológicas se muestran con el fondo sombreado.....63
- Figura 2.4.** - Fechas de los estadios fenológicos reproductivos (DOY, día del año) para siete cultivares (ARA: Arauco, ABQ: Arbequina, ABO: Arbosana, CHA: Changlot, COR: Coratina, MAN: Manzanilla Fina, PIC: Picual) en las seis localidades durante dos temporadas de cultivo (A, 2018-2019; B, 2019-2020). Los estadios (media ± EE) considerados en la escala BBCH fueron: 53 (apertura de yemas florales), 60 (inicio de floración), 65 (plena floración), 69 (fin de floración, cuajado).....70
- Figura 2.5.** -. Estadios fenológicos vegetativos (DOY, día del año) en comparación con apertura de yemas florales (BBCH 53) y plena floración (BBCH 65) para siete cultivares (ARA: Arauco, ABQ: Arbequina, ABO: Arbosana, CHA: Changlot, COR: Coratina, MAN: Manzanilla Fina, PIC: Picual) en las seis localidades durante dos temporadas de cultivo (A, 2018-2019; B, 2019-2020). Los estadios vegetativos BBCH (promedio ± EE) considerados

en la escala BBCH fueron: 11 (primer par de hojas completamente separadas) y 37 (70% de elongación del final del brote).....71

**Figura 2.6.** - Duración (días) de varios períodos fenológicos que incluyen (A) BBCH 53-60, (B) BBCH 60-69 y (C) BBCH 11-37 en función de la temperatura media diaria (°C) durante el mismo período. También se muestra (D) el porcentaje de la elongación final de los de los brotes vegetativos alcanzado en BBCH 65 frente a la temperatura media diaria promedio (°C) entre BBCH 11 y 65. Para este análisis se utilizaron los dos cultivares más comunes evaluados (Arbequina y Picual). Cada punto representa la media  $\pm$  EE de cinco árboles independientes.....73

**Figura 3.1.** - Vista parcial del campo experimental donde se observa una OTC T0 (control) y una OTC T+ (calentada) (A). Con flecha punteada se indica el ingreso de aire a temperatura ambiente por la parte trasera de la OTC T0, con flecha de guiones se indica el ingreso de aire calentado a través de un túnel de piedras negras recubierto por PVC a la parte delantera de la OTC T+, y con flecha llena el ingreso de aire a través de un calefactor eléctrico a la parte trasera de la OTC T+. En (B) se presenta una vista interior de una OTC T0 con 4 plantas en maceta las cuales fueron utilizadas para las observaciones descritas en este capítulo; ídem en (C) para una OTC T+.....89

**Figura 3.2** - Cortes de frutos mostrando el avance de la esclerificación del endocarpo y su relación con los grados de resistencia al corte. Los grados de dureza o resistencia al corte según la metodología de Presicce et al. (2015) son: 0- Sin resistencia al corte, 1-baja resistencia al corte, 2- alta resistencia al corte, 3- impedimento de corte con la cuchilla utilizada.....93

**Figura 3.3.** – Dinámica teórica del endurecimiento de carozo medida como presión requerida para el quiebre de carozo (PBP, por sus siglas en ingles) en función de los días a partir de plena floración (DAFB). Fuente: Rapoport et al. (2013).....94

**Figura 3.4.** – Temperatura media diaria (°C) en los meses previos y durante el período bajo tratamiento térmico, para el ambiente fuera de las OTCs (verde), el promedio para las OTCs calentadas T+ (rojo; n=8) y el promedio para las OTCs control T0 (azul; n=8). El área sombreada indica el período bajo tratamiento.....96

**Figura 3.5.** - Fecha de ocurrencia de estadios reproductivos (BBCH53, 57, 60, 65, 69, EC y PSF50) y vegetativos (BBCH11 y 37) para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (A, 2018-2019; B, 2019-2020). Las fechas están expresadas como día del año (DOY) siendo el día 1 de enero de cada año DOY=1. Estadios fenológicos definidos según la escala BBCH adaptada para olivo (Sanz-Cortés et al., 2002). BBCH 53: apertura de la yema floral, BBCH57: corola color verde, BBCH60: primeras flores abiertas, BBCH65: plena floración, la mitad de las flores abiertas, BBCH69: fin de floración, cuaje de frutos, EC: endurecimiento de carozo y PSF50: frutos con la mitad de su peso seco final, BBCH11: primer par de hojas completamente separadas

y BBCH 37: los brotes vegetativos alcanzan un 70% de su largo final. Se presentan los valores medios  $\pm$  EE (n=4).....98

**Figura 3.6.** - Duración (días) de las fases fenológicas de desarrollo de la inflorescencia (A, B; BBCH 53-60) y floración (C, D; BBCH 60-69) para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (2018-2019 y 2019-2020). Hubo cuatro repeticiones para cada combinación de cultivar x tratamiento térmico x temporada. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando LSD-Fischer ( $p < 0,05$ ). Cada estadio (BBCH 53,60,69) está explicado en la Fig. 3.5.....102

**Figura 3.7.**- Duración (días) de las fases fenológicas de desarrollo del fruto entre final de la floración y endurecimiento de carozo (A, BBCH69-EC) y endurecimiento de carozo – mitad del peso seco del fruto (B, EC-PSF50) para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (2018-2019 y 2019-2020). Hubo cuatro repeticiones para cada combinación de cultivar x tratamiento térmico x temporada. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando LSD-Fischer ( $p < 0,05$ ). Cada estadio (BBCH 69, EC, PSF50) está explicado en la Fig. 3.5.....102

**Figura 4.1.** – Vista de las plantas introducidas en la OTC en un tratamiento control en la temporada 2018 (planta de dos años) (A) y a un tratamiento calentado en la temporada 2019 (planta de tres años).....117

**Figura 4.2.**- Medición de diámetro de tronco con calibre (A) y de elongación apical con regla (B) sobre ramas marcadas en el inicio de los tratamientos (C) y cerca del final de los mismos en el mes de noviembre (D).....118

**Figura 4.3.** - Frutos normales y partenocarpicos de cv. Coratina control (T0) y calentados (T+) cosechados al final del tratamiento en la temporada 2019.....120

**Figura 4.4.** - Temperatura semanal (media) durante el período de tratamientos térmicos en cámaras de techo abierto (OTC) en tratamiento control (T0), tratamiento calentado mediante un sistema pasivo y activo complementario (T+) y en el ambiente exterior a las OTCs (Amb).....122

**Figura 4.5.** - Intensidad de floración (Inflorescencias yema<sup>-1</sup>) (media  $\pm$  EE) según cultivar (Arbequina, Coratina) y tratamiento térmico T0 (azul) o T+ (rojo). Se realizó un ANOVA factorial (n=4), por temporada de crecimiento (2018, 2019), con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) e interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha = 0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $< 0,05$  (\*), p-valor  $< 0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes dentro de una misma temporada indican diferencias significativas.....123

**Figura 4.6.** - Proporción de frutos cuajados (media  $\pm$  EE) en la temporada 2019 para ambos tratamientos térmicos (T0 y T+) y cultivares (Arb y Cor). Se realizó un ANOVA factorial (n=4) con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) y la interacción temp x cult (int)

y nivel de significación  $\alpha = 0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $< 0,05$  (\*), p-valor  $< 0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes indican diferencias significativas.....124

**Figura 4.7.** - Elongación de ramas (media  $\pm$  EE) sin inflorescencias ni brotes axilares (A, B) e incremento en el área seccional del tronco (media  $\pm$  EE) (C, D). Las medidas se tomaron durante la permanencia de las plantas en las OTC para ambos tratamientos térmicos (T+ y T0), en los dos cultivares: Arbequina (Arb) y Coratina (Cor) durante las dos temporadas de tratamiento, 2018 y 2019. Se analizó estadísticamente mediante un ANOVA de medidas repetidas en el tiempo (n=4), para fechas con diferencias significativas entre tratamientos se realizó un post-test según el método de Bonferroni, letras diferentes indican diferencias significativas (p<0,05).....126

**Figura 4.8.** - Número de frutos normales (barras llenas) y partenocárpicos (barras rayadas) (A, B), peso fruto individual (C, D) y peso total de frutos normales y partenocárpicos por planta (E, F) (media  $\pm$  EE) por cultivar (Arbequina, Coratina) y tratamiento térmico T0 (azul) o T+ (rojo). Se realizó un ANOVA factorial (n=4), por temporada de crecimiento (2018, 2019), con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) e interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha = 0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $< 0,05$  (\*), p-valor  $< 0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes dentro de una misma temporada indican diferencias significativas.....128

**Figura 5.1.** - Evolución del peso seco del fruto (A) y concentración de aceite en el fruto (B) en cv. Arbequina en función de los días del año (DOY, a partir del 1 de enero de 2018) para la temporada 2018-2019 en seis localidades del oeste argentino (La Rioja, Chilecito, Huaco, Cañada Honda, Beltrán y Rivadavia). Los puntos representan el valor promedio de cuatro plantas (n = 5). A partir de los parámetros ajustados en estas funciones para cada repetición se obtuvieron las tasas (PSFtasa, ACtasa), duraciones (PSFdur, ACdur) y máximo de peso seco del fruto (PSFmax) y máxima concentración de aceite (ACmax) utilizados en los análisis estadísticos.....147

**Figura 5.2.-** Temperatura ( $^{\circ}$ C) máxima (A, B) y mínima (C, D) diaria media mensual en los meses de noviembre a mayo, temporadas 2018-2019 (A, C) y 2019-2020 (B, D) para las seis localidades evaluadas. Se colocó un sensor de temperatura por finca junto a uno de los árboles observados a 1,5 m de altura sobre el suelo.....151

**Figura 5.3.-** Tasa de acumulación de peso seco en el fruto (A) y acumulación de aceite (B) en función de su respectiva duración en dos cvs. de olivo ('Arbequina' y 'Picual') en todas las localidades y ambas temporadas evaluadas.....159

## ABREVIATURAS

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
ABO	cv. Arbosana
AC100	Fecha en que se alcanza el plateau para la acumulación de aceite en el fruto
ACdur	Duración de la fase lineal de acumulación de aceite en el fruto
ACmax	Máxima concentración de aceite en el fruto (%)
ACtasa	Tasa de acumulación de aceite en el fruto (%/día)
Amb	Ambiente exterior a las OTCs
ARA	cv. Arauco
ARB	cv. Arbequina
BBCH11	Estadio fenológico de separación de las primeras hojas en el brote
BBCH37	Estadio fenológico correspondiente al 70% de elongación del brote
BBCH53	Estadio fenológico de apertura de la yema floral
BBCH57	Estadio fenológico inflorescencia con corolas verdes
BBCH60	Estadio fenológico de primera flor abierta
BBCH65	Estadio fenológico de plena floración, 50% de flores abiertas
BBCH69	Estadio fenológico de fin de floración, corola color marrón y cuaje del fruto
C	Cultivar
°Cd	Grado centígrado día
CHA	cv. Changlot
COR	cv. Coratina
CP	Chilling Portions (Porciones de frío)
CU	Chilling Units / Unidades de frío
cv	Cultivar
EC	Endurecimiento de carozo
ECfin	Fin del endurecimiento de carozo
ECini	Inicio del endurecimiento de carozo
int	Interacción localidad x cultivar
L	Localidad
MAN	cv. Manzanilla
PIC	Picual
PSF100	Fecha en que se alcanza el máximo peso seco del fruto
PSF50	Fecha en que se alcanza la mitad del peso seco del fruto
PSFdur	Duración de la fase lineal crecimiento en peso seco del fruto
PSFmax	Máximo peso seco del fruto
PSFtasa	Tasa de crecimiento en peso seco del fruto
S	Temporada
T+	Tratamiento calentado en OTCs
T0	Tratamiento control en OTCs
temp	Tratamiento de temperatura



**Resumen**  
**Respuesta de la fenología, crecimiento y desarrollo del olivo (*Olea europaea* L.)  
a la temperatura primaveral**

Cambios en el comportamiento del cultivo de olivo ocurrirán posiblemente en nuevas regiones productoras y ante el incremento de la temperatura debido al cambio climático. La temperatura de primavera determina la salida del reposo invernal, con potenciales consecuencias en el resto del ciclo. El objetivo general de esta tesis es caracterizar la respuesta en el desarrollo y el crecimiento vegetativo y reproductivo del olivo en diferentes ambientes térmicos, con énfasis en la temperatura de primavera. Esto se abordó mediante dos metodologías complementarias: un experimento a campo con observación de varios cultivares en varias localidades con temperaturas contrastantes debido a un gradiente latitudinal y rango de altitudes y un experimento manipulativo a campo, incrementando la temperatura ambiente de plantas jóvenes enteras mediante cámaras de techo abierto. En general la fenología reproductiva se adelantó en ambientes con altas temperaturas, desde los estadios tempranos y hasta endurecimiento de carozo, mientras que la fecha de final de síntesis del aceite no se asoció al gradiente de temperatura. El porcentaje de cuaje tuvo una respuesta diferencial entre cultivares, con caídas ante el aumento de temperatura en uno de los dos cultivares evaluados. La tasa de acumulación de aceite y por ende su concentración final se redujo en ambientes más cálidos. Las interacciones genotipo x ambiente observadas brindan oportunidad para la evaluación y selección de cultivares adaptados a altas temperaturas de primavera. Tanto el desarrollo como el crecimiento vegetativo tuvieron una escasa respuesta a la temperatura, requiriendo futuras evaluaciones de la respuesta a otros factores ambientales.

Palabras clave: ciclo de cultivo, inflorescencia, floración, cuaje, peso del fruto, biomasa, aceite

## **Abstract**

### **Response of the phenology, growth and development of the olive tree (*Olea europaea* L.) to spring temperature**

Changes in olive crop behavior may occur in new productive regions or due to climate change related temperature increase. Spring temperature determines the end of winter dormancy, with potential consequences for the rest of the crop cycle. Therefore, the general objective of this thesis is to characterize the response of the vegetative and reproductive development and growth of olive trees in different thermal environments, with an emphasis on spring temperature. This was addressed through two complementary methodologies: a field experiment involving observations of various cultivars in different locations with contrasting temperatures due to a latitude gradient and range of altitudes, and a manipulative field experiment, increasing the ambient temperature of young plants using open-top chambers. In general, reproductive phenology showed earlier development in high-temperature environments, from early stages to pit hardening, while the final oil synthesis date was not associated with the temperature gradient. The fruit set percentage exhibited a differential response among cultivars, with declines in response to increased temperature in one of the two evaluated cultivars. The oil accumulation rate and hence its final concentration decreased in warmer environments. The genotype x environment interactions observed provide an opportunity for the evaluation and selection of cultivars adapted to high spring temperatures. On the other hand, both vegetative development and growth had a limited response to temperature, requiring future evaluations of the response to other environmental factors.

Key words: crop cycle, inflorescence, flowering, fruit set, fruit weight, biomass, oil.

# **CAPITULO I**

## **Introducción general**

## **1.1 El cambio climático y sus posibles impactos sobre los cultivos frutales**

### **1.1.1 Aspectos generales del cambio climático**

De acuerdo a los últimos informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático el calentamiento del sistema climático global debido a causas antrópicas es inequívoco (IPCC, 2014, Arias et al., 2021). Desde el inicio de la era industrial las actividades humanas se asociaron a cambios importantes en los ciclos biogeoquímicos terrestres. Quizás el más destacado es el aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera, el cual fue de un 38% a partir de los niveles pre-industriales. Simultáneamente la temperatura media global aumentó entre 0,95°C y 1,20°C (IPCC, 2023). Aunque los doce meses comprendidos entre agosto 2022 y julio 2023 presentaron una anomalía de 1,30°C sobre los niveles en el periodo 1850-1900 (C3S, 2023). El incremento en la frecuencia de eventos extremos térmicos, de precipitaciones, sequía y ciclones tropicales son otras de las consecuencias bien documentadas del cambio climático. Variaciones de esta magnitud no tienen precedentes en siglos o incluso milenios según indican las evidencias paleoclimáticas (Arias et al, 2021) y tienen un impacto hasta ahora poco conocido sobre todos los seres vivos (Root et al., 2003). Estos cambios biogeoquímicos, climáticos y ecológicos en conjunto determinan el fenómeno más amplio conocido como Cambio Global.

El efecto de cambio climático sobre los agroecosistemas se intensificará en los próximos años según las proyecciones vigentes e impondrá nuevos desafíos a los agricultores, técnicos y profesionales de las ciencias agrarias. Por esto, es urgente avanzar en el conocimiento acerca de la forma en que los cultivos responden a las principales variables que se verán afectadas en el contexto del cambio climático. Esto servirá de base al desarrollo de estrategias agronómicas de adaptación a las nuevas condiciones (ej. selección de

cultivares, zonificaciones agrícolas, tecnologías de manejo del microclima, diseño de los cultivos) que permitan mitigar las caídas en los rendimientos en las principales regiones productoras de alimentos.

### **1.1.2 Efectos del cambio climático sobre los cultivos**

La mayoría de variables asociadas al cambio climático, así como sus interacciones acarrearán efectos sobre la morfología, fisiología y ecología de los cultivos (Hughes, 2000). El incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico ha demostrado tener un considerable efecto de fertilización que incrementa la productividad primaria (Ainsworth y Long, 2021, Leakey et al., 2009). En frutales templados el incremento de CO<sub>2</sub> parece afectar además la composición de los frutos (ej. contenido de sólidos solubles) (Han et al., 2012, Xi et al., 2014). Asociado al cambio climático se da también un incremento del ozono (O<sub>3</sub>) a niveles bajos de la atmósfera el cual tiene efectos negativos bien documentados sobre las plantas, reduciendo la fotosíntesis y perjudicando diversos procesos fisiológicos debido a su alto poder oxidativo (Porter et al., 2014). El incremento en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos (ej, sequías, olas de calor), tendrá con una alta probabilidad, impactos importantes sobre los cultivos, aunque sus efectos son más difíciles de cuantificar (Thornton et al., 2014).

El incremento de la temperatura ambiental impacta de diversas formas sobre los cultivos: causando estrés térmico (Jagandish et al., 2021), intensificando situaciones de estrés hídrico, produciendo cambios en la viabilidad del polen y por ende del cuaje, modificando la salida del reposo invernal, generando adelantos o retrasos en la fenología así como cambios en la tasa de crecimiento de los órganos vegetativos o reproductivos y en la calidad de los órganos cosechados (Rosenzweig et al., 2007).

### **1.1.3 El estudio de la fenología en ciencias agrarias**

La fenología se ocupa del estudio de la sincronización entre los ciclos de desarrollo de los seres vivos con las condiciones meteorológicas y el clima. Para estos estudios se observan estadios morfológicos externos definidos los cuales determinan el inicio y el fin de los períodos de desarrollo. El desarrollo vegetal se define como el conjunto de eventos que contribuyen a la progresiva elaboración del cuerpo de la planta y la capacitan para producir carbohidratos, reproducirse y adaptarse plenamente a su ambiente. Estos eventos comprenden los procesos básicos de diferenciación de órganos y crecimiento (Segura, 2008). Si bien la fenología está centrada en la observación de los estadios de desarrollo asociados a la diferenciación (cambios cualitativos y funcionales en los diferentes órganos), algunos de los estadios descritos en las escalas fenológicas incluyen la observación de eventos relacionados al crecimiento, es decir al aumento en el número y/o tamaño de células en un órgano (ej., elongación de hojas y de las ramas). Esto se da principalmente en los estadios vegetativos.

La observación y el estudio de la fenología de las plantas fueron utilizados a lo largo de la historia en relación a las actividades humanas. En cuanto a las actividades agrícolas tiene una gran importancia para la planificación de rotaciones y prácticas de manejo (riego, poda, fertilización y protección), selección de cultivares adaptados, determinación de riesgos de heladas o pronóstico de cosechas. En Europa existen redes de observación fenológica que sistematizan datos de distintos sitios y especies; las más antiguas han tomado observaciones por más de 60 años. La disponibilidad de series largas de datos facilita el ajuste de modelos que permiten predecir la fecha de ocurrencia de los distintos estadios a partir de variables meteorológicas (Chmielewsky, 2013). Estos modelos también pueden construirse a partir de un abordaje experimental, utilizando ensayos que permitan determinar y cuantificar los

mecanismos que subyacen a las respuestas fenológicas (Chuine et al., 2013). En los últimos años, los estudios fenológicos han recibido un renovado interés debido a su utilidad como indicadores de los efectos del cambio climático en los ecosistemas naturales y los sistemas de producción agrícola.

#### **1.1.4 Impacto del calentamiento global sobre la fenología de las plantas**

La fenología vegetal está influida por distintitos factores ambientales (temperatura, fotoperíodo, disponibilidad hídrica y de nutrientes) variando su importancia de acuerdo con la especie (Fu et al., 2020). Incluso factores como la productividad en la temporada previa (Gu et al., 2022) y la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférica (Jach et al., 2001) parecen tener efectos sobre la fenología de algunas especies forestales. Sin embargo, la temperatura es el factor de mayor impacto sobre la fecha de ocurrencia de los estadios de desarrollo (Schwartz 1999; Cleland et al., 2007; Pope et al., 2014; Donnelly y Yu 2017). A su vez, los cambios en la fenología primaveral de algunas especies y en la duración de la estación de crecimiento han sido propuestas como indicadores del cambio climático (Menzel, 2014).

A lo largo de las últimas décadas se ha observado en general un adelanto de los estadios fenológicos primaverales y estivales tanto reproductivos (e.g. brotación reproductiva, floración, cuaje de frutos) como vegetativos (e.g brotación vegetativa) (Menzel, 2014; Fátima et al., 2020) el cual está asociado con un aumento en la temperatura ambiental, y tiene altas correlaciones con la temperatura de los meses de primavera (Walther et al., 2002). Estas respuestas son más marcadas en latitudes altas (Post et al., 2018). La fecha de ocurrencia de un estadio fenológico determina la duración y las condiciones ambientales que explorará la planta en los estadios subsiguientes. En el caso de los estadios reproductivos, dichas condiciones inciden a su vez en el rendimiento y la calidad del fruto (Rodrigo y

Herrero, 2002; Eccel et al., 2009). Para los estadios vegetativos, la fecha en que se inicia la brotación en una temporada en particular probablemente tendrá consecuencias sobre la duración de la estación de crecimiento y sobre la producción anual de biomasa.

La relación entre el incremento de temperatura debido al calentamiento global y la fecha de ocurrencia los estadios fenológicos otoñales, por ejemplo, el inicio de la senescencia en árboles caducos, está mucho menos estudiado (Walther et al., 2002). El cambio en las relaciones entre las fechas de inicio y fin de los distintos periodos de desarrollo ha demostrado producir alargamientos o acortamientos en la mismas (Fátima et al., 2020). Esta última respuesta genera un periodo de producción de biomasa más corto y una reducción en los rendimientos.

### **1.1.5 Influencia del calentamiento global sobre la fenología de árboles frutales**

La fenología reproductiva primaveral de los frutales templados responde a la temperatura, según los modelos más difundidos en la actualidad, a través de dos vías: durante el invierno cierta acumulación de frío es necesaria para la ruptura de la endodormición en las yemas florales; luego la exposición a temperaturas forzantes durante la primavera permite la salida de la ecodormición y es necesaria para que ocurra la brotación reproductiva (Richardson et al, 1974). Un incremento de las temperaturas de fines del invierno y en la primavera tiene consecuencias sobre la intensidad de floración (escasas acumulaciones de frío dan lugar a floraciones anormales) y sobre su fecha de ocurrencia. Este aumento de temperatura podría actuar adelantando o retrasando la fecha de floración según el momento en el que se produzca. Es decir, altas temperaturas ocurridas durante la endodormición atrasarían la floración mientras que durante la ecodormición la adelantarían (Chuine 2000; Guo et al., 2013). En series largas de tiempo en las cuales se produce un incremento en la

temperatura, la fenología tiende a adelantarse y este adelanto correlaciona bien con la temperatura media de los meses de primavera (Chmielewski et al., 2004, El Yaacoubi et al., 2014, Guédon et al., 2018, Legave et al., 2009). En almendro, evidencias indican que los incrementos proyectados de temperatura en los próximos años durante la endodormición podrían ser las consecuencias más severas para el rendimiento, ya que adelantaría la floración exponiéndola a posibles heladas tardías, a su vez que altas temperaturas en estos estadios pueden tener consecuencias negativas durante la fecundación y el cuaje de frutos (Freitas et al., 2023). Evidencias en durazno sugieren que conforme el calentamiento global progrese, el impacto de la temperatura sobre la acumulación de frío invernal será mayor enmascarando o revirtiendo el efecto sobre el forzado primaveral (Guo et al., 2015; Legave et al., 2015). Estudios recientes indican que los inviernos cálidos podrían comprometer la producción de frutales templados en algunas zonas actuales de cultivo en Sudamérica (Fernández et al., 2021).

Por otro lado, el adelanto o atraso de un estadio fenológico determinado, tiene consecuencias sobre las condiciones que explorarán los estadios sucesivos. En vid, un adelanto en la floración condujo a la exposición del crecimiento del fruto a temperaturas más frescas; con lo cual un aumento de la temperatura de primavera tuvo efectos no lineales sobre la posterior acumulación de azúcares en el fruto (Sadras y Moran et al., 2013).

Comprender la respuesta en la fenología de las diferentes especies ante el cambio climático es de importancia no solo para planificar las tareas asociadas a los cultivos sino también para determinar acertadamente las áreas propicias para cada cultivo o material genético. Por ejemplo, en almendro se ha analizado las limitantes que tendrá en zonas donde están disminuyendo las horas de frío invernal y las posibilidades de expansión del cultivo

hacia áreas más polares debido a la reducción en la probabilidad de heladas durante la floración (Di Lena et al., 2017). Por otro lado, conocer los cambios específicos en el ciclo fenológico de las especies vegetales en relación a los cambios ambientales permitirá prever los efectos ecológicos que traen aparejados.

### **1.1.6 Influencia del calentamiento global sobre el crecimiento en de las plantas**

A nivel global cambios en la duración de la estación de crecimiento (número de días) y en la tasa de crecimiento de las plantas han sido observados en el contexto del calentamiento global. Evidencias indican un alargamiento de la estación de crecimiento debido a una brotación vegetativa más temprana y condiciones térmicas favorables para el crecimiento hasta más entrada la estación fría (Linderholme, 2016). Como consecuencia de este cambio se da un incremento en la producción neta de biomasa (Piao et al., 2007).

Por otra parte, algunos estudios sugieren una mayor importancia de la tasa de crecimiento en relación al largo de la estación en cuanto a la acumulación de biomasa (Ren et al., 2019). En las plantas, la tasa de crecimiento depende de las temperaturas cardinales para cada especie (Hatfield y Prueger, 2015). Por esto, el efecto de un incremento de temperatura sobre el crecimiento (medido, por ejemplo, como acumulación de biomasa o diámetro del tronco) en un determinado ambiente tendrá diferente signo y magnitud de acuerdo a la especie. Experimentos multifactoriales en pastizales indican que el incremento de la temperatura tiene un efecto negativo sobre el crecimiento en biomasa aérea y de raíces que contrarresta en parte el incremento en el crecimiento derivado de aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico (De Boeck et al., 2008). Registros dendrocronológicos de distintas especies leñosas silvestres en zonas templadas del hemisferio norte indican que la tasa de correlación entre el incremento de temperatura ambiental y el crecimiento disminuyó

en el periodo posterior a 1950 respecto de la primera parte del siglo. Una hipótesis que explica este cambio es que en dicho periodo las temperaturas primaverales superaron los óptimos promedio de crecimiento para las especies involucradas (D'Arrigo et al., 2004). Por otro lado, temperaturas ambientales mayores parecen favorecer la acumulación de biomasa en hojas en detrimento de las raíces (Way and Oren, 2010). En regiones cálidas, distintas especies han mostrado una correlación negativa entre su crecimiento y las temperaturas mínimas (Clark et al., 2010, Feeley et al., 2007). Además, los árboles de hoja caduca parecen tener una respuesta en crecimiento más marcada ante los cambios de temperatura que aquellos de hoja perenne (Way and Oren, 2010).

En árboles frutales, incrementos de la temperatura ambiente parecen tener correlación positiva con la tasa de elongación de tallos incluso a temperaturas cercanas a 35°C, como por ejemplo en durazno (*Prunus persica* L.) (Berman y De Jong, 1997). En manzano (*Malus domestica* L.) un aumento de 5°C en un experimento a campo en Corea determinó aumentos significativos en el diámetro de copa, altura del árbol, elongación y número de ramas (Ro et al., 2001). En este experimento además la temperatura mostró una interacción positiva con el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub>, aumentando el efecto promotor del crecimiento.

### **1.1.7 Efectos del calentamiento global observados en cultivos de olivo**

De modo similar a otros frutales templados, el incremento de la temperatura media a lo largo de las últimas décadas ha demostrado producir un adelanto en la floración del olivo en las regiones tradicionales de cultivo (Pérez-López et al., 2008, Aguilera et al., 2013). Estos cambios a su vez podrían producir asincronías entre cultivares con consecuencias sobre la polinización cruzada (Vuletin Selak et al., 2014a) y por lo tanto en el cuaje de los frutos. La germinación del polen y la elongación del tubo polínico en olivo han demostrado afectarse

tanto a temperaturas inferiores a 20°C como superiores a 30°C según estudios realizados *in-vitro* (Dias et al., 2022). En condiciones *in-vivo* en una serie larga de años se observó también que temperaturas en torno a los 26-27°C tienen efectos negativos sobre el proceso de fertilización disminuyendo en consecuencia la carga frutal (Bartolini y Viti, 2018). En condiciones experimentales se observó que un incremento de 4°C en la temperatura del aire en la región del mediterráneo aumentó el crecimiento vegetativo, acortó y adelantó la maduración del fruto y redujo la relación pulpa/carozo, el tamaño del fruto, el rendimiento y el contenido de aceite (Benlloch-González et al., 2019). En La Rioja, Argentina, un trabajo previo también indica que un aumento de temperatura durante la acumulación de aceite afecta negativamente el rendimiento y positivamente la generación de área foliar (Miserere et al., 2022).

Las respuestas en los distintos procesos de generación del rendimiento al incremento de temperatura no son homogéneas entre distintos cultivares. Dado que los programas de mejoramiento en olivo necesitan de varias décadas es importante la evaluación de cultivares actuales a fin de establecer cuáles son los de mejor comportamiento a las altas temperaturas en cada uno de los procesos (Ben-Ari et al., 2021). De acuerdo a nuestro conocimiento, no se han realizado hasta el momento trabajos que integren los datos de experimentos en condiciones controladas con datos de campo, en árboles grandes en producción. En este sentido, nuestro trabajo abordará el impacto de un aumento de la temperatura sobre el olivo desde dos métodos experimentales incluyendo el análisis de una variedad importante de genotipos.

Modelos fisiológicos recientes permiten hacer proyecciones a partir de la integración de la información disponible hasta el momento. ‘OliveCan’ simula el balance de carbono y

agua en fincas de olivo (Morales et al., 2016; López-Bernal et al., 2018) e indica que un aumento en la temperatura bajará los rendimientos de olivo en el sur de España (Morales et al., 2016). Sin embargo, se destaca la necesidad de profundizar la investigación respecto al inicio de la brotación vegetativa, dinámica de acumulación de aceite en el fruto, y caracterización de la variabilidad genética en cuanto a cada uno de los parámetros. Por otro lado, el modelo AdaptaOlive desarrollado para un cultivo tradicional en Baeza, comunidad de Andalucía, España, predice una disminución en la transpiración del cultivo y un adelanto en la fecha de floración en escenarios climáticos de aumento de temperatura, esto sumado a una reducción en la precipitación aumentará el nivel de estrés hídrico en floración y causará caídas en los rendimientos aunque de escasa magnitud, además los requerimientos hídricos tendrán también poca variación (Lorite et al., 2018). En el mismo trabajo se destaca la gran variabilidad espacial que presenta la respuesta del olivo al cambio climático aun dentro de la misma región de Andalucía lo cual evidencia la necesidad de realizar estudios particulares en otras regiones productivas. En este mismo sentido, Ponti et al. (2014) indican que los efectos de calentamiento sobre el rendimiento pueden ser positivos o negativos, dependiendo de las temperaturas ambientales de cada región.

Por último, se considera que la fecha de floración es una variable clave para el rendimiento el cultivo y para sus necesidades de riego; y que la fenología en general – en particular la vegetativa- ha sido poco considerada en estudios que determinen el impacto del cambio climático sobre el crecimiento y desarrollo en olivo a pesar de su importancia.

## **1.2 El cultivo del olivo en el oeste argentino**

### **1.2.1 Historia**

El olivo es actualmente un cultivo de gran importancia económica para muchas regiones productivas distribuidas en todos los continentes. La especie tiene una larga historia de domesticación que se inicia entre 2800-4500 AP y continúa hasta el presente (Besnard et al., 2018). Prácticamente toda la historia de domesticación tuvo lugar en su zona de origen – la Cuenca Mediterránea - caracterizada por un clima de veranos secos y calurosos e inviernos húmedos (Civantos, 1997). En el siglo XVI el cultivo se expandió hacia numerosas regiones del mundo con condiciones ambientales muy diferentes a las mediterráneas. En la Argentina se difundió en las regiones de Cuyo y el NOA, incluyendo las provincias San Juan, Mendoza, Catamarca y La Rioja. Sin embargo, no fue hasta fines del siglo XIX que el volumen de producción en la Argentina aumentó para satisfacer la demanda de la corriente inmigratoria europea (Gómez del Campo et al., 2010) y recién hacia 1990 se dio una fuerte expansión del área plantada alcanzando una superficie de 105.000 ha con la implantación de grandes fincas comerciales de grandes superficies (100 a 1000 ha). En estas nuevas fincas se utilizaron cultivares mayormente destinados a la producción de aceite, bien conocidos en el Mediterráneo (e.g. Arbequina, Manzanilla, Picual, y Frantoio) cuyo comportamiento en las condiciones agroclimáticas del oeste argentino era poco conocido, los cuales en algunos casos presentaron dificultades en su productividad, calidad de aceite e incluso capacidad para florecer hacia el norte de la región (Aybar et al., 2015; Rondanini et al., 2011). El cultivar Arauco reconocido como originario de Argentina (IOOC, 2000) continuó cultivándose casi exclusivamente en las antiguas fincas tradicionales con destino a aceituna de mesa.

Actualmente el olivo es la segunda especie frutal más plantada en el país luego de la vid (Cámara Olivícola de San Juan, 2018). Específicamente en las provincias cálidas de La Rioja y Catamarca, el olivo es el cultivo que involucra mayor superficie, mano de obra tanto

en la actividad primaria y secundaria (producción de aceituna de mesa o aceite de oliva) y genera más ingresos. Argentina es además el principal productor fuera de la cuenca mediterránea y destina su producción principalmente a la exportación hacia el Estados Unidos, España, Canadá y el resto de América Latina; dentro del país La Rioja es la provincia con mayor volumen de exportación tanto de aceituna de mesa como de aceite (Cámara Olivícola de San Juan, 2018). En los últimos años se han establecido producciones con mayor nivel de intensificación (aumento de la densidad de plantación y mecanización) especialmente en las provincias de Mendoza y San Juan. Sin embargo, la productividad muestra una caída relacionada con varios factores estructurales y coyunturales; entre ellos la incidencia de enfermedades y plagas de difícil control, la escasez de mano de obra para las tareas de cosecha, estándares de calidad insuficiente, bajos precios internacionales y altos costos de la energía necesaria para el riego (Carciofi et al., 2022)

A nivel mundial el aceite de oliva es crecientemente valorado por su alta calidad química y organoléptica. El Consejo Oleícola Internacional define criterios de clasificación y pureza altamente dependientes de las condiciones ambientales en las cuales crece el fruto (Ceci y Carelli, 2007). Entre ellos se destaca la composición de ácidos grasos, una alta proporción de monoinsaturados (ácido oleico) hacen del aceite un producto relativamente estable a la oxidación y saludable para su consumo. También es de importancia la composición esterólica (IOOC, 2016) como “huella digital” que permite distinguir un aceite de oliva puro respecto de uno adulterado (Gutiérrez et al., 2000).

### **1.2.2 Características climáticas**

Las principales regiones de cultivo de olivo actuales en la Argentina van aproximadamente desde los 28°S hasta los 34°S, en diferentes altitudes (500 – 1400 msnm),

abarcando una serie de climas templados con variaciones en las temperaturas medias de acuerdo a la latitud (mayores temperaturas a bajas latitudes) y la altura. En cuanto a las precipitaciones se trata de climas áridos y semiáridos con precipitaciones (100-300 mm anuales) concentradas fuertemente en el verano. Las temperaturas ambientales medias de la región norte de cultivo (NOA) son mayores que las del Mediterráneo donde el olivo fue cultivado tradicionalmente (Searles et al., 2011; Torres et al, 2017). El clima de la región es continental con grandes amplitudes térmicas (Murphy et al., 2008). A diferencia de muchas zonas del Mediterráneo, la irrigación es indispensable para el cultivo de olivo en el oeste argentino. Además, se dan otros fenómenos climáticos no experimentados en la zona de origen, como la ocurrencia de vientos cálidos y secos (viento zonda) que determinan incrementos rápidos de la temperatura y el déficit de presión de vapor principalmente entre finales del invierno e inicios de la primavera (Caretta et al., 2004) los cuales pueden causar daños en la época de floración.

En el contexto del cambio climático en el centro y noroeste argentino la temperatura media aumentó alrededor de 0,6 °C en el último siglo. Este aumento fue mayor durante los meses de primavera (0,9°C) y en la zona norte de la región. (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015). A esto se suma un incremento proyectado de 2°C entre 2015-2039 y de 2-7°C entre 2075-2099 dependiendo del escenario de emisiones de gases de efecto invernadero (Cabré y Nuñez, 2020).

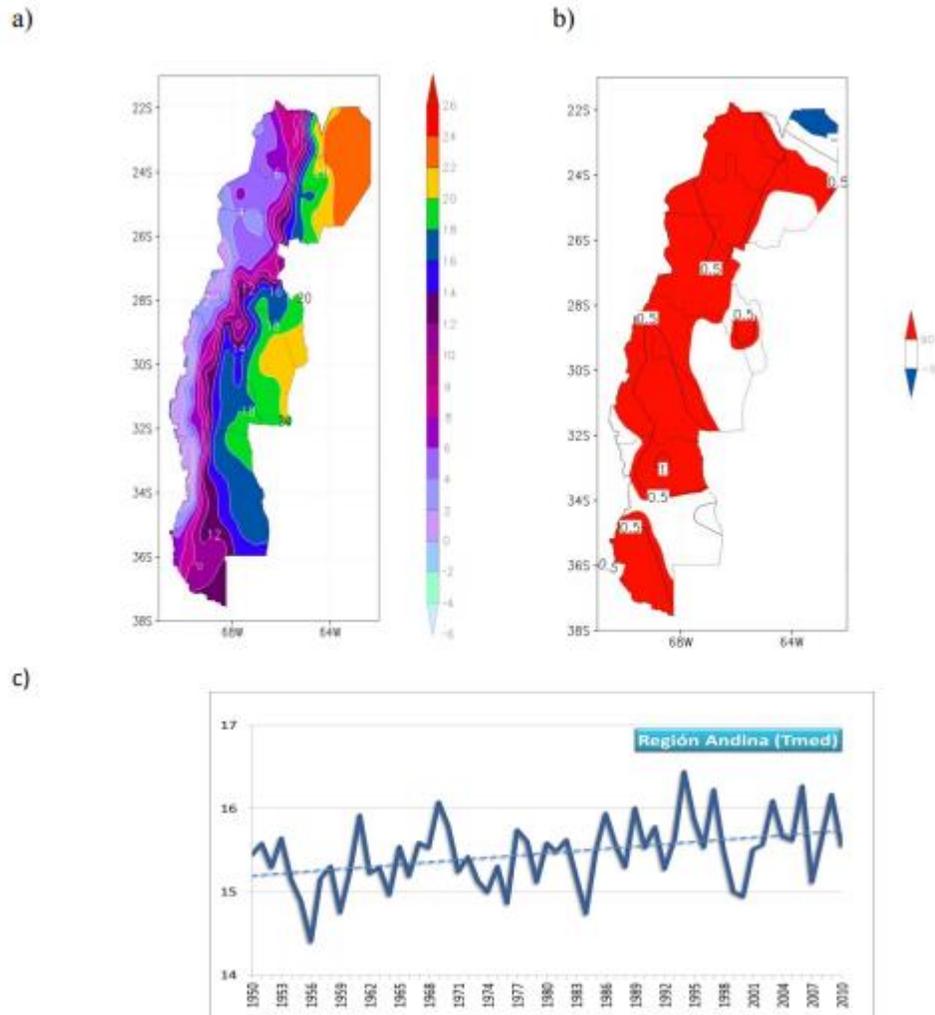


Figura 1.1 - a) Temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la región andina argentina 1960-2010; b) Cambio de la temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) por la tendencia lineal para el mismo periodo, nivel de significancia en la barra derecha; serie anual de la temperatura media integrada en las provincias del Jujuy, Salta, Catamarca, La Rioja, San Juan y Mendoza. Tomado de Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2015)

### 1.2.3 Comportamiento del olivo en ambientes del Oeste de Argentina

Las particularidades climáticas mencionadas y la importancia económica del olivo en el oeste argentino motivó diversos estudios a fin de avanzar en el conocimiento del comportamiento del cultivo en dichas condiciones agroecológicas (Torres et al., 2017). Asociados a estas características climáticas se observaron problemas productivos como una cierta frecuencia de floraciones anormales (de baja intensidad) en la zona del Valle Central

de Catamarca (Aybar et al., 2015) probablemente debido a la corta extensión del periodo de acumulación de frío o la frecuencia de temperaturas altas durante dicho período (Ayerza y Sibett, 2001). Además, relativamente bajos contenidos de aceite en el fruto y porcentajes reducidos de ácido oleico en el aceite obtenido en la región se asociaron también a las altas temperaturas durante el desarrollo del fruto (Rondanini et al, 2011, García-Inza et al., 2014) debido a un efecto regulatorio de la temperatura sobre los genes OeSAD2 y OeSAD2-2 los cuales codifican enzimas claves en la cadena de síntesis del ácido oleico (Contreras et al., 2023). En muchas zonas de la región olivícola argentina se observan importantes crecimientos vegetativos los cuales determinan necesidades de podas intensas. Una hipótesis inicial es que las temperaturas ambientales determinan una mayor tasa de crecimiento que en el Mediterráneo, sin embargo, investigaciones específicas al respecto aún no han sido realizadas.

De acuerdo a las proyecciones de calentamiento global, consideramos que algunos de estos problemas en la producción pueden intensificarse y extenderse a la zona sur de la región en los próximos años. Por esto, profundizar la investigación acerca del comportamiento agronómico y ecofisiológico de la planta de olivo en diferentes ambientes térmicos permitirá comprender los mecanismos que controlan la productividad y calidad y prever cambios en su comportamiento sentando las bases para diseñar tecnologías (e.g. cultivares adaptados, riego, poda, conducción etc.) que permitan mejorar los rendimientos y la calidad de la olivicultura en la región de un modo sustentable (Lorite et al., 2018).

### **1.3 El control de la fenología en olivo**

El olivo es un cultivo frutal perenne, sus hojas son persistentes y sobreviven dos o tres años, la densidad de la copa, el porte del árbol y la longitud de entrenudos varía mucho

de acuerdo al cultivar y al manejo agrónomico. Las estructuras reproductivas son inflorescencias paniculadas con 10 a 40 flores. Dentro de una misma inflorescencia algunas flores pueden ser perfectas, compuestas de estambres y pistilo bien desarrollados, y otras estaminadas. Las inflorescencias se desarrollan en las yemas axilares de las hojas sobre madera crecida el año anterior a la floración. En años con gran carga de fruta se produce una competencia por recursos entre el crecimiento de los frutos y el crecimiento vegetativo lo cual lleva a una menor elongación de ramas y a la disminución de sitios (yemas) potenciales para florecer al año siguiente (e.g. Lavee, 2006; Fernández et al., 2015). Esta es, en parte, la causa de la alternancia anual en la producción (vecería). La polinización es cruzada por ser plantas parcialmente autoincompatibles, con lo cual en las plantaciones es deseable la presencia de distintos cultivares para permitir la formación normal de los frutos. Luego de la polinización se produce el cuajado de los frutos y la abscisión de aquellos ovarios no polinizados continuando su desarrollo muy pocos frutos por inflorescencia. El fruto es una drupa, cuyo endocarpo (carozo) comienza a crecer luego del cuaje y más tarde a esclerificarse. El mesocarpo (pulpa) comienza su crecimiento también luego del cuaje y continúa hasta la maduración almacenando aceite en cuerpos especializados de las células parenquimáticas (Rapoport, 1997, Matteucci et al., 2011)

Las primeras escalas fenológicas específicas para olivo fueron definidas por De Andrés (1974) y Colbrant y Fabre (1975) basadas en la escala Fleckinger para frutales (Fleckinger, 1948). En la Argentina se desarrolló un protocolo para observación fenológica en base a esta última el cual permite definir el estadio fenológico para una planta y fecha en particular teniendo en cuenta la variabilidad que existe dentro de la misma planta a partir de la observación del estadio más atrasado, más abundante y más avanzado (Aybar et al., 2006);

sin embargo, el mismo sirve únicamente para los estadios reproductivos. En el presente trabajo se utilizará como escala fenológica la propuesta por Sanz-Cortés et al. (2002) la cual se ajusta a la escala BBCH (Biologische Bundessortenamt Chemische Industrie), actualmente la más aceptada para la descripción del desarrollo en cultivos y malezas. La misma, desarrollada inicialmente para trigo (Zadoks et al., 1974), es una escala decimal de dos dígitos, el primero (0-9) indica una fase principal (e.g. floración) y el segundo (0-9) un estadio dentro de la misma (e.g. plena floración). Este sistema presenta la ventaja de incluir los estadios de desarrollo vegetativo. La fase 0 (estadios 00-09) describen los estadios de la yema y brote vegetativo; la fase 1 (estadios 11-19) describe el desarrollo de las hojas y la fase 3 (estadios 31-37) se refiere al desarrollo de la rama. Los estadios 5, 6, 7, 8 y 9 describen el desarrollo de la inflorescencia, la floración, el desarrollo del fruto, la maduración del fruto y la senescencia de los frutos, respectivamente. En el caso del olivo las fases vegetativas (0-3) y las reproductivas (5-9) en muchos casos coinciden en el tiempo por lo cual al realizar las observaciones es necesario tener en cuenta ambas individualmente.

Si bien en cultivos anuales los principales factores ambientales que regulan los procesos de desarrollo son la temperatura y el fotoperiodo, el olivo, al igual que el resto de los frutales, se considera insensible al fotoperíodo (Hackett y Hartmann, 1964). Los cambios en la temperatura afectan todos los procesos fisiológicos que regulan el ciclo del cultivo; sin embargo, en los frutales el estadio de floración es particularmente crítico para la producción. La temperatura ambiental regula la floración en primer lugar mediante la acumulación de frío invernal necesario para la salida de la dormición de las yemas florales y luego mediante su efecto promotor del desarrollo relacionado al efecto universal de la temperatura (Rallo y Martín, 1991). Dentro de los frutales, el olivo muestra una marcada respuesta fenológica a la

temperatura por lo cual se lo considera como indicador del cambio climático (Osborne et al., 2000a)

La necesidad de acumulación de las horas frío en olivo ha sido considerada inicialmente como un requisito para la iniciación floral que se consideraba ocurría durante el invierno al completarse los requerimientos (Hackett y Hartmann, 1963). Más tarde se interpretó que la iniciación floral se daba durante la primavera- verano del año previo y luego las yemas iniciadas entran en dormición de la cual saldrían mediante la acumulación de horas de frío durante el invierno (Rallo y Martin, 1991). Contribuciones recientes señalan que la inducción floral – entendida como acumulación del transcripto FT en las hojas – se da hacia fines del invierno previo al desarrollo de la inflorescencia. A su vez la tasa de acumulación de FT se encuentra condicionada por una “memoria bioquímica” relacionada con la carga de frutos de la temporada anterior, lo cual explica el efecto inhibitorio de la carga sobre la floración del año siguiente (Haberman et al., 2017). En cuanto a la acumulación de tiempo térmico – relacionada al efecto universal de la temperatura sobre el desarrollo vegetal- trabajos previos indican que la temperatura media del mes de mayo para el hemisferio norte es el mejor predictor de la fecha de floración (Pérez-López et al., 2008). Factores topográficos como pendiente del terreno (Oteros et al., 2013), altitud y exposición a la radiación también afectan el momento de ocurrencia de la floración. Dentro de una misma planta las caras norte y sur presentan también diferencias (Rojo y Pérez-Badia, 2014). Un déficit hídrico durante el periodo invernal no modificaría la intensidad de floración (Engelen et al., 2023), mientras que durante el desarrollo de las inflorescencias si se asocia a un menor número de flores y durante el desarrollo de las flores, a un menor porcentaje de cuaje (Rapoport et al., 2012).

Sin embargo, existe escasa información acerca de la influencia de la disponibilidad hídrica sobre la fecha de ocurrencia de la floración.

Existen modelos fenológicos para olivo que integran los efectos de la acumulación de frío y tiempo térmico y permiten predecir a partir de la temperatura en qué fecha florecerá un determinado cultivar (De Melo-Abreu et al., 2004; Oteros et al., 2013; Sicard et al., 2012). A pesar de no estar desarrollado específicamente para olivo, el Modelo Dinámico (Fischman et al., 1987) es utilizado en la actualidad para cuantificar la acumulación de frío por el cultivo en regiones cálidas (Elloumi et al., 2020, Medina-Alonso et al., 2020). Sin embargo, todos estos modelos fueron desarrollados o validados con datos obtenidos en regiones de cultivo del mediterráneo. Con excepción del modelo desarrollado por De Melo-Abreu et al. (2004), el cual fue validado en el NOA (Aybar et al., 2015). Esta validación demostró que el modelo es útil para predecir fecha de floración en los cultivares “Arbequina” y “Frantoio” cuando la floración es normal, aunque con un error de +/- 7 días en el 70% de los casos. Cuando la floración resultaba anormal (situación frecuente en el NOA para algunos cultivares por falta de frío invernal) el modelo resultaba bastante menos acertado en la predicción que en el mediterráneo. Además, los cultivares muestran diferente plasticidad en la fecha de floración y la duración de las fases reproductivas ante los cambios en la temperatura de invierno y primavera, por ejemplo 'Arbequina' podría ser una variedad rígida y desarrollar su fase de floración en un lapso corto (Inês et al., 2023). A la luz de estos resultados, se considera relevante continuar trabajando para establecer un modelo fenológico más preciso para las condiciones agro meteorológicas del NOA y los cultivares utilizados en esta zona.

#### **1.4 El control del crecimiento vegetativo en olivo**

El crecimiento vegetativo en olivo es controlado por diversos factores ambientales y de manejo como agua disponible, nutrientes, luz y carga de frutos. Se observó que la disponibilidad hídrica desde fines del invierno hasta el otoño modificó la elongación de ramas sin frutos y con frutos en años de baja carga, el crecimiento en volumen de la copa y el crecimiento en diámetro seccional del tronco (Correa-Tedesco et al., 2010). La fertilización foliar y por suelo con macroelementos también mostró efecto sobre el crecimiento vegetativo (Tognetti et al., 2008). La respuesta del crecimiento vegetativo a la intensidad lumínica fue estudiada mediante experimentos de sombreo en los cuales se observó que tanto la elongación de ramas como el incremento en diámetro del tronco muestran una respuesta lineal entre 0-40 mol de PAR m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> incidente durante la estación de crecimiento (Cherbiy-Hoffmann et al., 2013). Posteriormente se observó que la reducción en la elongación de las ramas fue significativa solamente cuando el tratamiento de sombreo era aplicado durante la primavera temprana (cuaje de frutos). Sombros posteriores no tuvieron efecto en el crecimiento de las mismas y además el número de nudos no se vio afectado en ramas sombreadas en ningún período (Cherbiy-Hoffmann et al., 2015). La carga de fruta es uno de los factores con mayor influencia sobre el crecimiento vegetativo, la remoción de los frutos en los primeros dos meses post-floración (antes de endurecimiento de carozo) permite que se retome la elongación de las ramas (Dag et al., 2010). En experimentos de raleo se observó que la duración de elongación de ramas en árboles con baja carga fue mucho mayor que en árboles con alta carga, lo que condujo a duplicar el largo de las ramas en los árboles de baja carga (Fernández et al., 2015).

Se sabe que la temperatura regula el crecimiento y desarrollo vegetativo, aunque esto ha sido mucho menos estudiado que la relación con el desarrollo reproductivo. Las yemas

vegetativas entran durante el invierno en endodormición parcial y reversible, la cual va disminuyendo a medida que avanza la estación, además de la ecodormición impuesta por las bajas temperaturas (López-Bernal et al., 2020). Una vez retomado el crecimiento, tanto la elongación de ramas como el aumento en volumen de la copa y diámetro del tronco correlacionan con la acumulación de tiempo térmico en la estación de crecimiento ( $T_b = 13, 14$  y  $7^\circ\text{C}$  respectivamente) (Perez-Lopez et al., 2008). Temperaturas del aire muy altas ( $37^\circ\text{C}$ ) parecen no afectar el crecimiento vegetativo en olivo, sin embargo, sí se observa un efecto negativo cuando se someten las raíces a temperaturas similares (Benlloch-González et al., 2016). Trabajos en otras especies frutales indagan sobre el control de la tasa de aparición foliar (filocrono) por la temperatura (Davidson et al., 2015). Esto no ha sido aún investigado en olivo y nos daría información más precisa sobre la posible respuesta del crecimiento y desarrollo vegetativo frente al cambio climático.

### **1.5 El control del crecimiento del fruto en olivo**

La disponibilidad hídrica es uno de los factores que regula fuertemente el crecimiento del fruto, la concentración de aceite y el rendimiento (d'Andria y Morelli., 2000; Greven et al., 2009; Correa-Tedesco et al., 2010; Gómez del Campo et al., 2014) y ha sido ampliamente estudiado. Existen también trabajos en relación a la influencia del ambiente lumínico sobre el crecimiento del fruto (Cherbiy-Hoffmann et al., 2013; Trentacoste et al., 2016).

En relación a la influencia de la temperatura, Trentacoste et al. (2012) modeló la dinámica de aumento de peso y de acumulación de aceite a lo largo de la estación de crecimiento para diez cultivares de olivo en la provincia de Mendoza, obteniendo que el peso final del fruto estaba determinado por su tasa de acumulación, mientras que la concentración final de aceite quedaba definida principalmente por la duración del periodo de acumulación.

Rondanini et al. (2014) obtuvo resultados concordantes respecto a la dinámica en el peso del fruto, pero no para la concentración de aceite la cual dependió principalmente de la tasa de acumulación. En el mismo trabajo se observó que la máxima concentración de aceite y el índice de madurez de los frutos difirieron entre cultivares y localidades. Es necesario profundizar en la relación entre el crecimiento del cultivo y su desarrollo en términos de estadios fenológicos. Mediante un experimento manipulativo García-Inza et al. (2014) obtuvo que el peso del fruto fue estable en un rango de temperaturas entre 16-25°C y disminuyó por encima de 25°C. La concentración de aceite mostró una mayor sensibilidad a la temperatura cayendo 1,1 puntos porcentuales por cada °C de aumento en la temperatura en un rango 16-32°C.

Estos resultados nos dan indicio de que un desplazamiento en el ciclo del cultivo tendrá un efecto indirecto sobre el crecimiento y la calidad del fruto a través del ambiente explorado. Es necesario entonces estudiar -mediante experimentos que tengan en cuenta la fenología del cultivo- en qué sentido actuarán estos cambios y cuál será su magnitud.

## **1.6 Objetivos e Hipótesis**

### **1.6.1 Objetivo general**

Caracterizar la respuesta en el desarrollo y el crecimiento vegetativo y reproductivo del olivo ante diferentes ambientes térmicos, con énfasis en la temperatura primaveral.

### **1.6.2 Objetivos específicos e hipótesis**

**Objetivo específico 1:** Evaluar la fecha de ocurrencia de estadios fenológicos reproductivos y vegetativos primaverales y la superposición entre los mismos para varios cultivares de olivo frente a diferentes temperaturas ambiente generadas a lo largo de un gradiente latitudinal (29°-33° S) que incluye un rango de altitudes (450-1.250 msnm) en la

principal región olivícola del oeste argentino. Además, evaluar las posibles relaciones entre la duración (días) de algunos períodos fenológicos y la temperatura del aire.

**Hipótesis 1 – OE1:** En aquellas localidades de mayores temperaturas medias en pre-floración algunos de los cultivares evaluados retrasan la fecha de ocurrencia de algunos estadios reproductivos (desarrollo de la inflorescencia y floración), mientras que otros cultivares adelantan la fecha con respecto a lo que ocurre en localidades más frías. Esto se debe a que el olivo requiere de cierta acumulación de frío para la salida de la dormición invernal la cual es variable entre cultivares; siendo la fecha de floración dependiente de la acumulación de frío y de la posterior acumulación de tiempo térmico por sobre una temperatura base .

**Hipótesis 2- OE1:** La duración de los períodos de desarrollo de la inflorescencias y floración se acorta en aquellas localidades donde la temperatura durante el mismo periodo es más elevada. Durante estos estadios el cultivo es particularmente susceptible a factores ambientales (e.g. viento zonda, radiación incidente, disponibilidad hídrica) ya que durante la misma se determina el número de frutos, por ello es de interés comprender los factores que modulan su duración.

**Hipótesis 3- OE1:** El inicio del desarrollo vegetativo en una temporada determinada ocurre más tempranamente en las localidades de mayor temperatura primaveral, esto se explica por una salida de dormición anticipada de los meristemas apicales. Sin embargo, el estadio correspondiente a un 70% de la elongación final de ramas ocurre más tardíamente en las localidades más cálidas ya que temperaturas altas hacia el otoño permiten retrasar el cese del crecimiento vegetativo. Por ende, en las localidades más cálidas la estación de crecimiento vegetativo es más prolongada.

**Objetivo específico 2:** Evaluar el impacto de la temperatura primaveral sobre la fecha de ocurrencia de estadios fenológicos reproductivos y vegetativos, y la superposición entre los mismos para dos cultivares de olivo creciendo bajo dos regímenes térmicos (control similar a la ambiental y calentado  $+4^{\circ}\text{C}$  por encima del control) generados experimentalmente bajo condiciones de campo utilizando cámaras de techo abierto.

**Hipótesis 1- OE2:** Al aplicar los tratamientos térmicos a partir de fines del invierno, cuando los requerimientos de frío de las plantas ya fueron satisfechos, se observa un adelanto en los estadios reproductivos primaverales (desarrollo de la inflorescencia y floración) en los tratamientos calentados. La magnitud de este adelanto esta explicada exclusivamente por el incremento de temperatura.

**Hipótesis 2- OE2:** La duración de los periodos de desarrollo de la inflorescencia y floración se acorta en los tratamientos de mayor temperatura, de modo similar a lo observado a campo en el Objetivo específico 1

**Hipótesis 3- OE2:** Como consecuencia del adelanto en la fecha de floración, los estadios reproductivos del desarrollo del fruto (endurecimiento de carozo y 50% del peso seco final) se adelantan en las plantas del tratamiento calentado.

**Hipótesis 4- OE2:** La separación del primer par de hojas ocurre más temprano en las plantas calentadas que en los controles. Esto se explica por una salida de la dormición anticipada de los meristemas apicales. En cambio, el estadio correspondiente al 70% de elongación de ramas no muestra diferencias entre  $T+$  y  $T0$  ya que depende principalmente de las temperaturas del verano.

**Objetivo específico 3:** Evaluar el impacto de la temperatura primaveral sobre la producción de órganos reproductivos (intensidad de floración, cuaje de frutos y carga frutal), el crecimiento vegetativo, la producción de biomasa y su partición para dos cultivares de

olivo creciendo bajo dos regímenes térmicos (control similar a la ambiental y calentado +4°C por encima del control) generados experimentalmente bajo condiciones de campo utilizando cámaras de techo abierto.

**Hipótesis 1- OE3:** La intensidad de floración no muestra diferencias entre los tratamientos térmicos ya que las temperaturas invernales no son modificadas y las temperaturas primaverales son adecuadas para la iniciación floral en ambos casos. El número de frutos resulta menor en las plantas sometidas al tratamiento calentado ya que las temperaturas alcanzadas tienen efectos negativos sobre el cuaje. La biomasa total de frutos al final del tratamiento es menor en las plantas del tratamiento calentado.

**Hipótesis 2 – OE3:** En los tratamientos de temperatura primaveral elevada se observa un inicio anticipado y una mayor tasa de crecimiento de los órganos vegetativos (medido según elongación de ramas y área seccional del tronco). En consecuencia, la biomasa de órganos vegetativos al final de los tratamientos es mayor en las plantas del tratamiento calentado.

**Hipótesis 3 – OE3:** La carga de fruta en relación a la biomasa vegetativa es menor en aquellas plantas del tratamiento calentado durante la primavera debido a que el crecimiento vegetativo aumenta mientras que la intensidad de floración y el porcentaje de cuaje se mantienen constantes o disminuyen.

**Objetivo específico 4:** Caracterizar el crecimiento del fruto y la acumulación de aceite para varios cultivares de olivo frente a diferentes temperaturas ambiente generadas a lo largo de un gradiente latitudinal (29°-33° S) que incluye un rango de altitudes (450-1.250 msnm) en la principal región olivícola del oeste argentino.

**Hipótesis 1 – OE4:** En las localidades más cálidas la fecha de endurecimiento de carozo y la fecha en que se alcanza la concentración máxima de aceite en el fruto se adelantan

con respecto a aquellas de menor temperatura. Estos estadios son relevantes ya que determinan las condiciones ambientales a las cuales se encuentra expuesta la acumulación de aceite en el fruto y por lo tanto su rendimiento y concentración final.

**Hipótesis 2- OE4:** En las localidades más cálidas la concentración final de aceite en el fruto es menor que en aquellas más frías, lo cual se explica por un cambio en la tasa de acumulación de aceite. Esto guarda relación con una alta frecuencia de temperaturas suficientemente altas para afectar la actividad enzimática responsable de la síntesis de triacilgliceroles en dichas localidades.

### **1.7 Estructura de la Tesis**

La presente tesis responde a los objetivos e hipótesis planteados a partir de dos abordajes experimentales diferentes. Por un lado, se utilizó un experimento en fincas comerciales ubicadas en las provincias de La Rioja (región NOA), San Juan y Mendoza (región Cuyo), principales productoras de olivo en Argentina. Los olivares seleccionados están dispuestos en un gradiente de latitudes y un rango de altitudes que permite obtener un gradiente de temperatura a campo. Por otra parte, se realizó un experimento manipulativo calentando plantas completas de 2 y 3 años en maceta mediante un sistema de cámaras de techo abierto (OTCs, Miserere et al., 2018). Esto se realizó en el campo experimental de CRILAR-CONICET ubicado en la localidad de Anillaco, La Rioja. Ambos experimentos se llevaron a cabo durante dos temporadas 2018-2019 y 2019-2020.

La tesis cuenta con cuatro capítulos dedicados a los resultados, en cada uno de ellos se detalla la metodología según el abordaje experimental correspondiente. El **Capítulo II** trata sobre la fenología primaveral del olivo a lo largo del gradiente altitudinal y rango de altitudes representativo de las regiones olivícolas argentinas. Se caracteriza la fecha de los

principales estadios reproductivos (desarrollo de la inflorescencia, floración etc.) y vegetativos (separación de las primeras hojas, alcance del 70% de la elongación final del brote) y se establecen comparaciones con regiones más antiguas de cultivo en el mediterráneo europeo. Adicionalmente, se establece la influencia de la localidad, el cultivar y la temporada sobre los estadios y se explora la influencia de la temperatura ambiental sobre la duración de los principales períodos de desarrollo. Los resultados responden al OE1 y permiten poner a prueba sus hipótesis. El **Capítulo III** se sustenta en el calentamiento experimental de plantas en OTCs (incremento de 4°C sobre la temperatura control) para profundizar en los efectos específicos de la temperatura de primavera sobre los estadios fenológicos reproductivos y vegetativos previamente tratados en el Capítulo II, pero independizándose de otros factores ambientales y del efecto de las temperaturas de invierno sobre la fenología. Los resultados permiten cumplir con el OE2 y poner a prueba las hipótesis correspondientes. El **Capítulo IV** aborda resultados obtenidos en el experimento en OTCs, pero haciendo foco en los efectos de la temperatura de primavera sobre la producción de biomasa vegetativa y reproductiva, y sus consecuencias sobre el rendimiento. Estos resultados permiten comprender la importancia de la temperatura de la primavera sobre las variables productivas. Los resultados obtenidos responden a lo planteado en el OE3 y sus hipótesis asociadas. En el **Capítulo V** se utilizan las observaciones obtenidas en un gradiente latitudinal con un rango de altitudes, para determinar la influencia de la temperatura sobre el crecimiento y desarrollo del fruto. La fecha en que se alcanzan estadios de endurecimiento de carozo, máximo peso seco del fruto y máxima concentración de aceite dan cuenta de estos efectos. Además, indaga en el efecto del ambiente, el cultivar y su interacción sobre la dinámica de crecimiento en peso seco y acumulación de aceite en el fruto a través de los parámetros "tasa" y "duración" de estos procesos. Los resultados obtenidos nos permiten cumplir con lo propuesto en el OE4 y

contrastar las hipótesis correspondientes. Por último, el **Capítulo VI** consiste en una discusión general en la que se integran los resultados obtenidos en ambos abordajes experimentales y en los diferentes momentos del ciclo, desde la primavera hasta el otoño y proponemos futuras líneas de trabajo abiertas a partir de los resultados de esta tesis.

## **CAPITULO II**

# **Fenología reproductiva y vegetativa primaveral de cultivares de olivo (*Olea europaea* L.) a diferentes temperaturas del aire a lo largo de un gradiente latitudinal-altitudinal en Argentina**

Hamze, L. M., Trentacoste, E. R., Searles, P. S., & Rousseaux, M. C. (2022). Spring reproductive and vegetative phenology of olive (*Olea europaea* L.) cultivars at different air temperatures along a latitudinal-altitudinal gradient in Argentina. *Scientia Horticulturae*, 304, 111327.

## 2.1 Introducción

Los estudios fenológicos realizados bajo condiciones climáticas regionales se han recomendado durante mucho tiempo para seleccionar especies agrícolas adecuadas y sus cultivares específicos y para planificar prácticas de manejo (Chmielewski 2013). Además, una mejor comprensión de la fenología también es importante para determinar las posibles consecuencias del cambio climático global, siendo que la fenología está fuertemente influenciada por la temperatura (Schwartz 1999; Cleland et al., 2007; Pope et al. 2014; Donnelly y Yu 2017). La fuerte estacionalidad de la temperatura en las latitudes templadas es de particular interés en frutales perennes como el olivo ya que el fotoperiodo no tiene un papel relevante en su fenología en comparación con los cultivos anuales (Campoy et al. 2011; López-Bernal et al., 2020).

El momento de los estadios fenológicos reproductivos de primavera (es decir, el desarrollo de la inflorescencia y la floración) en olivo está estrechamente relacionado con la temperatura, siendo una función de la exposición al frío invernal y de la posterior acumulación de temperaturas forzantes. Se ha sugerido que las temperaturas frías durante el invierno aumentan la transcripción de *OeFT1/2* en las hojas, lo que probablemente media la inducción floral de las yemas durante el invierno (Haberman et al. 2017). Según un estudio reciente, temperaturas por debajo de un determinado umbral, podrían causar una reversión en la acumulación de frío, este umbral se definió en 2,2°C para cv. Arbequina (Inês et al., 2023). Una vez que se cumplen los requisitos de frío, temperaturas forzantes cercanas a los 20°C son suficientes para promover la apertura de las yemas reproductivas, mientras que temperaturas más altas probablemente la retrasan. Aunque el enfriamiento invernal y la

acumulación térmica parecen ocurrir principalmente en forma sucesiva, es posible que presenten cierto grado de superposición (Ramos et al., 2018).

Varios estudios que miden los niveles de polen en el aire han encontrado que la temperatura del aire, particularmente durante la primavera, es un buen predictor de la fecha de floración y que la plena floración se ha adelantado debido al calentamiento global en la cuenca del Mediterráneo (Galán et al., 2001; Bonofiglio et al., 2008; Pérez-López et al., 2008; Aguilera et al., 2013). En observaciones directas durante varias temporadas de crecimiento (Elloumi et al., 2020) o en un gradiente altitudinal (Rojo y Pérez-Badia 2014) la temperatura del aire también demostró ser el factor más relevante que afecta la fecha de los estadios fenológicos reproductivos en las condiciones del Mediterráneo. Ambos estudios observaron que tanto la apertura de los brotes reproductivos como la floración fueron significativamente más tempranos en los años más cálidos. El último estudio también encontró que los estadios previos a floración y la floración ocurrieron más tarde a mayores altitudes en el centro de España debido a las temperaturas más bajas. De manera similar, se observaron fechas de floración más tempranas en los lugares más cálidos del sur de España (Andalucía) a lo largo de un estrecho gradiente latitudinal (37°- 38°N) con altitudes que oscilan entre 51 y 526 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Navas-López et al., 2019).

Existe escasa información sobre la fenología del olivo en condiciones climáticas cálidas, no-mediterráneas. En las condiciones climáticas típicas de la cuenca mediterránea los estadios fenológicos reproductivos normalmente avanzan con poca superposición. Sin embargo, en las condiciones subtropicales de baja amplitud térmica de las Islas Canarias (Medina-Alonso et al., 2020) se encontró que varios estadios fenológicos desde la emergencia de la inflorescencia hasta el desarrollo del fruto ocurren simultáneamente en los

mismos árboles (cvs. Arbequina, Picual). Al considerar el papel del ambiente, el cultivar y la interacción entre ambos para explicar la variabilidad en la fecha de plena floración, el ambiente resultó el factor más importante para 148 cultivares en el sur de España (Belaj et al., 2020). En la Islas Canarias, el ambiente también fue el factor más importante para la fecha de plena floración en todos los años, aunque el grado de superposición entre los estadios de floración y fructificación se vio afectado por las condiciones de temperatura de un invierno determinado en los dos cultivares evaluados. Las observaciones fenológicas de más cultivares en otros climas cálidos con diferentes características meteorológicas, como una estacionalidad más pronunciada, serían importantes para comprender mejor el desarrollo reproductivo del olivo y potencialmente para seleccionar cultivares apropiados para futuros escenarios de calentamiento global.

En contraste con el desarrollo reproductivo, en la fenología vegetativa del olivo se ha puesto menos énfasis en la literatura. La mayoría de los estudios han abordado el crecimiento vegetativo lo hicieron como respuesta a factores de manejo del cultivo, como el riego o la fertilización (p. ej. Correa-Tedesco et al., 2010). Pérez-López et al., (2008) evaluaron las respuestas de la tasa de crecimiento del tronco a la temperatura del aire en primavera, pero la fenología vegetativa no fue evaluada. El papel de la temperatura al final de la latencia invernal y la posterior brotación vegetativa se ha considerado muy recientemente (López-Bernal et al., 2020). Además, se observó una relación significativa entre la duración del período desde brotación vegetativa hasta floración y la temperatura del aire durante ese período utilizando una base de datos grande en Italia (Di Paola et al., 2021). En regiones cálidas, un gran crecimiento vegetativo a menudo puede aumentar la frecuencia y la cantidad de poda necesaria en comparación con las regiones más frías. Las observaciones del inicio y

el final del crecimiento de los brotes, así como la relación entre la duración del crecimiento y la temperatura del aire pueden ser útiles para mejorar las estrategias de manejo de la poda. Para esto es posible utilizar, por ejemplo, un riego deficitario controlado el cual recientemente se ha demostrado que es viable para limitar el crecimiento vegetativo en el oeste de Argentina sin reducciones en el rendimiento del cultivo (Trentacoste et al., 2019).

En las últimas décadas, la producción de olivo se ha expandido a nuevas regiones en el hemisferio sur las cuales a menudo tienen condiciones agroclimáticas diferentes a las de la cuenca mediterránea (Torres et al., 2017). Estudiar la fenología en estas regiones contribuye al conocimiento general de la fenología del cultivo y proporcionaría información específica sobre las consecuencias del calentamiento global dado que la temperatura es actualmente alta en muchas de estas regiones. Un estudio previo en el noroeste argentino observo que en algunas zonas la floración del olivo no se da todos los años (Aybar et al., 2015). Sin embargo, la presencia o ausencia de floración se pudo predecir con éxito en función del número de unidades de frío. Los objetivos del presente estudio fueron: (i) evaluar la fecha de ocurrencia los estadios fenológicos reproductivos y vegetativos primaverales y la superposición entre los mismos para varios cultivares de olivo cultivados a diferentes temperaturas de aire a lo largo de un gradiente latitudinal ( $29^{\circ}$ - $33^{\circ}$  S) con un rango altitudes (450-1.250 msnm) en el oeste argentino; y (ii) evaluar las posibles relaciones entre la duración (es decir, días) de algunos períodos fenológicas y la temperatura del aire.

## **2.2 Materiales y Métodos**

### **2.2.1. Área de estudio y material vegetal**

Se realizaron observaciones fenológicas en 6 sitios geográficos durante dos temporadas (2018-2019 y 2019-2020). Las localidades fueron seleccionadas a lo largo de un

amplio gradiente latitudinal ( $29^{\circ}$  a  $33^{\circ}$  S) que comprende diferentes altitudes (450 a 1.250 msnm) de la principal región olivícola en el oeste argentino (Fig. 2.1) con el objetivo obtener un amplio rango de temperaturas. Las localidades fueron La Rioja, Chilecito y Huaco en la Provincia de La Rioja (latitudes más bajas), Cañada Honda en la Provincia de San Juan (latitud intermedia) y Beltrán y Rivadavia en la Provincia de Mendoza (latitudes más altas). Las localidades diferían en sus altitudes particularmente en la Provincia de La Rioja (Cuadro 2.1). Todas las localidades están situadas en la región fitogeográfica del Monte (Burkart et al., 1999) y tienen un clima continental árido.

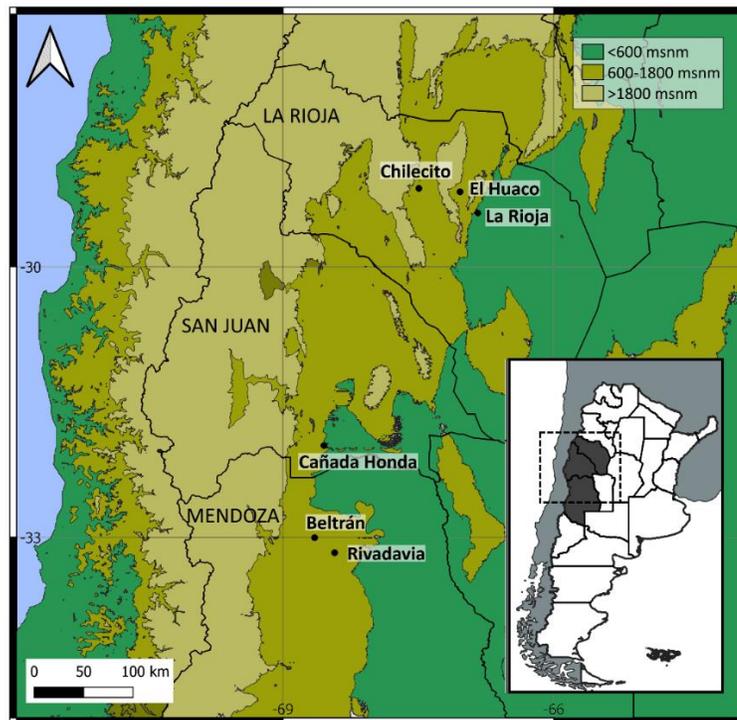


Figura 2.1 - Se realizaron observaciones fenológicas en olivos en seis localidades de la principal región olivícola del oeste argentino. Las localidades fueron seleccionadas con el fin de obtener un gradiente latitudinal y altitudinal. El recuadro en blanco y negro de Argentina muestra el área de estudio dentro del cuadrado punteado.

Cuadro 2.1 Información climática geográfica e histórica de las seis localidades argentinas y dos localidades españolas. Se muestran los valores temperatura media del aire (°C), máxima y mínima diaria media anual (°C), amplitud térmica anual (°C) precipitación anual (mm) y humedad relativa anual promedio (HR %) desde 1987 hasta 2019 aproximadamente. Algunos valores corresponden solo al año 2019 (\*) o al período de dos años de 2018-2019 (\*\*) por falta de series de datos más extensas. msnm: metros sobre el nivel del mar nd: sin datos disponibles.

Localidad	Latitud	Altitud (msnm)	Temperatura anual (°C)			Amplitud térmica anual (°C)	Precipitación anual (mm)	Humedad relativa (%)
			media	máx.	min			
La Rioja	29°17'S	450	21,1	28,3	13,9	18,1	411	56,8
Chilecito	29°32'S	843	19,6	26,5	11,3	17,9	141	56,2
Huaco	29°13'S	1246	16,5*	26,6*	8,0*	15,6*	nd	53,7*
Cañada Honda	32°01'S	595	18,2	26,6	10,5	20,2	96	47,1
Beltrán	32°57'S	653	15,9	25,8**	9,5**	18,3	142	49,4
Rivadavia	33°15'S	738	16,3	25,0**	8,8**	19,0	226	52,1
Andalucía, España	37°52'N	133	17,5	24,3	10,8	19,0	536	62,9
I. Canarias, España	28°07'N	1021	17,3	20,7	13,6	11,6	232	64,1

Los valores históricos de temperatura del aire, precipitación y humedad relativa (HR) de entre 1987-2019 aproximadamente se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana, entre 3 y 40 km dependiendo de la localidad. Estas estaciones estaban ubicadas en grandes áreas despejadas con una superficie de césped. Los datos fueron cedidos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para La Rioja, Chilecito y Cañada Honda y del Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (SIGA-INTA) para Rivadavia y Beltrán. Se calcularon los promedios anuales de las temperaturas mínimas y máximas diarias, así como la temperatura media diaria. La amplitud térmica anual se expresó como la diferencia entre la temperatura media de los meses más calurosos y más fríos del año. La precipitación media anual histórica fue de 96 a 411 mm, según la localidad, con la mayor cantidad de lluvia a fines de la primavera y el verano. La humedad relativa anual promedio (HR%) fue baja (47,1 a 56,8%). La Rioja tuvo las temperaturas históricas más altas y fue la localidad con menor latitud y altitud (Cuadro 2.1). Huaco, Rivadavia y Beltrán fueron

localidades más frías y tuvieron temperaturas máximas, mínimas y medias anuales similares. Estas localidades representaron la mayor altitud (Huaco) y latitudes (Rivadavia y Beltrán). Cañada Honda y Chilecito tuvieron temperaturas medias intermedias, pero Cañada Honda presentó la mayor amplitud térmica anual con veranos muy cálidos e inviernos fríos.

Con fines comparativos, se muestran datos climáticos de una región de cultivo tradicional Mediterránea (Andalucía, España) y de una región subtropical (Islas Canarias, España). Andalucía es una de las principales regiones olivícolas del mundo, y su régimen térmico cumple con los requerimientos de frío invernal para la floración en un gran número de cultivares de olivo (Barranco, 2017; Rallo y Cuevas, 2017). Canarias, en cambio, tiene un clima subtropical con temperaturas invernales muy suaves que muchas veces no cumplen con los requerimientos de frío para floración. Esta falta de frío invernal puede resultar en una falta de sincronía en la brotación reproductiva y la floración (Medina-Alonso et al., 2020). Todos los datos climáticos de España fueron obtenidos a partir del conjunto de datos de observación cuadrículados diarios E-OBS (Cornes et al., 2018) (Cuadro 2.1). La temperatura media anual de ambas localidades estuvo dentro del rango encontrado para el oeste argentino. Sin embargo, las temperaturas máximas diarias fueron más altas en las 6 localidades del oeste argentino que en Andalucía, y la amplitud térmica en el oeste argentino fue mucho mayor que la de las Islas Canarias.

En cada localidad argentina se eligió un cultivo comercial para las observaciones fenológicas. La mayoría de las fincas seleccionadas fueron cultivos maduros con árboles de aproximadamente 15 años de edad, una densidad de 208-357 árboles  $\text{ha}^{-1}$  orientados en hileras N-S y un volumen de copa de 17-59  $\text{m}^3$ . La finca de Huaco se diferenció por tener árboles de 5 años de edad, una densidad de 2.200 árboles  $\text{ha}^{-1}$  y un volumen de copa de 5  $\text{m}^3$ .

Se eligió este cultivo por ser la única finca comercial ubicada a una elevación alta (1246 msnm) a lo largo de la parte norte del gradiente latitudinal. Esto permitió una comparación de las respuestas fenológicas a temperaturas ambientales similares, pero en diferentes latitudes. Se suministró riego para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos mediante goteo. La fertilización, el control de plagas y la poda se manejaron adecuadamente.

Los genotipos (cultivares) más comúnmente plantados en los olivares comerciales modernos de Argentina se tomaron para las observaciones fenológicas, incluidos: Arauco, Arbequina, Arbosana, Coratina, Chagnolot, Manzanilla Fina y Picual. Arauco es el único cultivar argentino reconocido por el Consejo Oleícola Internacional (Barranco et al., 2000), mientras que los otros cultivares son originarios de la cuenca mediterránea. En todas las fincas, los árboles se obtuvieron de viveros registrados. Arauco, Coratina, Chagnolot, Manzanilla Fina y Picual se consideran cultivares de doble propósito en el oeste de Argentina y se utilizan para la producción de aceitunas de mesa curadas en salmuera o aceite de oliva, mientras que Arbequina y Arbosana son solo para la producción de aceite de oliva. Dado que no fue posible encontrar todos los cultivares en una única finca, seleccionamos en cada ubicación aquella que contenía tantos cultivares de interés como fuera posible. En cada ubicación se eligieron cinco árboles de cada cultivar con un tamaño de copa similar y una carga de frutos intermedia.

Además de los datos de la estación meteorológica mencionados anteriormente, la temperatura del aire se registró cada media hora utilizando un datalogger (HOBO, Bourne, MA, EE. UU.) en cada finca. El sensor externo de temperatura se colocó en una caseta protectora de la radiación solar directa junto a la copa de uno de los árboles observados a una altura de 1,5 m del suelo.

La acumulación total de frío se calculó a partir de los datos horarios en cada localidad desde el 1 de abril (DOY 91; principios de otoño) hasta que finalizó la acumulación (las unidades de frío quedaron estables) a principios del verano. El frío acumulado se calculó como chilling units (CU) usando el modelo de De Melo-Abreu et al., (2004) y chilling portions (CP) utilizando el modelo Dinámico (Fishman et al., 1987a).

### **2.2.2 Observaciones fenológicas**

Se realizaron observaciones periódicas según la escala fenológica BBCH adaptada para olivo (Sanz-Cortés et al., 2002). Dos técnicos entrenados tomaron las observaciones durante todo el experimento, un técnico fue asignado a las tres localidades de la Provincia de La Rioja y otro técnico a tres localidades restantes de las Provincias de San Juan y Mendoza. Para asegurar un criterio común por parte de los dos observadores, se tomaron fotografías de las diferentes localidades en sucesivos estadios fenológicos. Las observaciones se realizaron semanalmente en cada una de las dos temporadas desde la última semana de julio hasta la primera semana de mayo (mediados de invierno hasta el siguiente otoño). Se tomaron registros de los estadios vegetativos, incluyendo el desarrollo de hojas (BBCH 07-19) y brotes (BBCH 31-37), así como de los estadios reproductivos (emergencia de la inflorescencia: BBCH 50-59 y floración: BBCH 60-69). De los estadios observados, se utilizaron en los análisis estadísticos solamente los siguientes: BBCH 11, primeras hojas completamente separadas y de color gris verdoso; BBCH 37, los brotes alcanzan el 70% de la longitud final; BBCH 53, yemas de inflorescencia abiertas, comienza el desarrollo de la inflorescencia; BBCH 60, primeras flores abiertas; BBCH 65, plena floración con al menos el 50% de las flores abiertas; y BBCH 69, final de floración, cuaje, caída de los ovarios no fecundados (Fig. 2.2).

Los estadios reproductivos se observaron dentro de un cuadrado marcado de 50 x 50 cm a 1,5m de altura del suelo en la cara oeste de cada árbol. Como recomiendan Oteros et al. (2013) las observaciones se repitieron cada 7 días desde la última semana de julio hasta la primera semana de noviembre (es decir, desde mediados de invierno hasta mediados de primavera) y se documentaron con una fotografía de cada cuadro. El cuadro se dividió en cuartos, y a cada cuarto se le asignó visualmente un valor de estadio (BBCH 50-69). El promedio de los cuatro cuartos se consideró como el valor total para ese árbol y día. Se utilizó la interpolación lineal para estimar una fecha de un estadio dado cuando este parecía ocurrir entre dos fechas de observación (Rojo y Pérez-Badia, 2015). Luego se calcularon la media y el error estándar para los cuatro estadios reproductivos seleccionadas para cada combinación de cultivar x localidad x temporada.

Los estadios fenológicos vegetativos se observaron en el ápice de cinco brotes no productivos de un año por árbol a 1,5 m de altura del suelo. Cada brote se marcó cerca del ápice con un marcador a prueba de agua antes del comienzo de la temporada de crecimiento, y el desarrollo del primer par de hojas se observó cada 7 días después de la apertura de la yema, registrándose el estadio BBCH en cada fecha (BBCH 7, 11, 15 o 19). Para un árbol individual, se consideró la fecha de la separación completa del primer par de hojas (BBCH 11) cuando el 80% de las yemas apicales observadas habían alcanzado este estadio. Después de que el primer par de hojas estuvo completamente extendido (BBCH 15), usamos una regla para medir la elongación de los brotes cada 7 días (La Rioja, Huaco, Rivadavia y Beltrán) o 15 días (Chilecito y Cañada Honda) hasta diciembre (finales de la primavera). Luego, los brotes se midieron bimensualmente de enero a mayo (de verano a otoño). La elongación de los brotes de cada árbol se ajustó a una función bilineal para estimar la fecha en la que el

brote alcanzó el 70 % de su elongación final (BBCH 37). Luego se calculó el valor medio y el error estándar para BBCH 11 y 37 para cada combinación de cultivar x localidad x temporada

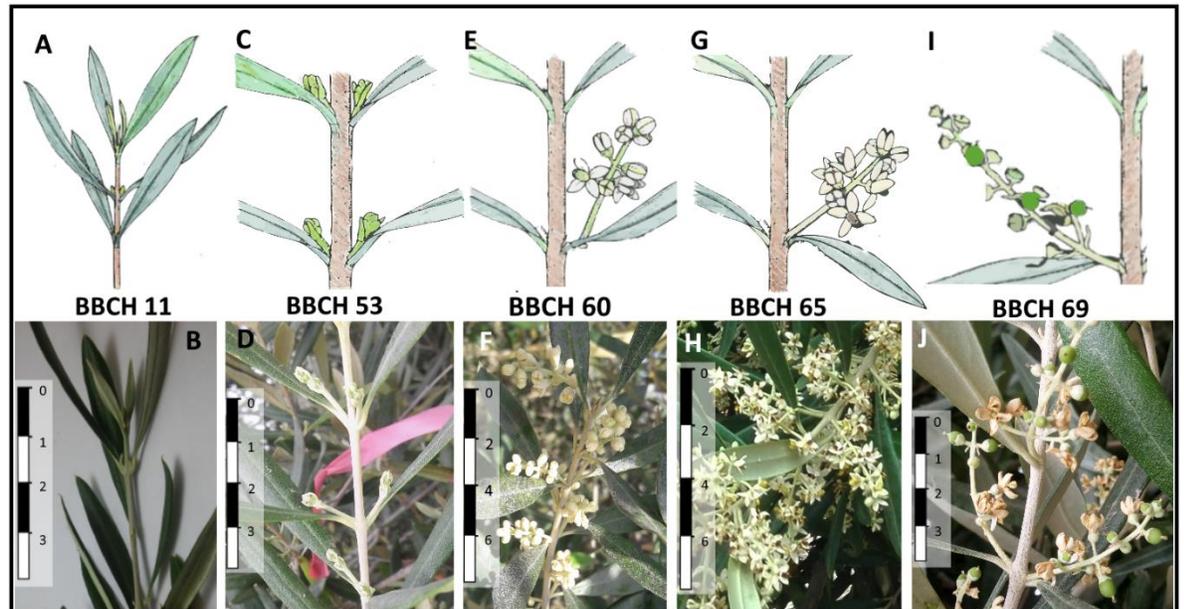


Figura 2.2 Representaciones y fotografías de los estadios fenológicos vegetativos (A, B) y reproductivos (C, D, E, F, G, H, I, J) observados. BBCH 11: primeras hojas completamente separadas, color gris verdoso (A, B). BBCH 53: Yemas reproductivas abiertas (comienza el desarrollo del racimo de inflorescencia) (C, D). BBCH 60: Primeras flores abiertas (E, F). BBCH 65: Plena floración (al menos el 50% de las flores abiertas) (G, H). BBCH 69: Fin de la floración, cuaje de frutos, caída de ovarios no fecundados (I, J). Las escalas están expresadas en centímetros (cm).

### 2.2.3 Análisis estadísticos

Se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) para todo el conjunto de datos para evaluar la influencia relativa del cultivar, la localidad, la temporada y sus interacciones en la fenología reproductiva y vegetativa. Dado que este conjunto de datos estaba desequilibrado en el sentido de que no incluía todas las combinaciones de cultivar, ubicación y temporada, también se realizaron dos ANOVA equilibrados por separado.

Se realizó un análisis de regresión lineal o bilineal entre una la duración de un determinado período fenológico entre dos estadios (días) y la temperatura media para ese mismo período de tiempo. Los períodos considerados fueron: emergencia de la inflorescencia desde la apertura de la yema reproductiva hasta el inicio de la floración (BBCH 53 - 60), el inicio hasta el final de la floración (BBCH 60-69), y el inicio hasta el 70% de elongación del brote final (BBCH 11-37). Además, se calculó el porcentaje de la elongación final de los brotes alcanzado a la fecha de plena floración.

## **2.3 Resultados**

### **2.3.1 Temperatura del aire y acumulación de frío**

Las temperaturas diarias máximas y mínimas medias para cada mes durante las dos temporadas de crecimiento (2018-2019; 2019-2020) se muestran en la Fig. 2.3. Las temperaturas máximas diarias en el oeste de Argentina rondaron los de 30-35 °C en el verano y 15-20 °C en el invierno (Fig. 2.3A). Las temperaturas mínimas diarias medias estuvieron generalmente cerca de 0 °C en el mes más frío (Fig. 2.3B). Tanto las temperaturas máximas como las mínimas en La Rioja (baja latitud y altitud) fueron casi siempre las más altas de todas las localidades argentinas. El gradiente de temperatura del aire, es decir la diferencia en las temperaturas promedio entre los lugares más cálidos y más fríos, fue de 4,2 °C en el invierno (junio-agosto) y 5,6 °C a principios de la primavera (septiembre-octubre) para 2018-2019, y 6,0 °C tanto en invierno como a principios de primavera para 2019-2020. A efectos comparativos, las temperaturas mínimas en el oeste de Argentina fueron más bajas a mediados de invierno que en Andalucía (Fig. 2.3B), mientras que las temperaturas máximas en el oeste de Argentina fueron mucho más altas en primavera que las de Andalucía (Fig.

2.3A). En Canarias, las temperaturas mínimas de mediados de invierno fueron de 10 a 15 °C más altas que en Argentina.

El frío invernal acumulado expresado como chilling units (CU), fue consistentemente bajo en ambos años en La Rioja (915 CU en 2018; 930 CU en 2019) y más alto en la ubicación de latitud más alta de Rivadavia (1.200 CU en 2018; 1.355 CU en 2019) (Cuadro 2. 2). Huaco, una localidad con una latitud baja como La Rioja, también mostró un CU bajo en 2018 (828 CU), pero no en 2019. El patrón general para la acumulación de frío medida en chilling portions (CP) fue similar al de CU.

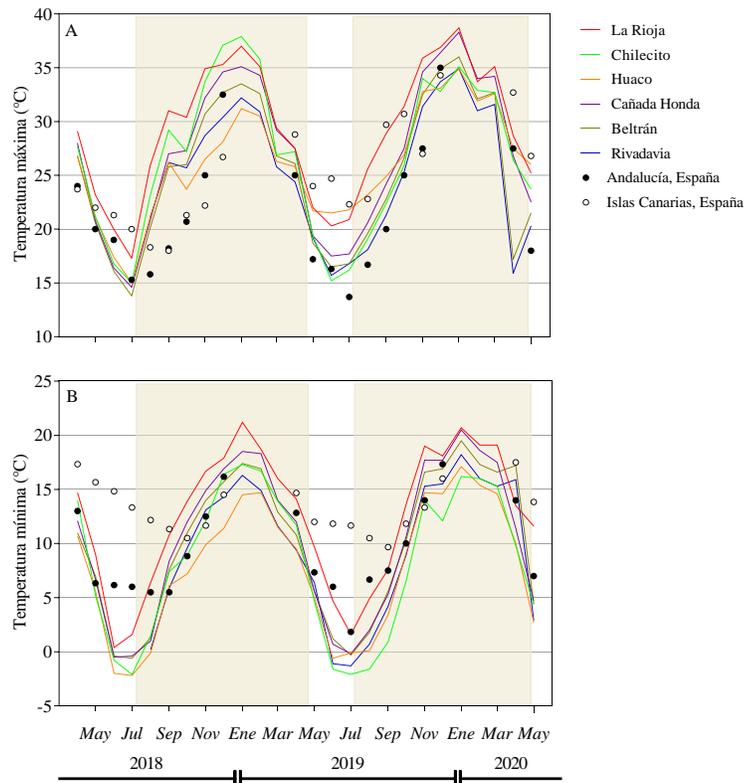


Figura 2.3 - Temperatura (°C) del aire máxima (A) y mínima (B) diaria media mensual desde abril de 2018 hasta junio de 2020 para las seis localidades argentinas evaluadas. Se colocó un sensor de temperatura por finca junto a uno de los árboles observados a 1,5 m de altura. Las temperaturas corregidas por diferencias estacionales entre hemisferios también se muestran durante la mayor parte de un período de 2 años en Andalucía y las Islas Canarias, España utilizando los datos disponibles de Medina-Alonso et al. (2020). Los períodos durante los cuales se realizaron observaciones fenológicas se muestran con el fondo sombreado.

Cuadro 2.2. Frío invernal acumulado en las seis localidades durante 2018 y 2019 expresado como chilling units (CU) (De Melo-Abreu et al., 2004) y chilling portions (CP) (Fishman et al. 1987a).\*\*

Localidad	Chilling units (CU)		Chilling portions (CP)	
	2018	2019	2018	2019
La Rioja	915	930	39	43
Chilecito	1.012	1.082	54	83
Huaco	828	1.011	57	71
Cañada Honda	1.014	1.072	60	64
Beltrán	1.064	1.254	59	74
Rivadavia	1.200	1.355	96	84

\*\* Los valores de acumulación de frío en Andalucía oscilan entre 1550-2050 CU (Mairech et al. 2021) o 65-110 CP (Medina-Alonso et al., 2020). En las Islas Canarias subtropicales, la CP oscila entre 10 y 90 CP (Medina-Alonso et al., 2020).

### 2.3.2 Variabilidad explicada por localidad, temporada y cultivar

Al evaluar todo el conjunto de datos, el ambiente (E), que es función de la localidad (L) y la temporada (S), explicó una proporción mucho mayor de la variabilidad total que el cultivar (C) para todos los estadios observados (Cuadro 2.3). La localidad explicó entre 71,7 – 95,2% de la variabilidad total para los estadios reproductivos (BBCH 53, 60, 65 y 69) y 57% para la separación de las primeras hojas (BBCH 11). La localidad explicó una menor parte de la variabilidad (29,1 %) para BBCH 37, pero la temporada de crecimiento explicó un 35,8% adicional. Por otro lado, la temporada explicó una menor proporción de la variabilidad (0 – 18,1%) para los estadios reproductivos. El cultivar explicó 22,4 % para BBCH11 y 12,8% para BBCH37, y entre 2,8 y 6,6 % para los estadios reproductivos. La interacción cultivar x ambiente ( $C \times E = C \times L + C \times S$ ) explicó 15,1% y 19,2% de la variabilidad para BBCH 11 y 37, respectivamente.

Cuadro 2.3- Variabilidad (%) como fracción del cuadrado medio total explicado por cultivar (C), localidad (L) y temporada (S) para uno de los estadios fenológicos en todo el conjunto de datos. Los

Fuente de variabilidad	Estadios Reproductivos					Estadios vegetativos	
	gl	53	60	65	69	11	37
Cultivar	4	5,6	4,5	2,8	6,6	22,4	12,8
Localidad	5	71,7	92,7	95,2	77,0	57,0	29,1
Temporada	1	18,1	0,2	0,0	14,7	2,2	35,8
C x L	16	2,1	1,7	1,4	1,1	11,2	13,4
C x S	4	2,1	0,8	0,4	0,4	3,9	5,8
Error	215	0,5	0,1	0,2	0,3	3,3	3,0
Total	245	100	100	100	100	100	100

estadios considerados fueron: 11 (primer par de hojas completamente separadas), 37 (70% de elongación del brote), 53 (apertura de las yemas florales), 60 (inicio de la floración), 65 (plena floración), 69 (final de la floración, cuaje). Se observaron cinco árboles (replicas) por cada combinación de CxLxS. gl: grados de libertad

Para evaluar mejor las posibles diferencias entre localidades, se realizó un ANOVA utilizando los dos cultivares (Arbequina y Picual) presentes en todas las localidades y ambas temporadas (Cuadro 2.4). Dos de las localidades de menor latitud (Chilecito, Huaco) fueron las primeras en alcanzar el estadio BBCH 53 (apertura de yemas florales), mientras que las dos localidades de mayor latitud (Beltrán, Rivadavia) fueron las más tardías. Como era esperable, la ubicación de latitud intermedia (Cañada Honda) mostró una fecha intermedia de BBCH 53. La Rioja (latitud baja) fue la más temprana para el resto de los estadios reproductivos, y una Rivadavia (latitud alta) fue la más tardía. BBCH 65 (plena floración) ocurrió 26 días antes en La Rioja que en Rivadavia probablemente debido a que la temperatura del aire fue 3,7 °C más cálida en La Rioja durante el invierno hasta principios de la primavera. A una latitud similar, las diferencias de altitud retrasaron significativamente el BBCH 65 en 16 días en Huaco (1.246 msnm) en comparación con La Rioja (450 msnm) a pesar de que ambos lugares alcanzaron BBCH 53 en fechas similares. En cuanto a los estadios vegetativos, se observaron menos de 10 días de diferencia en la fecha BBCH 11 (primer par de hojas completamente separadas) entre localidades para ambos cultivares. La

Rioja y Chilecito fueron las más tempranas y Huaco y Rivadavia las más tardías. Al considerar diferencias entre temporadas temporada, BBCH 53 y 69 fueron 5 y 4 días más tarde en 2019-2020 que en 2018-2019; respectivamente, mientras que en el resto de los estadios reproductivas se observó solo un ligero avance o bien no se observaron diferencias (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4- Estadios fenológicos reproductivos y vegetativos (día del año, DOY) para todas las localidades (L) y dos temporadas de crecimiento (S) en los dos cultivares más comunes evaluados (C; Arbequina y Picual). Se observaron cinco arboles (replicas) por cada combinación de C x L x S. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ). Cada estadio (BBCH 11, 37, 53, 60, 65, 69) se explica en el cuadro 2.3.

Fuentes de variación	Estadios reproductivos				Estadios vegetativos	
	53	60	65	69	11	37
<b>Cultivar (C)</b>						
Arbequina	265 b	295	300	313	269	345 b
Picual	262 a	295	300	315	266	330 a
p-valor	0,03	0,80	0,60	0,09	0,06	<0,01
<b>Localidad (L)</b>						
La Rioja	255 b	279 a	284 a	297 a	264 a	340 bc
Chilecito	249 a	288 b	294 b	307 b	263 a	353 c
Huaco	250 a	296 c	300 c	312 c	270 b	328 ab
Cañada Honda	272 c	298 d	304 d	316 d	268 ab	323 a
Beltrán	279 d	302 e	308 e	322 e	268 ab	327 ab
Rivadavia	278 d	305 f	310 f	324 f	272 b	353 c
p-valor	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Temporada (S)</b>						
2018-2019	261 a	295 b	300	311a	269	344
2019-2020	266 b	294 a	300	315b	267	331
p-valor	<0,01	0,04	0,60	<0,01	0,85	<0,01
<b>Significancia de las interacciones (p-valor)</b>						
C x L	<0,01	<0,01	0,01	0,29	0,37	<0,01
C x S	0,03	<0,01	<0,01	0,28	0,40	0,79
C x L x S	0,01	0,69	0,10	0,03	0,77	0,36

Para evaluar mejor las diferencias entre los cultivares, se realizó un ANOVA para los cinco cultivares más comunes evaluados en tres localidades y ambas temporadas de crecimiento (Cuadro 2.5). Las diferencias fenológicas entre cultivares para los estadios

reproductivos fueron menores que entre localidades. Las diferencias entre los cultivares más tempranos y los más tardíos fueron de 5 a 11 días, mientras que las diferencias entre localidades fueron mayores a 20 días. La respuesta al cultivar parece depender del ambiente, lo cual se observa en las interacciones significativas dobles (C x L y C x S) y triples (C x L x S). Solamente el estadio BBCH 11 no mostró interacciones significativas. En general, Coratina fue el primer cultivar en alcanzar los estadios reproductivos tempranos (BBCH 53, 60 y 65), pero estuvo entre los últimos en alcanzar BBCH 69 junto con Arbosana y Picual. En contraste, Arbequina y Picual fueron los últimos cultivar en alcanzar BBCH 53, 60 y 65, pero mostraron poca o ninguna diferencia con los otros cultivares en BBCH 69. Para ambos estadios vegetativos (BBCH 11 y 37), Coratina fue consistentemente el cultivar más temprano y Arbequina el más tardío.

### **2.3.3 Observación de los estadios fenológicos reproductivos**

La fecha de apertura de las yemas florales (BBCH 53) varió entre el día del año (DOY) 218 (principios de agosto) hasta el 288 (finales de octubre) según la estación (S), localidad (L) y el cultivar (C) (Figura 2.4). Para la mayoría de los cultivares y localidades, BBCH 53 fue más temprano en 2018-2019 que en 2019-2020, aunque en La Rioja, el estadio BBCH53 ocurrió de forma inversa en cuatro de los cultivares. En ambas temporadas, BBCH 53 fue generalmente más temprano en las tres localidades de menor latitud (La Rioja, Chilecito, Huaco), intermedio en Cañada Honda y más tardío en las dos localidades de mayor latitud (Beltrán, Rivadavia). Una comparación de BBCH 53 en las tres localidades de latitudes bajas, que diferían sustancialmente en la temperatura del aire debido a la altitud, no mostró el patrón esperado de que el estadio BBCH 53 ocurra más tarde en lugares más altos y más fríos. A pesar de estar en latitudes muy similares, BBCH 53 en 2018-2019 estuvo en

promedio 20 días más tarde en la baja altitud de La Rioja (450 msnm) en comparación con la mayor altitud de Chilecito (843 msnm).

Cuadro 2.5- Estadios fenológicos reproductivos y vegetativos (DOY, día del año) para los cinco cultivares más evaluados (C) en tres localidades (L) y las dos temporadas de crecimiento (S). Se observaron cinco arboles (replicas) por cada combinación de C x L x S. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ). Cada uno de los estadios (BBCH 11, 37, 53, 60, 65, 69) se explica en el cuadro 2.3.

Fuentes de variación	Estadios reproductivos				Estadios vegetativos	
	53	60	65	69	11	37
<b>Cultivar (C)</b>						
Arbequina	258 c	294 c	299 c	311 b	268 c	342 c
Arbosana	253 b	292 b	298 c	313 c	264 bc	329 ab
Changlot	247 a	292 b	297 b	309 a	261 b	334 bc
Coratina	248 a	288 a	293 a	314 c	255 a	321 a
Picual	256 bc	294 c	299 c	313 c	266 bc	327 ab
p-valor	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Localidad (L)</b>						
Chilecito	242 a	285 a	291 a	307 a	259 a	348 b
Huaco	245 a	295 b	300 b	314 b	268 c	324 a
Cañada Honda	270 b	296 c	300 b	314 b	263 b	321 a
p-valor	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Temporada (S)</b>						
2018-2019	247 a	292	298	311 a	264 b	332
2019-2020	258 b	292	297	313 b	262 a	329
p-valor	<0,01	0,27	0,07	<0,01	0,02	0,12
<b>Significancia de las interacciones (p-valor)</b>						
C x L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,10	<0,01
C x S	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,52	0,12
C x L x S	<0,01	0,04	0,04	<0,01	0,65	0,05

Considerando ambas temporadas, la duración del período de emergencia de la inflorescencia (BBCH 53-60) varió entre 15 y 74 días dependiendo de la combinación de C x L (Fig. 2.4). En cambio, el período de floración (BBCH 60-69) fue más corto y duró entre 10 y 30 días (con una excepción que duró 41 días). La plena floración (BBCH 65) estuvo muy concentrada en el tiempo, la combinación C x L más temprana alcanzó la plena floración en DOY 274 y la última en DOY 312. En casi todos los casos, las localidades de menor latitud y/o altitud (generalmente más cálidas) alcanzaron la plena floración antes que las

localidades de mayor latitud y/o altitud. La fecha más temprana de BBCH 65 fue a fines de septiembre en La Rioja (450 msnm) y la fecha más tardía fue a principios de noviembre en la localidad más fría de Rivadavia (490 km al sur de La Rioja). Para las tres localidades del norte (latitud similar), la plena floración ocurrió unas tres semanas antes en La Rioja (450 msnm) que en Huaco (1.246 msnm), y Chilecito (843 msnm) tuvo una fecha intermedia. De modo similar a BBCH 53, las diferencias en la fecha de BBCH 65 entre cultivares fueron más pronunciadas en las localidades menor que en las de mayor latitud. El período de floración (BBCH 60-69) también finalizó antes en lugares de menor latitud y altitud. (Fig. 2.4).

#### **2.3.4. Observación de los estadios fenológicos vegetativos**

La separación completa del primer par de hojas (BBCH 11) mostró menor dispersión entre las diferentes localidades que la observada para los estadios reproductivos (BBCH 53 y 65) en ambas temporadas (Fig. 2.5). En 2018-2019, la fecha de BBCH 11 se alcanzó durante la segunda quincena de septiembre con una diferencia de solo 22 días entre las combinaciones C x L más tempranas y más tardías. La dispersión general fue mayor en 2019-2020 (33 días), sin incluir un valor BBCH 11 inusualmente temprano ocurrido en Chilecito. En general el estadio BBCH 11 ocurrió más tarde que BBCH 53 en las localidades de latitudes más bajas, pero ocurrió posterior a BBCH 53 en las latitudes más altas. En todos los casos, BBCH 11 se observó mucho antes de BBCH 65. Las diferencias entre C en la fecha de BBCH 11 a menudo dependieron de L y S. Por ejemplo, Coratina fue el cultivar más temprano para BBCH 11 en Chilecito en ambas temporadas, mientras que fue el más tardío en Rivadavia en 2019-2020. Por último, la variabilidad de BBCH 11 entre árboles (EE para da combinación C x L) fue mayor que la observada para los estadios reproductivos (Fig. 2.4, 2.5).

El 70% de la elongación de los brotes (BBCH 37) ocurrió durante un período prolongado desde mediados de octubre hasta mediados de enero, dependiendo de S, L y C (Fig. 2.5). BBCH 37 ocurrió con mayor frecuencia mucho después de la fecha de plena floración. No se pudo discernir un patrón que relacione BBCH 37 con la latitud o altitud, a su vez se observó una alta variabilidad entre árboles para muchas combinaciones C x L.

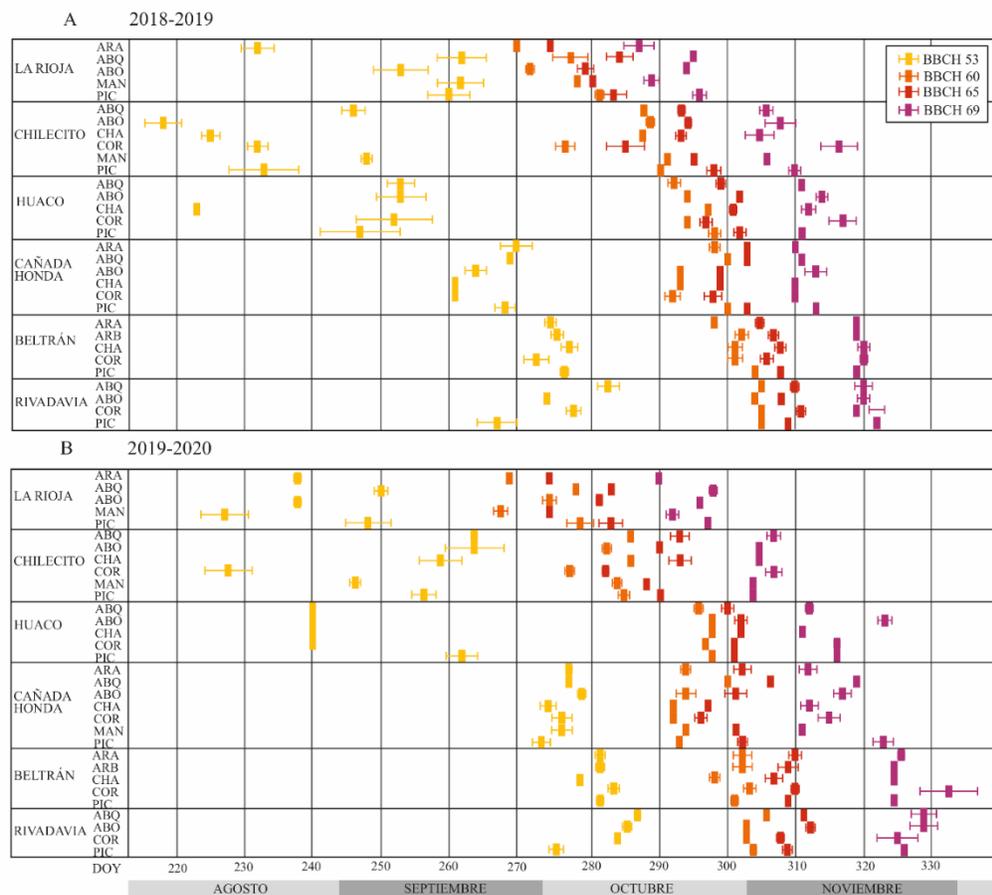


Figura 2.4- Fechas de los estadios fenológicos reproductivos (DOY, día del año) para siete cultivares (ARA: Arauco, ABQ: Arbequina, ABO: Arbosana, CHA: Changlot, COR: Coratina, MAN: Manzanilla Fina, PIC: Picual) en las seis localidades durante dos temporadas de cultivo (A, 2018-2019; B, 2019-2020). Los estadios (media  $\pm$  EE) considerados en la escala BBCH fueron: 53 (apertura de yemas florales), 60 (inicio de floración), 65 (plena floración), 69 (fin de floración, cuajado).

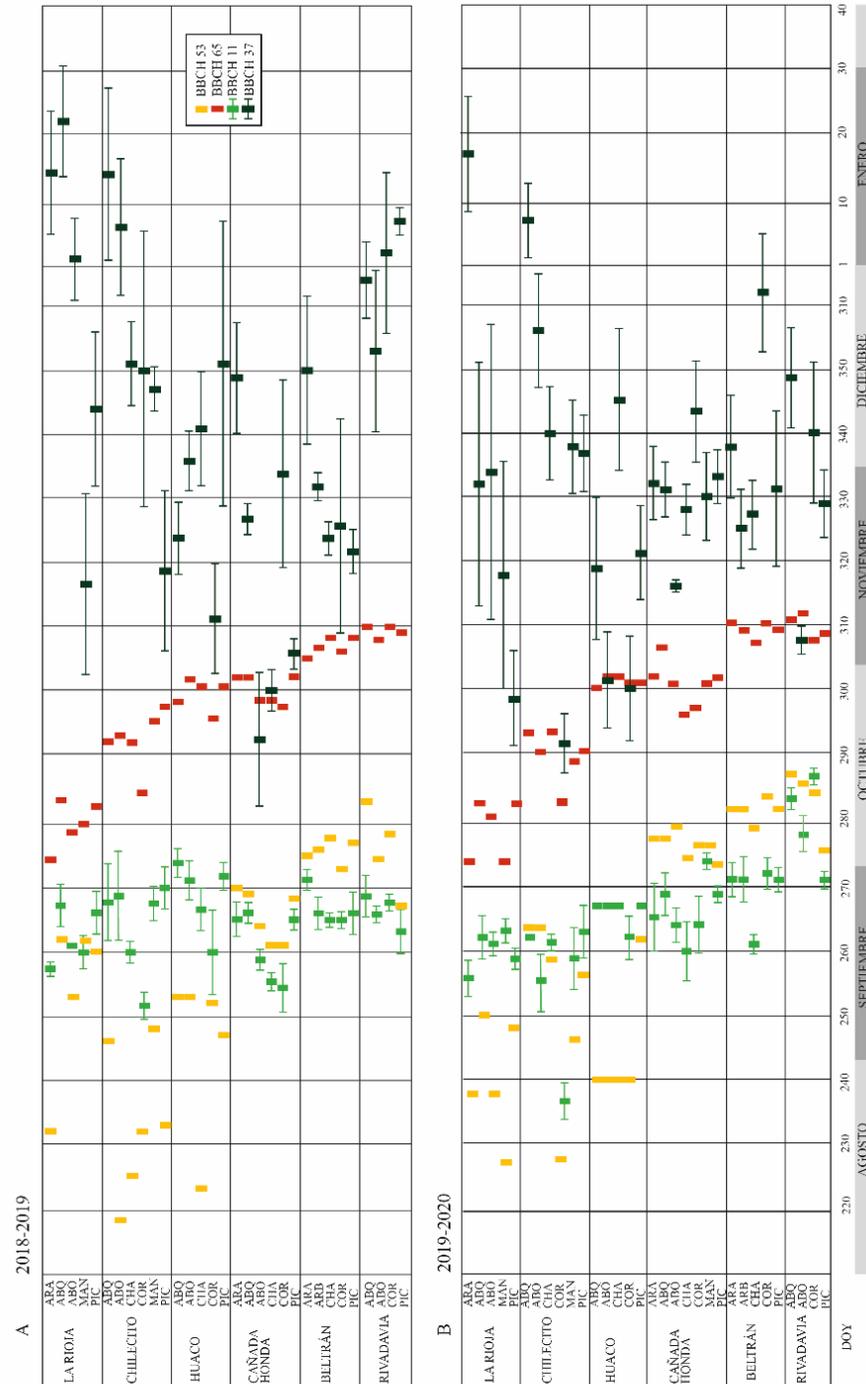


Figura 2.5-. Estadios fenológicos vegetativos (DOY, día del año) en comparación con apertura de yemas florales (BBCH 53) y plena floración (BBCH 65) para siete cultivares (ARA: Arauco, ABQ: Arbequina, ABO: Arbosana, CHA: Changlot, COR: Coratina, MAN: Manzanilla Fina, PIC: Picul) en las seis localidades durante dos temporadas de cultivo (A, 2018-2019; B, 2019-2020). Los estadios vegetativos BBCH (promedio  $\pm$  EE) considerados en la escala BBCH fueron: 11 (primer par de hojas completamente separadas) y 37 (70% de elongación del final del brote).

### 2.3.5 Duración de períodos entre estadios fenológicos en función de la temperatura del aire

La duración (días) de emergencia de la inflorescencia, desde la apertura de la yema hasta el inicio de la floración (BBCH 53-60) tuvo una relación lineal negativa con la temperatura promedio durante ese período ( $y = -4,3x + 106$ ,  $p < 0,01$ ), acortándose 4,3 días/°C mientras que la temperatura aumentó de 14,6°C a 22,1°C (Fig. 2.6). En cambio, la duración del período de floración (BBCH 60-69) tuvo una respuesta bilineal ( $R^2 = 0,33$ ; Fig. 2.6B). BBCH60-69 se redujo de 19 a 16 días a medida que la temperatura aumentó de 16,1 a 22,9 °C, pero luego aumentó por encima de los 23 °C con una pendiente positiva de 5,3 días/°C y llegó a 29 días a los 24,7 °C. Las localidades con temperaturas medias superiores a 23°C fueron Cañada Honda y La Rioja en 2018-2019 y Cañada Honda, Beltrán y Rivadavia en 2019-2020. Para estas combinaciones L x S, se encontró una proporción significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) de horas (0,11) con temperaturas horarias muy altas ( $> 33$  °C) en comparación con otras combinaciones (0,05).

La duración entre BBCH 11-37 fue muy variable con un rango de 31 a 165 días, y no se encontró una relación clara con la temperatura media diaria (Fig. 2.6C). El porcentaje de elongación total de brotes que ocurrió antes de la plena floración aumentó linealmente de 27% a 67% a medida que la temperatura media diaria aumentó de 13,3°C a 20,8°C ( $p < 0,01$ ; Fig. 2.6D). Sin embargo, esta relación explicó una baja proporción de la variabilidad ( $R^2 = 0,15$ ) de la elongación de los brotes.

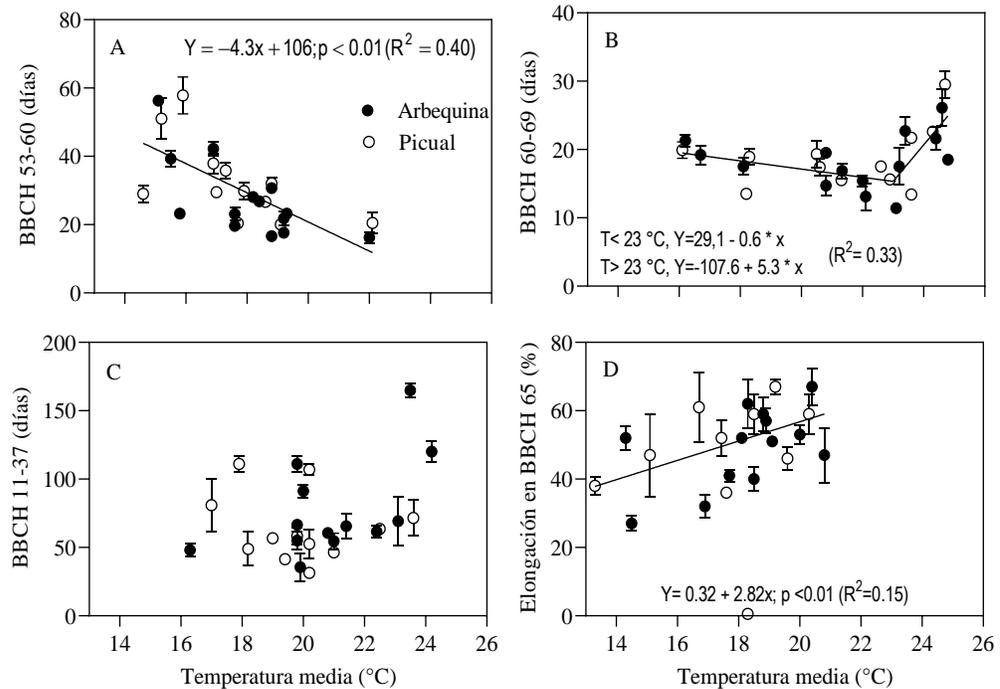


Figura 2.6 -Duración (días) de varios períodos fenológicos que incluyen (A) BBCH 53-60, (B) BBCH 60-69 y (C) BBCH 11-37 en función de la temperatura media diaria (°C) durante el mismo período. También se muestra (D) el porcentaje de la elongación final de los de los brotes vegetativos alcanzado en BBCH 65 frente a la temperatura media diaria promedio (°C) entre BBCH 11 y 65. Para este análisis se utilizaron los dos cultivares más comunes evaluados (Arbequina y Picual). Cada punto representa la media  $\pm$  EE de cinco árboles independientes.

## 2.4 Discusión

Este estudio proporciona las primeras observaciones detalladas de la fenología reproductiva y vegetativa del olivo en un clima no mediterráneo con marcada estacionalidad. Aunque las temperaturas máximas diarias medias anuales son más altas en el oeste de Argentina que en Andalucía, España (Cuadro 2.1), las temperaturas mínimas diarias de invierno son más bajas debido al clima continental (Fig. 2.3). Estas temperaturas invernales probablemente contribuyeron a que los estadios reproductivos se superpongan en una de las localidades analizadas del oeste de Argentina (Fig. 2.4). La fenología floral en las Islas Canarias se estudió recientemente en una latitud similar (28° N) a las localidades de latitud

más baja en el oeste de Argentina (29° S); allí se encontró una superposición considerable de los estadios reproductivos observándose en una misma rama desde el crecimiento de la inflorescencia hasta el 90% del tamaño final del fruto, además de múltiples eventos de floración a escala regional (Medina-Alonso et al., 2020). Tal superposición probablemente estuvo relacionada con las altas temperaturas de mediados de invierno en las Islas Canarias, que fueron de 10 a 15°C más altas que en el oeste continental de Argentina. Un estudio que evaluó principalmente la fecha de plena floración de tres cultivares en el noroeste de Argentina tampoco informó dicha superposición (Aybar et al., 2015).

El frío invernal acumulado fue mucho menor en las localidades de latitud más baja que en las latitudes más altas en el oeste de Argentina, con un rango de alrededor de 800 a 1.300 CU (Cuadro 2.2). Estas son suficientes para los requerimientos de fríos de los cultivares estudiados, pero son inferiores a los valores históricos (1550-2050CU) para la región de cultivo tradicional de Andalucía (Mairech et al., 2021). Esto probablemente ocurre porque las temperaturas mínimas invernales en el oeste de Argentina suelen estar por debajo de la temperatura óptima de 7,3°C del modelo de CU para acumulación de frío (De Melo-Abreu et al., 2004). Además, las masas de aire cálido, asociadas con los vientos Zonda, son comunes durante varios períodos del día en el invierno, lo que podría llevar a descontar unidades de frío. Las localidades argentinas presentaron CP similares (39-96 CP) a las localidades de mayor altitud (600 msnm) en las Islas Canarias, pero mayores que las de las localidades de menor altitud donde la cantidad de CP acumuladas fue muy baja (Medina-Alonso et al., 2020). Dado que las CU y las CP en las menores latitudes del oeste de Argentina son bastante bajas, la floración en esta región podría ser muy susceptible al calentamiento global. Los cultivares con mayores requerimientos de frío, como cvs. Leccino y Frantoio ya se han

excluido de la mayoría de las fincas en el extremo más cálido de nuestro gradiente latitudinal (Aybar et al., 2015).

La fecha de plena floración (BBCH 65) es el evento más evaluado en la fenología del olivo (por ej. Aguilera et al., 2015; García-Mozo et al., 2015; Gabaldón-Leal et al., 2017). En nuestro estudio, el cultivar explicó un bajo porcentaje de la variabilidad (2,8 %) para BBCH65. Del mismo modo, el cultivar explicó poco la variabilidad de la floración (2,6 %) en 9 cultivares que crecieron a lo largo de un gradiente latitudinal en condiciones típicas de clima mediterráneo en el sur de España (Navas-López et al., 2019). Sin embargo, se observó una mayor influencia del cultivar (18 %) para un número muy grande de genotipos (148) en un solo sitio (Córdoba, España) (Belaj et al., 2020). Es posible que los cultivares utilizados en nuestro estudio tuvieran una variabilidad genética limitada debido a sus requerimientos de frío relativamente bajos (por ejemplo, Arbequina, 339 CU; Manzanilla fina, 433 CU; Picual, 469 CU) ya que los cultivares con mayores requerimientos que presumiblemente florecen más tardíamente ya han sido excluidos de la región como se mencionó anteriormente.

La gran mayoría de la variabilidad en la fecha BBCH 65 en nuestro estudio se explica por la localidad (95,2%). Una diferencia de temperatura promedio de 5,5 °C a lo largo del gradiente latitudinal-altitudinal durante el invierno hasta principios de la primavera (junio a octubre; Fig. 2.3) condujo a la plena floración hasta 26 días antes en el extremo cálido y de baja latitud del gradiente en comparación con el extremo más frío y de alta latitud (Cuadro 2.4). La magnitud del adelanto en la plena floración en los ambientes más cálidos es comparable a la observada en estudios previos utilizando diferentes enfoques (por ejemplo, series de tiempo a largo plazo, múltiples ubicaciones con diferentes ambientes o

calentamiento experimental). Por ejemplo, la plena floración mostró un rango de 35 días sobre un gradiente de temperatura promedio de 2,7 °C durante todo el año utilizando una serie de monitoreo de polen de 25 años en Umbría (Italia) (Bonofiglio et al., 2009). También se produjo un adelanto de la floración de 25 días en un estudio multiambiental en el sur de España al comparar las localidades más cálidas y frías con una diferencia de temperatura media de 2,1 °C (Navas-López et al., 2019). Del mismo modo, la plena floración se adelantó entre 18 y 24 días cuando se calentaron experimentalmente plantas (cv. Picual) 4°C por encima de la temperatura ambiente (Benlloch-González et al., 2019). Por lo tanto; cuando se cumplen requerimientos de frío, la respuesta al aumento de la temperatura suele ser una floración más temprana. Esto se puede ver en nuestras localidades del oeste de Argentina con la floración (BBCH 65) ocurriendo temprano en La Rioja y mucho más tarde en Rivadavia (Cuadros 2.2, 2.4). En este sentido, el adelanto en la fecha de floración en las localidades más cálidas, haciendo que este estadio ocurra en una fecha con mayor probabilidad de heladas sumado a las proyecciones incrementos en este tipo de eventos extremos en el contexto del cambio climático (IPCC, 2021) podría incrementar considerablemente la probabilidad de daños por helada en floración que comprometan el rendimiento.

La apertura de las yemas florales (BBCH 53) es el primer estadio reproductivo observado visualmente en el olivo. En condiciones de la cuenca mediterránea, varios estudios han demostrado un desarrollo más temprano de la inflorescencia en altitudes más bajas (Rojo y Pérez-Badía 2014) o para lugares o años relativamente cálidos (Oteros et al., 2013; Rojo y Pérez-Badía 2015; Elloumi et al., 2020). En nuestro estudio, se observó un rango amplio en la fecha BBCH 53 (aproximadamente 60 días) entre las combinaciones C x L más tempranas y las más tardías. Las localidades de baja latitud/altitud generalmente tuvieron fechas más

tempranas. Sin embargo, este patrón no fue claro en la Provincia de La Rioja, donde BBCH53 ocurrió más tarde en La Rioja, localidad más cálida, que, en Chilecito, localidad más templada, en 2018-2019 para la mayoría de los cultivares (Fig. 2.4). Este retraso en La Rioja podría haber estado relacionado con las altas temperaturas de finales de invierno y principios de primavera, según proponen Ramos et al., (2018), quienes observaron que temperaturas forzadas entre 12,5-15 °C promueven una brotación más temprana en olivo mientras que temperaturas altas pueden retrasarla.

La fenología vegetativa del olivo, incluido el papel del cultivar y el ambiente, ha sido escasamente estudiada. El crecimiento de los brotes de olivo parece cesar en el otoño en respuesta a las bajas temperaturas sin efecto del fotoperiodo, y se ha sugerido que los meristemas apicales del olivo experimentan un período de endodormancia fácilmente reversible durante el invierno (López-Bernal et al., 2020). La brotación subsiguiente depende de temperaturas forzantes suficientes durante un período de 1 a 2 semanas. En nuestro estudio, la fecha de separación completa de las primeras hojas (BBCH 11) fue menos variable que las fechas de los estadios reproductivos (Fig. 2.5), y esta variabilidad se explica principalmente por el ambiente (57%) y el cultivar (22%) (Cuadro 2.3). La sincronía relativa entre las diferentes ubicaciones para las fechas de BBCH 11 es consistente con una brotación que ocurre poco después de que finaliza el período de endodormancia. Se ha encontrado que las diferencias entre los cultivares en el momento del cese del crecimiento en el otoño son bastante pequeñas (López-Bernal et al., 2020), pero en ese estudio no se examinó el inicio del crecimiento de las hojas en la primavera. En el presente trabajo, Coratina fue el cultivar más temprano en promedio en alcanzar BBCH 11 y Arbequina fue el más tardío con una diferencia de aproximadamente 10 días (Cuadro 2.5). Además, las interacciones C x L

explicaron el 11% de la variabilidad en BBCH 11 con los cultivares más tempranos y más tardíos a veces siendo diferentes entre las localidades. Por lo tanto, el inicio del crecimiento vegetativo a fines del invierno y principios de la primavera parece depender parcialmente del cultivar. En términos ambientales, BBCH 11 en la localidad más cálida de La Rioja ocurrió de 7 a 10 días antes que en las zonas más frías de Huaco y Rivadavia (Fig. 2.5). El setenta por ciento de la elongación de los brotes (BBCH 37) mostró un rango de 96 días entre la combinación C x L x S más temprana y la más tardía. La variabilidad en la fecha de del estadio BBCH 37 se explicó principalmente por la temporada (35,8 %); la localidad también explicó una gran parte de la fecha BBCH 37 (29,1 %) (Cuadro 2.3). Además, la fecha de BBCH 37 difirió mucho entre los árboles en la misma localidad lo cual se observa en el alto EE (Fig. 2.5). Es probable que otros factores como la exposición al sol, la poda, el riego y la carga de cultivo, que afectan la asimilación y asignación de carbono, influyan en la fecha de BBCH 37 más que la temperatura del aire.

Se determinaron las posibles relaciones entre la duración (días) de varios períodos fenológicos y la temperatura del aire para evaluar más directamente el papel de la temperatura. La duración del período de emergencia de la inflorescencia (BBCH 53-60) mostró una relación lineal negativa significativa con la temperatura media diaria del aire, mostrando una pendiente de  $-4.3$  días/ $^{\circ}\text{C}$  (Fig. 2.6A). Recientemente, un estudio que evaluó la fenología del olivo en siete localidades italianas en condiciones más frías ( $12-20$   $^{\circ}\text{C}$ ) también encontró una relación lineal negativa significativa entre la duración del período de emergencia de la inflorescencia y la temperatura del aire, pero con una pendiente mayor de  $-12,2$  días/ $^{\circ}\text{C}$  (Di Paola et al., 2021). El período de floración (BBCH 60-69) en nuestro estudio presentó una relación bilineal con la temperatura que incluyó una pendiente negativa de  $-0,6$

día/°C para temperaturas inferiores a 23 °C, mientras que la misma fue positiva (5,3 día/°C) por encima de 23 °C (Fig. 2.6B). Periodos de floración más cortos podrían tener consecuencias negativas en la polinización debido a incremento de las asincronías entre cultivares y por ende reducciones en la polinización cruzada y el cuaje de frutos. Sin embargo, es de destacar que esta reducción en la duración se observa justamente a temperaturas donde la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico parece verse más favorecida (Dias et al., 2022). Por otra parte, es probable que el incremento en la duración del periodo BBCH 60-69 a temperaturas medias diarias mayores a 23°C (para algunas localidades x temporada) esté relacionado con la ocurrencia de un mayor número de horas con temperaturas muy cálidas (por ejemplo, superiores a 33°C) las cuales posiblemente están por encima de la temperatura óptima para el desarrollo reproductivo generando un alargamiento en el periodo. Siendo que el periodo de floración es crítico para el rendimiento y altamente susceptible a eventos adversos (ej. ola de calor, viento zonda, ataque de plagas) un alargamiento del mismo y por ende de la exposición a estos factores podría implicar un incremento de los riesgos para la producción. Al respecto, se observó un aumento en la duración del período de floración en un año cálido en comparación con un año frío en la región templada húmeda de Uruguay (Conde-Innamorato et al., 2019). No siempre se ha encontrado una relación significativa entre la duración del período de floración y la temperatura del aire (Di Paola et al., 2021). Sin embargo, la mayoría de los estudios previos apoyan un período de floración más corto con temperaturas crecientes en condiciones generales de temperaturas frescas a moderadas (Rallo y Cuevas 2017). Experimentos de calentamiento controlados que utilicen cámaras de techo abierto podrían mejorar nuestra comprensión de la respuesta de la floración a regímenes de temperatura específicos y

contribuir a comprender qué otros factores (p. ej., estado hídrico, nutrición, carga frutal) afectan la fenología del olivo.

## **2.5. Conclusiones**

Esta es una primera aproximación a las respuestas fenológicas primaverales en olivo a diferentes temperaturas ambientales a lo largo de un gradiente latitudinal y un rango de altitudes en un clima no mediterráneo con marcada estacionalidad. La variabilidad en la fecha de los estadios reproductivos se explicó por el ambiente (localidad y temporada de crecimiento) más que por el cultivar, todos los estadios ocurrieron más temprano en latitudes o altitudes bajas. Una diferencia de temperatura de 5,5°C durante el invierno, repercutió a principios de primavera adelantando el período de plena floración en 26 días en la localidad más cálida. En contraste, el desarrollo de las primeras hojas se produjo en un período mucho más estrecho, pero la duración de la elongación de los brotes fue muy variable. Las duraciones de los períodos de emergencia de la inflorescencia y de floración se acortaron a medida que aumentó la temperatura media del aire en la mayoría de los casos, aunque la floración fue más prolongada a temperaturas superiores a 23 °C. Las observaciones presentadas aquí podrían ser útiles para una mejor planificación de las prácticas de manejo y para el desarrollo de modelos fenológicos que incluyan ambientes no mediterráneos.

## **CAPITULO III**

### **Respuesta de la fenología reproductiva y vegetativa de dos cultivares de olivo al calentamiento primaveral**

### 3.1 Introducción

Numerosas regiones olivícolas del mundo se encuentran en áreas geográficas cálidas y áridas donde la producción es susceptible de ser afectada negativamente por aumentos de la temperatura esperados debido al cambio climático (Cabezas et al., 2020; Elloumi et al., 2020; Torres et al., 2017). Las proyecciones climáticas apuntan a mantener el aumento de la temperatura global entre 1,5 y 2°C en las próximas décadas para evitar consecuencias severas en ecosistemas agrícolas (IPCC, 2018). Sin embargo, dentro de los escenarios potenciales se encuentran aumentos por encima de 4°C (IPCC, 2021). Por lo tanto, es necesaria investigación que sienta las bases para generar estrategias de adaptación en cada región productiva frente a estos posibles escenarios de aumento en la temperatura (Fraga et al., 2021).

En Argentina, el cultivo de olivo está concentrado en las regiones del centro-oeste y el noroeste con aproximadamente 77 mil hectáreas plantadas y en producción (INDEC, 2021). Durante el último siglo la temperatura ha aumentado aproximadamente 0,6° C en la región andina argentina (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015) y se espera que alcance un aumento de 2°C entre 2015-2039 y hasta de 2-7°C entre 2075-2099 dependiendo del escenario de emisiones de gases de efecto invernadero (Cabré y Núñez, 2020). Estas regiones tienen mayores temperaturas medias durante la primavera que la Cuenca Mediterránea donde el olivo fue cultivado tradicionalmente en una latitud más baja y en un clima menos continental (Capítulo 2, Fig. 2.3; Searles et al., 2011). Por otro lado, la temperatura media para La Rioja a lo largo de los últimos 60 años ha mostrado un aumento debido al calentamiento global que es más marcado para los meses de primavera que para las demás estaciones del año (Capítulo 1, Fig. 1.1). Entonces, incrementos adicionales de las

temperaturas en primavera podrían tener efectos críticos para la fenología reproductiva y vegetativa.

Al igual que en otros árboles frutales templados, en olivo las temperaturas del invierno y de la primavera determinan la fecha de salida del reposo invernal de las yemas reproductivas (Hackett y Hartmann, 1964; Osborne et al., 2000; Luedeling et al., 2021). El frío invernal propicia la ruptura de la endodormancia en las yemas al cumplirse los requerimientos de cada cultivar, mientras que las temperaturas primaverales posteriores definen la fecha de floración (Chuine, 2000; Rallo y Cuevas, 2017). Por ejemplo, la fecha de plena floración se adelantó con el aumento de las temperaturas medias de la primavera analizando el momento de máxima concentración de polen en el aire a lo largo de una serie larga de años en Italia (Bonofiglio et al., 2009). Estudios en diferentes ambientes mostraron que las temperaturas de los meses de marzo a mayo (hemisferio norte) fueron los mejores predictores de la fecha de inicio de desarrollo de la inflorescencia y de plena floración (Aguilera et al., 2015; Oteros et al., 2013; Pérez-López et al., 2008). Además, la plena floración se adelantó entre 18 y 24 días con un aumento de 4 °C durante todo el ciclo reproductivo al calentar olivos en cámaras de techo abierto (open top chambers, OTCs) (Benlloch-González et al., 2018). Por esto, los modelos fenológicos utilizados para olivo consideran la suma de tiempo térmico como uno de los parámetros principales para predecir la fecha de floración (De Melo-Abreu et al., 2004; Elloumi et al., 2020; Orlandi et al., 2006).

Entender los procesos biológicos y la temporalidad de los eventos fenológicos previos a la plena floración es de importancia porque inciden en la intensidad de la floración y esta a su vez define, en gran parte, la producción al final de la temporada (Rapoport, 2014a). En olivo, los periodos: brotación vegetativa - floración y brotación reproductiva – floración se

acortaron con el aumento de temperatura en una serie de observaciones a campo en 7 localidades de Italia a lo largo de 6 años (Di Paola et al., 2021). De modo similar en el género *Populus* se observó una disminución en la duración del período entre la apertura de yemas reproductivas y la floración, y también en la duración del período entre despliegue de hojas y la floración en condiciones controladas de calentamiento (Wang et al., 2022). En el centro-oeste y noroeste de Argentina, hemos observado comparando localidades que la duración del periodo entre la apertura de yemas reproductivas y el inicio de floración se acortó 4.3 días por cada grado °C de aumento en la temperatura media diaria entre el fin del invierno y la primavera (Capítulo 2). Además, el periodo entre inicio y fin de floración se acortó con el incremento de temperatura media por debajo de un umbral de 23°C, pero se alargó por encima del mismo (Capítulo 2, Fig. 2.6A, B). En general, el incremento de la temperatura ambiental se asocia también con acortamientos en la duración de la floración (Rallo, 1997) o incrementos en la tasa de desarrollo durante el período (Di Paola et al., 2021) y con una declinación acelerada en la fertilidad de las flores (Vuletin-Selak et al., 2014a). Sin embargo, otros resultados por el contrario indican un alargamiento en la duración de la floración de entre 5 y 7 días con un aumento de 4°C (Benlloch-González et al., 2018). En este sentido, nuevas evidencias en condiciones ambientales diferentes son importantes para comprender la incidencia de incrementos en la temperatura sobre la duración de la floración.

Además de la plena floración, el cuaje y los estadios posteriores de desarrollo del fruto son importantes en términos productivos. El cuaje es crucial para establecer el número de frutos, mientras que el endurecimiento de carozo es importante pues se asocia con el momento de inicio de la acumulación de aceite (Conde et al., 2008; López-Bernal et al., 2021). En un gradiente altitudinal, el tiempo entre floración y endurecimiento de carozo y

posteriormente entre endurecimiento de carozo y envero (i.e., cambio de color del fruto hacia morado) se acortó en localidades más frías (Mafrica et al., 2021). Aunque el tamaño del fruto está determinado en gran parte por su genética, la interacción genotipo x ambiente y el ambiente explicaron aproximadamente 30% de la variabilidad de peso en 113 cultivares de varios continentes evaluados en varios sitios de la cuenca del Mediterráneo y en el oeste de Argentina (Mousavi et al., 2019). En un experimento manipulativo, el peso seco disminuyó más en el cv. Coratina que en el cv. Arbequina en árboles jóvenes calentados 4°C por encima de la temperatura control (similar al ambiente) durante el verano-otoño (Miserere et al., 2022). En relación a la influencia de la temperatura primaveral sobre el desarrollo del fruto, la información en olivo es escasa. Sin embargo, mayores acumulaciones de tiempo térmico durante los primeros 30-90 días posteriores a floración pueden resultar en adelantos en el desarrollo del fruto y reducciones en su tamaño final en frutales caducos (DeJong, 2015; Tombesi et al., 2010). En olivo, adelantos en el desarrollo del fruto que desplacen la síntesis de aceite del otoño hacia el verano, podrían exponer esta etapa a condiciones de mayor temperatura. Dicha exposición a mayores temperaturas tendría a su vez consecuencias sobre el tamaño del fruto, la concentración y calidad de aceite (García-Inza et al., 2014, Miserere et al., 2022)

Es esperable que la temperatura primaveral tenga un efecto sobre la fecha de brotación de yemas vegetativas. Un estudio previo observó que para olivos en reposo invernal de 1-2 semanas bajo temperaturas cálidas (>20°C) son suficientes para el inicio de la brotación (López-Bernal et al., 2020). Además, sobre un gradiente latitudinal en Argentina, mayores temperaturas se asociaron a una mayor proporción de la elongación final de ramas antes de floración en la primavera (Capítulo 2, Fig. 2.6D). Información adicional sobre

brotación y elongación ante diferentes niveles de temperatura en experimentos manipulativos de calentamiento sería importante para comprender mejor las respuestas vegetativas a la temperatura.

Consideramos que un aumento en la temperatura de la primavera, independientemente de la temperatura durante el resto del año, puede tener un efecto importante adelantando la fenología del olivo y acortando los periodos de desarrollo. Para probar dicha hipótesis es necesario un calentamiento diferencial, exclusivamente durante dicha estación, una vez ya producida la ruptura de la endolencia y manteniendo fijos otros parámetros ambientales. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es evaluar el momento de ocurrencia de los estadios fenológicos reproductivos y vegetativos y la duración de los períodos de desarrollo en dos cultivares de olivo, comparando árboles mantenidos a una temperatura control similar a la ambiental ( $T_0$ ) y árboles calentados ( $+4^\circ\text{C}$  por encima del control;  $T_+$ ) entre fines del invierno y la primavera.

## **3.2 Materiales y Métodos**

### **3.2.1 Material vegetal y sitio experimental**

En un experimento manipulativo se calentaron a campo plantas enteras de olivo durante la primavera (agosto-diciembre) de los años 2018 y 2019. El material vegetal utilizado consistió en plantas de 2 y 3 años (primera y segunda temporada de experimento respectivamente) de dos cultivares (cv.) de olivo: Arbequina y Coratina, ampliamente difundidos en la Argentina y a nivel internacional. Trabajos previos han observado diferencias entre dichos cultivares en cuanto a vigor (Vivaldi et al., 2015), y respuesta del peso del fruto y concentración de aceite a la temperatura ambiente (Miserere et al., 2022). Los plantines fueron obtenidos a partir de propagación por esquejes en un vivero comercial

de la zona (San Gabriel S.A., La Rioja, Argentina), criados en macetas de 5 L durante un año y posteriormente se trasladaron al campo experimental de CRILAR-CONICET (Anillaco, La Rioja).

La zona donde se encuentra localizado el campo experimental presenta un clima templado, árido y continental, con elevadas amplitudes térmicas diarias. En el campo experimental los plantines fueron trasplantados a macetas de 30 L con un sustrato de suelo arenoso: turba: perlita (1:1:0,1). Los requerimientos hídricos fueron calculados sobre la base de la relación entre el flujo de savia y la temperatura (Rousseaux et al., 2009) y se añadió un 30% de riego adicional para compensar la evaporación del suelo. La fertilización se realizó mensualmente de manera manual con macronutrientes (15 N: 15 P: 15 K) incorporando superficialmente el granulado al sustrato y de manera quincenal con micronutrientes (B, 0,02% Cu, 0,01%; Fe, 3%; Mn, 1%; Zn, 1%, Mo, 0,007%) + Mg 3% + aminoácidos libres 5% + nitrógeno 2,8% (Aminoquelant minors, España) por pulverización aérea a razón de 1 ml de producto por planta diluido de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

### **3.2.2 Tratamientos y diseño experimental**

Durante el invierno todas las plantas permanecieron en el campo experimental a temperatura ambiente, siendo cubiertas con tela antihelada durante los días en que se pronosticaban heladas meteorológicas. Los tratamientos de temperatura se aplicaron a las plantas en maceta durante la primavera, en el año 2018 entre los días 15/8 y 4/12 (DOY 227-338) y en el año 2019 entre el 9/8 y el 29/11 (DOY 221-333). El experimento tuvo un diseño factorial completamente aleatorizado cuyos factores fueron: temperatura y cultivar. Los niveles de temperatura fueron: control (T0) y calentado (T+), siendo el objetivo del tratamiento calentado aumentar la temperatura aproximadamente 4°C por encima de T0. Se

utilizaron 8 unidades experimentales de cada cultivar de las cuales 4 fueron utilizadas como control, T0, y 4 expuestas a temperatura elevada, T+, (4 repeticiones, n=4). Luego de la fecha de finalización todas las plantas permanecieron nuevamente a temperatura ambiente en el vivero del campo experimental.

Para lograr los tratamientos de temperatura se utilizaron cámaras con el techo abierto (open top chambers: OTC) compuestas por estructuras metálicas de hierro (1,5m x 1,5m x 2m) recubiertas por plástico transparente (polietileno 100 $\mu$ m). Las OTC utilizadas para el tratamiento T+ estuvieron además provistas de dos sistemas de calefacción complementarios. El primero, constaba de un túnel de plástico transparente con rocas negras en su interior. Las rocas aumentaron su temperatura y la del aire dentro del túnel por acción de la radiación solar mientras que un sistema de convección empujó el aire caliente del túnel hacia el interior de la OTC. Este fue responsable de la mayor parte del calentamiento durante el día en días soleados. Un segundo sistema fue necesario para mantener la diferencia de temperatura buscada particularmente durante la noche y en los días nublados. Este constaba de un calefactor eléctrico conectado a la OTC mediante un tubo plástico de 110 mm de diámetro. Un sistema de control provisto de sensores de temperatura (controlador de temperatura, Cavadevices, Argentina) ejecutaba el encendido de los calefactores siempre que la diferencia de temperatura en una determinada OTC T+ y una OTC T0 de referencia cayera por debajo de los 4°C. Las OTC T0 estuvieron provistas de un sistema de ingreso de aire exterior por convección para la ventilación, pero sin ningún sistema de calentamiento (Fig. 3.1). Mayores detalles sobre el sistema de calentamiento y control de temperatura y su impacto sobre otras variables ambientales fueron descriptos por Miserere et al., (2019). Este dispositivo experimental permite aislar el efecto propio de la temperatura sobre la fenología manteniendo

constantes otros factores ambientales (disponibilidad hídrica, humedad absoluta, concentración de CO<sub>2</sub>, nutrición etc.).

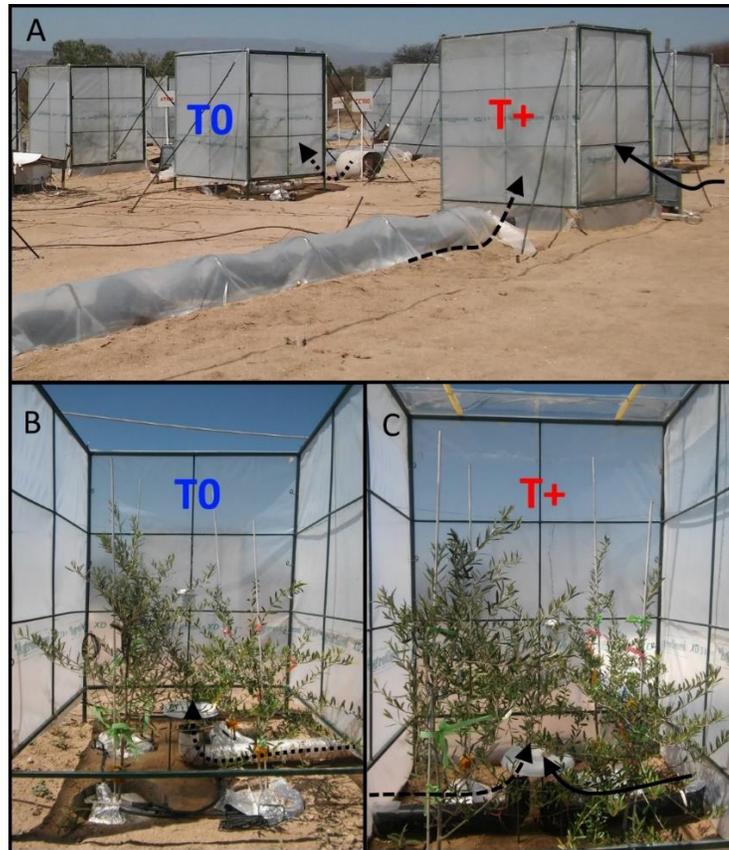


Figura 3.1- Vista parcial del campo experimental donde se observa una OTC T0 (control) y una OTC T+ (calentada) (A). Con flecha punteada se indica el ingreso de aire a temperatura ambiente por la parte trasera de la OTC T0, con flecha de guiones se indica el ingreso de aire calentado a través de un túnel de piedras negras recubierto por PVC a la parte delantera de la OTC T+, y con flecha llena el ingreso de aire a través de un calefactor eléctrico a la parte trasera de la OTC T+. En (B) se presenta una vista interior de una OTC T0 con 4 plantas en maceta las cuales fueron utilizadas para las observaciones descritas en este capítulo; ídem en (C) para una OTC T+.

En cada una de las OTC se midió la temperatura cada 15 minutos utilizando sensores de temperatura (Cavadevices, Argentina) colocados a 1m por encima del suelo de la OTC y protegidos por un cobertor de radiación con aislamiento térmico y papel aluminizado en su exterior. Los sensores se encontraban conectados a un almacenador de datos de 16 canales (Cavadevices, Argentina) el cual registraba los datos para su posterior análisis. La temperatura ambiente exterior a las OTCs (Amb) fue medida de forma similar en el vivero

del campo experimental. Utilizando los datos de la temperatura  $Amb$ , se calcularon las unidades de frío (CU) acumuladas previo al inicio de los tratamientos según el modelo ajustado por De Melo-Abreu et al., (2004)

### **3.2.3 Observaciones fenológicas**

Se tomaron observaciones fenológicas periódicas de acuerdo con la escala BBCH adaptada para olivo (Sanz Cortes et al., 2002). Las mismas fueron realizadas por un único observador durante toda la temporada, la cual comenzó en el mes de agosto (inicio de los tratamientos) y se extendió hasta fines noviembre (final de la floración) con una frecuencia de 4 días. Se realizaron observaciones simultáneas de estadios vegetativos de desarrollo de las hojas (BBCH 07-19) y las ramas (BBCH 31-37), y de estadios reproductivos de emergencia de la inflorescencia (BBCH 50-59) y floración (BBCH 60-69). Para determinar los estadios fenológicos relativos al desarrollo del fruto se realizaron cosechas sucesivas de 15 frutos por planta desde finales de noviembre hasta mediados de junio a intervalos de 5-10 días, con excepción de mitad del mes de enero y el mes de febrero en los que no se esperaba la ocurrencia de un cambio de estadio fenológico. Esto solo fue posible en la temporada 2019-2020 ya que en 2018-2019 el bajo número de frutos por planta no permitió el correcto seguimiento de la metodología. De los estadios observados, los siguientes fueron utilizados en los análisis: BBCH 11, primeras hojas completamente separadas y de un color verdoso-grisáceo, BBCH 37, las ramas alcanzas el 70% de su largo final; BBCH 53, apertura de la yema floral; BBCH 57, inflorescencias expandidas y con corolas color verde; BBCH 60, primeras flores abiertas; BBCH 65, 50% de las flores abiertas o plena floración, BBCH 69 mayoría de las flores con pétalos caídos, final de la floración, cuaje del fruto; EC, endurecimiento del carozo o endocarpo y PSF50, momento en que el fruto alcanza la mitad

de su peso seco final. En el Cap. II (Fig. 2.4) se presentan fotos y dibujos de algunos de estos estadios.

Las observaciones fenológicas de los estadios vegetativos tempranos se realizaron periódicamente cada 4 días entre el inicio de los tratamientos (agosto) y el momento en que todos los primeros pares de hojas alcanzaron el tamaño y forma típico de las hojas completamente desarrolladas (finales de septiembre). Para el seguimiento se utilizaron cinco ramas marcadas por planta. Visualmente se le asignó a cada rama un estadio fenológico vegetativo en cada fecha según la escala BBCH adaptada para olivo (Sanz Cortes et al., 2002). El estadio vegetativo general de una planta para una fecha se calculó como el promedio entre los estadios de las cinco ramas observadas. A partir de estas observaciones se determinó para cada planta la fecha de ocurrencia del estadio BBCH 11 (primer par de hojas completamente separadas) el cual tomamos como indicador del inicio del desarrollo vegetativo. En los casos en que éste ocurrió entre dos fechas de observación sucesivas se determinó por interpolación lineal. Sobre las mismas ramas se realizó una marca con tinta sobre el tallo por debajo del meristema apical previo al inicio de los tratamientos. A partir del inicio de los tratamientos se midió periódicamente la elongación de las ramas entre la marca inicial y el meristema apical comenzando a mediados del mes de agosto y finalizando en mayo del siguiente año. Con estas medidas se determinó la fecha en que cada planta llegó en promedio al 70% de elongación de ramas (BBCH 37). Se calcularon las medias y el error estándar de las fechas de BBCH11 y BBCH37 para cada temporada, cultivar y tratamiento térmico.

Los estadios reproductivos de desarrollo de inflorescencias y floración fueron observados sobre cuatro brindillas (i.e., rama del año anterior) por planta elegidas al azar y

marcadas al inicio de la temporada y se repitieron cada 4 días, frecuencia suficiente que minimiza el desvío en las observaciones según Oteros et al., (2013). El estadio general de cada planta en una fecha particular se determinó como el promedio de los estadios observados en dichas cuatro brindillas. Cuando un estadio determinado ocurrió entre dos fechas de observación se utilizó interpolación lineal para estimar la fecha de ocurrencia (Rojo y Pérez-Badia, 2015). Para cada uno de estos estadios la fecha media de ocurrencia y su error estándar fueron calculados para cada combinación de temporada x cultivar x tratamiento.

El primer estadio de desarrollo del fruto observado fue el endurecimiento de carozo (EC). Para su determinación se realizó un corte transversal de los frutos frescos con cuchilla para determinar la fuerza necesaria para el corte del endocarpo en esclerificación durante las primeras cosechas según la metodología de Presicce (2015). La fuerza fue registrada con un valor de 0 (corte sin resistencia) a 3 (carozo endurecido, imposible cortar manualmente) para cada fruto (Fig. 3.2). La fuerza de corte para una planta en una fecha fue determinada como el promedio de la fuerza de corte de los 15 frutos. A los fines de este trabajo se estableció como fecha de EC aquella en la que el promedio de los frutos de la muestra correspondiente a una planta alcanzaba un valor de fuerza de corte superior a 2,5. Esta metodología se corresponde con la descripción del endurecimiento de carozo como un proceso en forma de sigmoide (Fig. 3.3). En función de los días postfloración el endurecimiento progresa lentamente en primera instancia y a luego de una fecha de inflexión llega rápidamente a su punto de máxima resistencia (Rapoport et al., 2013). Si bien la fuerza de corte registrada con el máximo valor (3) no se corresponde necesariamente con la máxima dureza alcanzable por el carozo (150MPa), ésta constituye una medida estandarizada entre los observadores a fin

de comparar el momento en que los frutos de distintos tratamientos alcanzaron un mismo estadio.

El segundo estadio de desarrollo de los frutos observado fue la fecha en que se alcanzó la mitad del peso seco final de los frutos (PSF50). Luego de cada cosecha los frutos se secaron en estufa a 70°C durante 3 días y se determinó el peso seco. El máximo peso seco alcanzado para cada tratamiento térmico x cultivar se determinó gráficamente y se calculó la mitad de dicho valor para cada una de las plantas (PSF50). La fecha en que se alcanzó PSF50 en cada planta se estimó por interpolación lineal entre el peso observado inmediato anterior y posterior. Luego se calculó la fecha media para EC y PSF50 y su correspondiente error estándar para cada temporada x cultivar x tratamiento térmico. Cabe aclarar que de acuerdo a la escala fenológica BBCH para olivo el estadio BBCH75 engloba tanto EC como PSF50. Si bien luego del endurecimiento del endocarpo la pulpa del fruto sigue aumentando su tamaño (Rapoport et al., 2013) no está claro que los dos estadios mencionados se correspondan necesariamente en el tiempo. Por lo tanto, a los efectos de este estudio decidimos tomarlos como variables separadas.

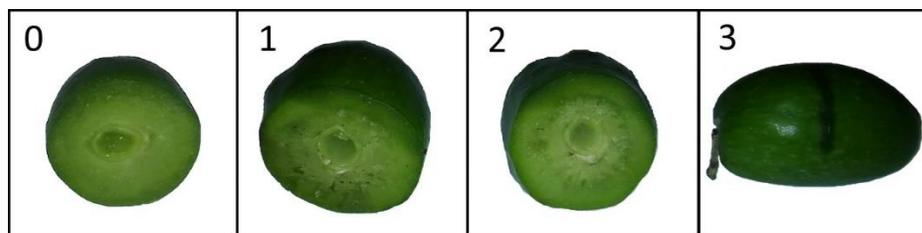


Figura 3.2-Cortes de frutos mostrando el avance de la esclerificación del endocarpo y su relación con los grados de resistencia al corte. Los grados de dureza o resistencia al corte según la metodología de Presicce et al. (2015) son: 0- Sin resistencia al corte, 1-baja resistencia al corte, 2- alta resistencia al corte, 3- impedimento de corte con la cuchilla utilizada.

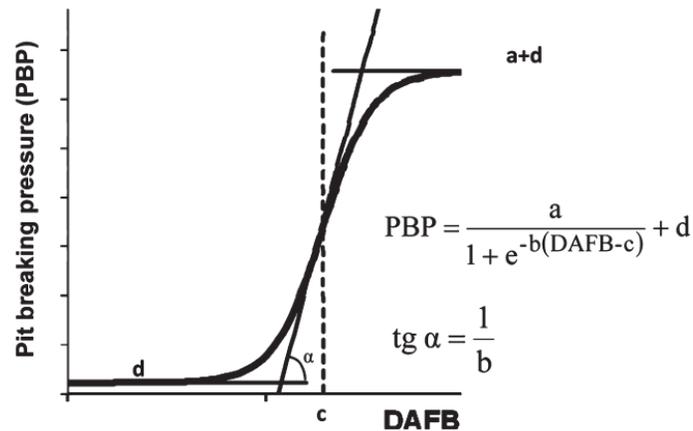


Figura 3.3– Dinámica teórica del endurecimiento de carozo medida como presión requerida para el quiebre de carozo (PBP, por sus siglas en inglés) en función de los días a partir de plena floración (DAFB). Fuente: Rapoport et al. (2013).

### 3.2.4 Análisis Estadísticos

Para determinar el efecto del tratamiento térmico y el cultivar sobre la fecha de ocurrencia de cada uno de los estadios fenológicos, sobre la duración de los períodos entre dos estadios reproductivos y sobre la duración de los periodos vegetativo-reproductivos se realizaron ANOVA factoriales particionados por temporadas con factores: tratamiento térmico (temp) y cultivar (cv) incluyendo el efecto de la interacción entre ambos (int). Para separar el efecto del tratamiento dentro de cada cultivar se realizó un post-test LSD-Fischer. Las temperaturas durante todo el periodo de tratamientos dentro de las OTCs fueron analizadas con un ANOVA de medidas repetidas (IBM SPSS Statistics Versión 29.0.1.0) versión para determinar si las diferencias entre tratamientos y años fueron estadísticamente significativas considerando la fecha y la temporada como factores intra-sujeto y el tratamiento térmico como factor inter-sujeto. Previamente a cada análisis fue verificado el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza. Se utilizó el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2016).

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Temperatura

Durante el otoño-invierno (abril-julio), la temperatura ambiente a la cual se encontraban expuestas las plantas fue en promedio de 13,7°C en 2018 y de 16,4°C en 2019 (Fig. 3.4). Los días 11 de junio de 2018 y 18 de junio de 2019 fueron los días con menores temperaturas medias registradas de 3,6°C y 4,4°C respectivamente. Según el modelo de De Melo-Abreu et al. (2004), las unidades de frío invernal acumuladas hasta el inicio de los tratamientos fueron de 931 CU y 1200 CU para 2018 y 2019 respectivamente. Estos valores serían superiores a los requeridos para una floración normal en todos los cultivares analizados hasta el momento según el mismo modelo.

El sistema de OTCs y el de calentamiento activo permitieron observar el desarrollo de las plantas de olivo bajo dos niveles de temperatura diferentes a través de los tratamientos control (T0) y calentado 4°C por encima del control (T+) conservando la dinámica estacional de la temperatura semejante a la temperatura exterior a las OTCs (Amb) (Fig. 3.4). Durante el periodo calentado (agosto a noviembre) la temperatura en el tratamiento T0 fue en promedio de 0,25°C mayor a la temperatura Amb. En 2018, se observó que la temperatura media diaria promedio del periodo de tratamiento fue de 24°C para T+, 4,0 °C por encima de T0 ( $p < 0,05$ ). En 2019 la temperatura fue de 22,3°C para T+, 3,2°C por encima de T0 ( $p < 0,5$ ). En 2018 la temperatura media en las OTCs fue significativamente ( $p < 0,05$ ) mayor que en 2019 para el tratamiento calentado, en cambio no se observó diferencia entre temporadas para el tratamiento control.

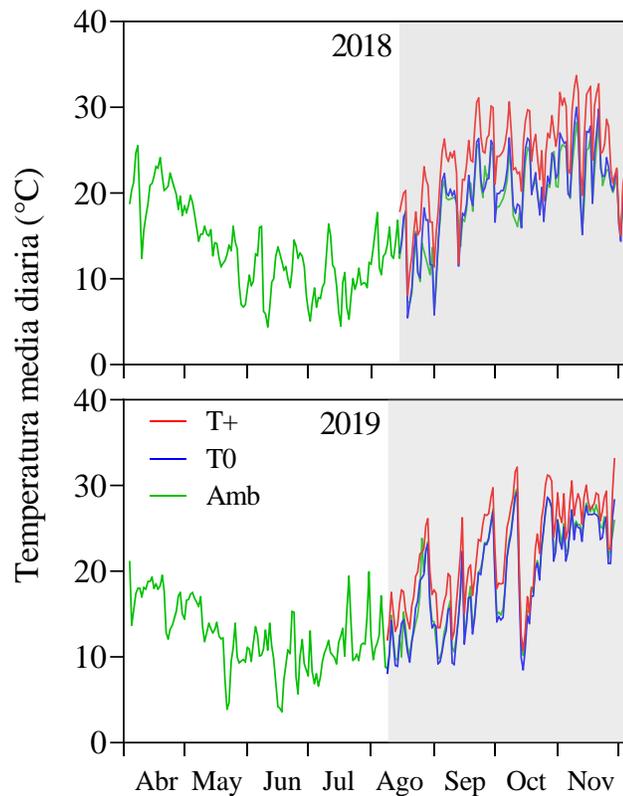


Figura 3.4– Temperatura media diaria (°C) en los meses previos y durante el período bajo tratamiento térmico, para el ambiente fuera de las OTCs (verde), el promedio para las OTCs calentadas T+ (rojo; n=8) y el promedio para las OTCs control T0 (azul; n=8). El área sombreada indica el período bajo tratamiento.

### 3.3.2 Impacto del calentamiento sobre la fenología

El calentamiento estuvo asociado a un adelanto en la mayoría de los estadios fenológicos tanto reproductivos como vegetativos observados en ambos cultivares (Fig. 3.5). Para los estadios del desarrollo de la inflorescencia y floración en la temporada 2018-2019, este adelanto fue estadísticamente significativo ( $p < 0,05$ ), con excepción de algunos de los estadios más tempranos (Cuadro 3.1). Además, la diferencia entre T+ y T0 en la fecha de los distintos estadios fue aumentando a medida que progresó la temporada. Por ejemplo, para cv. Arbequina BBCH53 tendió a ocurrir 4 días antes en T+ que T0 ( $p = 0,39$ ), mientras que el adelanto fue de 12 días para BBCH60 ( $p < 0,05$ ) y de 22 días para BBCH 69 ( $p < 0,05$ ). Algo

similar ocurrió en el cv. Coratina. El comportamiento fue similar en la temporada 2019-2020 pero con diferencias significativas entre T+ y T0 también para los estadios tempranos (Cuadro 3.1). En relación al cultivar, sólo se observó un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en la fecha de los estadios de desarrollo de la inflorescencia (BBCH53 y BBCH 57) y para la temporada 2018-2019, siendo 'Coratina' más temprana que 'Arbequina'.

Con respecto al desarrollo del fruto, evaluado sólo en 2019-2020, el EC ocurrió 11 y 14 días antes en T+ que en T0 para 'Arbequina' y 'Coratina', respectivamente ( $p < 0,05$ ; Cuadro 3.1). El cultivar también tuvo un efecto significativo siendo en promedio 12,5 días más temprano en 'Arbequina' que en 'Coratina' (Cuadro 3.1). Por su parte, la fecha de PSF50 no mostró diferencias entre tratamientos en cv. Arbequina, y resultó más temprana en T+ para cv. Coratina (Cuadro 3.1) aunque esto podría estar explicado por factores diferentes a la temperatura. Para este último estadio se observó un mayor error estándar en comparación con los otros estadios reproductivos (Fig. 3.5).

En cuanto a los estadios fenológicos vegetativos, se observó un adelanto significativo del BBCH11 en T+ durante 2018-2019 pero el efecto no se repitió en 2019-2020, donde este estadio ocurrió en promedio 12,5 días antes que en 2018-2019 (Cuadro 3.2). Además, no se vio un efecto del cultivar consistente entre años. En cuanto al estadio BBCH37, se observó un adelanto de 39 días en T+ con respecto a T0 para el cv. Arbequina T0 ( $p < 0,05$ ), con una tendencia similar en el cv. Coratina durante la temporada 2019-2020. En relación a la comparación entre cultivares, 'Coratina' alcanzó el estadio BBCH37 67 días antes que 'Arbequina' en la temporada 2018-2019, pero esta diferencia podría estar explicada por la muy baja carga de fruta en el cv. Arbequina en esa temporada. En ambos estadios vegetativos, pero particularmente en BBCH37, se observó una alta variabilidad entre plantas,

probablemente explicada en gran parte por una alta variabilidad entre las ramas seleccionadas. Es común en olivo observar alta variabilidad en el crecimiento de ramas vegetativas aún dentro de un mismo árbol.

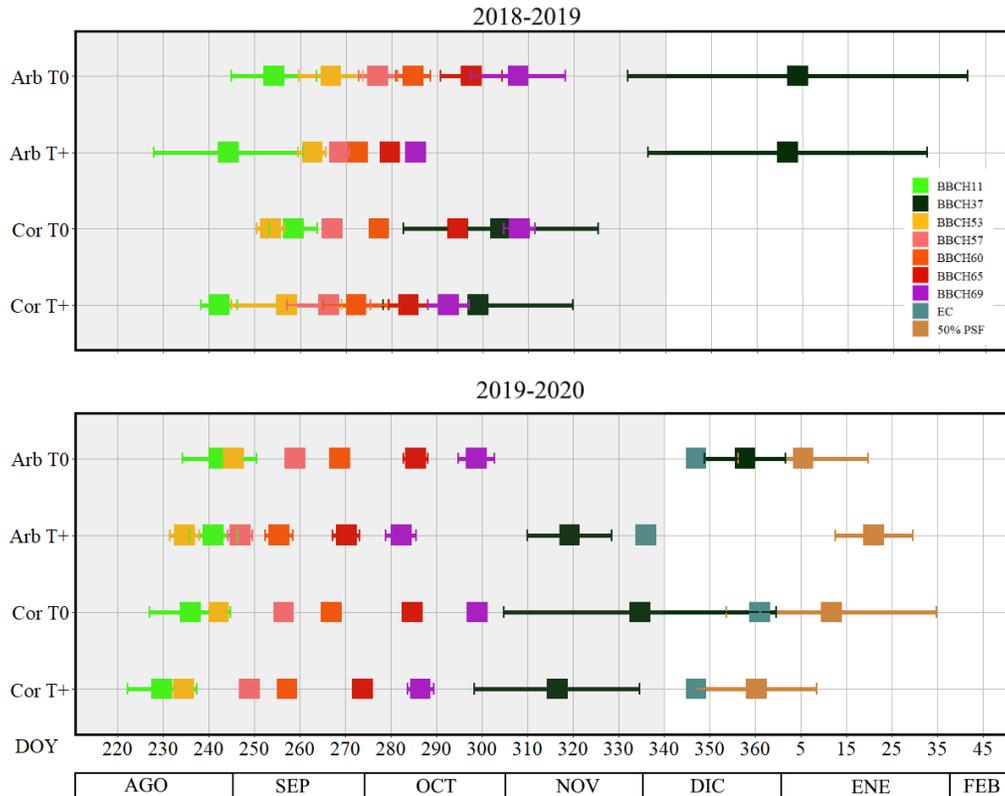


Figura 3.5-Fecha de ocurrencia de estadios reproductivos (BBCH53, 57, 60, 65, 69, EC y PSF50) y vegetativos (BBCH11 y 37) para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (A, 2018-2019; B, 2019-2020). Las fechas están expresadas como día del año (DOY) siendo el día 1 de enero de cada año DOY=1. Estadios fenológicos definidos según la escala BBCH adaptada para olivo (Sanz-Cortés et al., 2002). BBCH 53: apertura de la yema floral, BBCH57: corola color verde, BBCH60: primeras flores abiertas, BBCH65: plena floración, la mitad de las flores abiertas, BBCH69: fin de floración, cuaje de frutos, EC: endurecimiento de carozo y PSF50: frutos con la mitad de su peso seco final, BBCH 37: los brotes vegetativos alcanzan un 70% de su largo final. Se presentan los valores medios  $\pm$  EE (n=4).

Cuadro 3.1–Fecha de ocurrencia (día del año) de estadios reproductivos para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (2018-2019; 2019-2020). Hubo cuatro repeticiones para cada combinación de cultivar x tratamiento térmico x temporada. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando LSD-Fischer ( $p < 0,05$ ). Cada estadio (BBCH53, 57, 60, 65, 69, EC, PSF50) está explicado en la Fig. 3.3.

		Desarrollo inflorescencia		Floración			Desarrollo fruto	
		BBCH53	BBCH57	BBCH60	BBCH65	BBCH69	EC	PSF50
2018-2019	ArbT0	267b	277b	285b	298b	308b		
	ArbT+	263ab	269a	273a	280a	286a		
	CorT0	254a	267a	277a	295b	308b		
	CorT+	257ab	266a	272a	284a	293a		
	temp	ns	ns	*	**	**		
	cv	*	*	ns	ns	ns		
	int	ns	ns	ns	ns	ns		
2019-2020	ArbT0	245b	259b	268b	286b	299b	347b	395a
	ArbT+	235a	247a	256a	270a	282a	336a	399 a
	CorT0	242b	257b	267b	285b	299b	361c	400a
	CorT+	235a	249a	257a	274a	287a	347b	364b
	temp	**	**	**	**	**	**	ns
	cv	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns
	int	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns

Cuadro 3.2–Fecha de ocurrencia (día del año) de estadios vegetativos para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (2018-2019; 2019-2020). Hubo cuatro repeticiones para cada combinación de cultivar x tratamiento térmico x temporada. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando LSD-Fischer ( $p < 0,05$ ). Cada estadio (BBCH11 y 37) está explicado en la Fig. 3.5.

		Desarrollo Vegetativo	
		BBCH11	BBCH37
2018-2019	Arb T0	254 ab	369 b
	Arb T+	244 ab	367 b
	Cor T0	259 b	304 a
	Cor T+	242 a	299 a
	temp	*	ns
	cv	ns	**
	int	ns	ns
2019-2020	Arb T0	242 a	358 b
	Arb T+	241 a	319 a
	Cor T0	236 a	335 ab
	Cor T+	230 a	316 a
	temp	ns	*
	cv	*	ns
	int	ns	ns

Los estadios fenológicos observados permitieron evaluar el efecto del calentamiento primaveral sobre la duración de los períodos entre el inicio del desarrollo vegetativo y el inicio del desarrollo de la inflorescencia (BBCH11-53) y entre el inicio del desarrollo vegetativo y la plena floración (Período BBCH11-65, Cuadro 3.3). En nuestro experimento el estadio BBCH11 ocurrió en promedio sólo 7 días antes que el BBCH53 (Fig. 3.5) y la duración de este período no fue afectada ni por el calentamiento ni por el cultivar (Cuadro 3.3). En cambio, el período BBCH11-65 tuvo una duración de entre 30 y 49 días en nuestros ensayos, siendo significativamente menor ( $p < 0,05$ ) en T+ que en T0 para cv. Arbequina en la temporada 2019-2020. A su vez, la duración en Arbequina fue en promedio menor que en Coratina.

Cuadro 3.3– Duración media de los periodos (días) entre el estadio BBCH11 y dos estadios reproductivos: BBCH53 (BBCH11-53) y BBCH65 (BBCH11-65) para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (2018-2019 y 2019-2020). Hubo cuatro repeticiones para cada combinación de cultivar x tratamiento térmico x temporada. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando LSD-Fischer ( $p < 0,05$ ) Cada estadio (BBCH11, 53, 65) está explicado en la Fig. 3.5.

		Período (días)	
		BBCH11-53	BBCH11-65
2018-2019	Arb T0	13	44
	Arb T+	22	39
	Cor T0	-5	36
	Cor T+	15	42
	temp	ns	ns
	cv	ns	ns
	int	ns	ns
2019-2020	Arb T0	3	42 b
	Arb T+	-6	30 a
	Cor T0	7	49 b
	Cor T+	5	44 b
	temp	ns	*
	cv	ns	*
	int	ns	*

### 3.3.3 Impacto del calentamiento sobre los períodos determinantes del rendimiento

En ambas temporadas observamos que el calentamiento primaveral redujo significativamente ( $p < 0,05$ ) la duración del período entre apertura de la yema floral y floración (BBCH53-60) para el cv. Coratina (Fig. 3.6). Éste se redujo 8 y 2 días en T+ con respecto a T0 para las temporadas 2018-2019 y 2019-2020 respectivamente. Resultados similares se observaron para el período entre inicio y fin de floración (BBCH60-69) el cual se redujo significativamente ( $p < 0,05$ ) 3 y 10 días en T+ con respecto a T0 en 2018-2019 y 2019-2020, respectivamente. Tendencias similares se observaron para el cultivar Arbequina, aunque sin diferencias significativas entre tratamientos térmicos al realizar el post-test LSD-

Fischer. El cultivar y la interacción entre ambos factores evaluados no tuvieron efecto sobre la duración de ninguno de los períodos.

En cuanto a desarrollo del fruto, el periodo entre fin de floración y endurecimiento de carozo (BBCH69-EC) ocurrió en su mayor parte durante la aplicación de los tratamientos y el período entre endurecimiento de carozo y la mitad del seco del fruto (EC-PSF50) luego de finalizados los mismos. El período BBCH69-EC se alargó significativamente ( $p < 0,05$ ) 6 días en el tratamiento T+ con respecto a T0 en cv. Arbequina (Fig. 3.7). A su vez se observó un efecto significativo del cultivar, siendo el periodo más largo en cv. Coratina. La duración de EC-PSF50 no tuvo diferencias significativas entre T+ y T0 para ninguno de los cultivares (Fig. 3.7) aunque en cv. Coratina se observa una tendencia a acortar el periodo en T+ (Fig. 3.7).

Figura 3.6- Duración (días) de las fases fenológicas de desarrollo de la inflorescencia (A, B; BBCH 53-60) y floración (C, D; BBCH 60-69) para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (2018-2019 y 2019-2020). Hubo cuatro repeticiones para cada combinación de cultivar x tratamiento térmico x temporada. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando LSD-Fischer ( $p < 0,05$ ). Cada estadio (BBCH 53,60,69) está explicado en la Fig. 3.5.

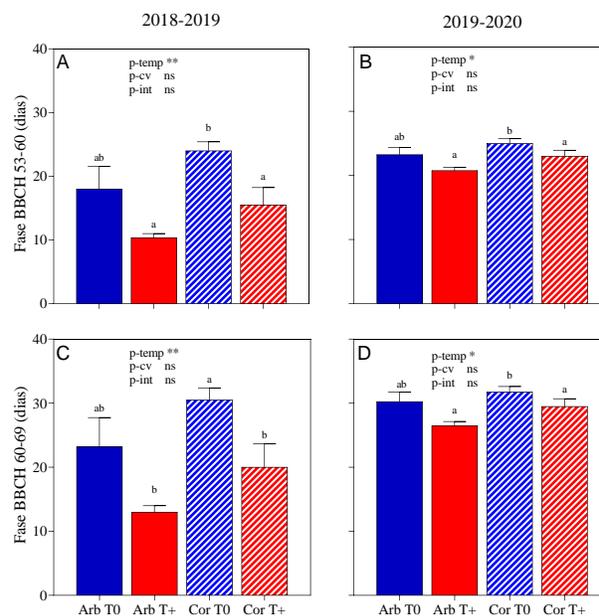
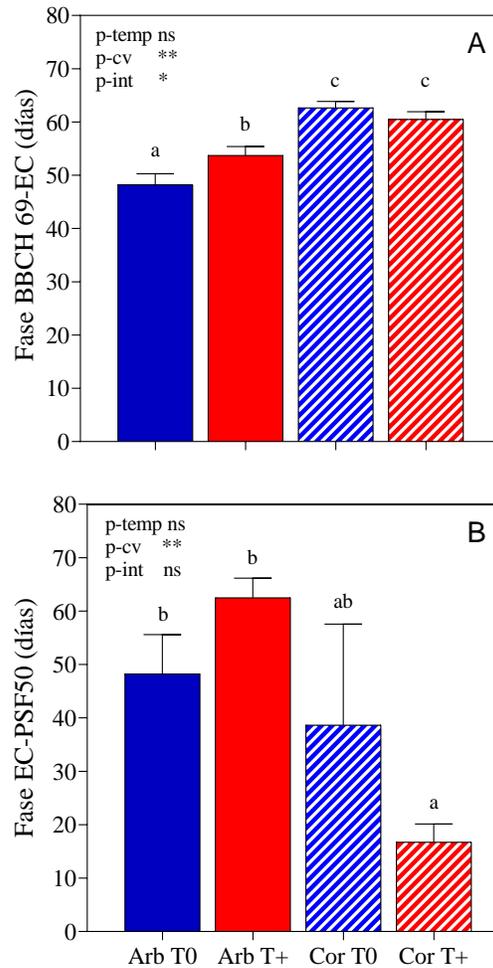


Figura 3.7- Duración (días) de las fases fenológicas de desarrollo del fruto entre final de la floración y endurecimiento de carozo (A, BBCH69-EC) y endurecimiento de carozo – mitad del peso seco del fruto (B, EC-PSF50) para dos cultivares (Arbequina y Coratina) y dos tratamientos térmicos (T+ y T0) durante dos temporadas (2018-2019 y 2019-2020). Hubo cuatro repeticiones para cada combinación de cultivar x tratamiento térmico x temporada. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando LSD-Fischer ( $p < 0,05$ ). Cada estadio (BBCH 69, EC, PSF50) está explicado en la Fig. 3.5.



### 3.4 Discusión

La inducción floral en olivo requiere de cierta acumulación de frío invernal sobre las yemas aparecidas en la temporada previa, seguido por un período durante el cual la temperatura modula la tasa de desarrollo y crecimiento de las yemas florales y se relaciona en forma positiva con la respuesta (López-Sáez et al., 1966, Körner, 2003). Así, el modelado

de la respuesta a la temperatura de la floración propuesto por De Melo-Abreu (2004) presenta una fase de acumulación de frío seguido por una fase de forzado durante la cual se acumula un cierto tiempo térmico. En el presente trabajo, el calentamiento se realizó luego de la acumulación de frío invernal, los valores de frío acumulados durante ambas temporadas se consideran ampliamente suficientes para una floración normal (931 y 1200 CU para la primera y segunda temporadas respectivamente) según el modelo propuesto por De Melo-Abreu et al. (2004). Considerando satisfechos los requerimientos de frío, podemos decir que el presente trabajo es el primer estudio experimental en indagar específicamente los efectos de un aumento en la temperatura de primavera sobre la fenología reproductiva y vegetativa en olivo, independientemente de las temperaturas invernales. Los trabajos previos con similares abordajes realizaron calentamientos durante temporadas completas (Benlloch-Gonzales et al., 2018), durante un período muy específico alrededor de floración (Vuletin-Selak et al., 2014a) o bien durante el verano (Miserere et al., 2022). La evaluación centrada en la primavera tiene importancia para la producción de olivo en Argentina debido a que es el período que presenta mayores diferencias en temperatura con el Mediterráneo y es el momento del año en el cual se observa mayor impacto del calentamiento global.

La fecha de apertura de la yema floral (BBCH 53) en nuestro experimento se hipotetizó que dependería sólo de la acumulación de temperaturas forzantes, lo cual hace esperable que en los tratamientos calentados (T+) el estadio ocurra antes que en los controles (T0). Esta predicción fue correcta para ambos cultivares sólo en la temporada 2019-2020. En 2018-2019, la apertura de la yema tendió a adelantarse en T+ para cv. Arbequina solamente. Algo similar ocurrió para el estadio BBCH 57 (corola color verde). Los estadios relacionados al desarrollo de la inflorescencia fueron los que presentaron menor impacto del calentamiento

sobre la fecha de ocurrencia. Esto se contrapone con nuestros resultados previos comparando localidades ubicadas en un gradiente de temperatura (Capítulo 2) y otros trabajos que consideraron una única localidad en una serie de años (Elloumi et al., 2020) o localidades a diferentes altitudes (Rojo y Pérez-Badía, 2014). Todos estos estudios mostraron avances consistentes en la apertura de la yema floral debido a temperaturas ambientales más cálidas. Además, estos avances fueron de mayor magnitud (medida en días) que los avances en la plena floración. Es posible que esta diferencia entre estudios se relacione al hecho que nuestro ensayo sólo abarcó un tiempo reducido dentro del período de forzado (i.e., sólo 25-45 días desde el inicio de los tratamientos). Si la inducción floral en olivo, dependiente de la acumulación de bajas temperaturas, se completara a mediados del invierno como sugieren Haberman et al. (2017) analizando la acumulación de transcritos del gen FT (i.e., flowering locus T), entonces nuestros tratamientos sólo habrían abarcado una fracción reducida del período de acumulación de temperaturas forzantes. En línea con este pensamiento, el impacto del calentamiento fue mayor el segundo año cuando iniciamos los tratamientos 6 días antes.

El adelanto obtenido en los estadios de floración ante un calentamiento primaveral coincide con resultados previos en regiones tradicionales de cultivo. En el mediterráneo europeo altas temperaturas en los meses de marzo (Aguilera et al., 2015) y abril (Oteros et al., 2013) (equivalentes a septiembre y octubre en el hemisferio sur) tuvieron una importante correlación con el adelanto en el inicio y la plena floración. Pérez-López et al. (2008) observaron que las temperaturas mínimas de abril y mayo fueron los mejores indicadores meteorológicos de la fecha de floración en Castilla-La Mancha, España. En nuestro experimento, los tratamientos calentados adelantaron 5-12 días el inicio de la floración y 11-18 días la plena floración (Cuadro 3.1). Otro calentamiento experimental de 4°C utilizando

cámaras de techo abierto sobre el cv. Picual, obtuvo adelantos superiores, los cuales fueron de 18-24 días y de 16-21 días respectivamente para inicio y plena floración respectivamente (Benlloch-González et al., 2018). Es probable que éste mayor adelanto se deba a que este último calentamiento, realizado durante el ciclo completo del cultivo, no haya reducido la acumulación de frío invernal lo suficiente como para impactar sobre la floración, pero si haya tenido un efecto marcado sobre el período de forzado.

La duración de los períodos de desarrollo floral (BBCH53-63 y BBCH60-69) determinan el momento ocurrencia del cuaje y por ende del inicio de acumulación de materia seca en los frutos y la competencia por asimilados que causa la abscisión masiva de flores y frutos (Rallo y Cuevas, 2017). Un punto interesante de nuestros resultados es que los periodos mencionados redujeron significativamente su duración ante un incremento en la temperatura primaveral de forma consistente en ambas temporadas. Es decir que el aumento de temperatura tendría un efecto acelerador del desarrollo tanto antes como después de la plena floración. En concordancia, en un estudio con 17 cultivares de olivo en diferentes localidades de Italia, Di Paola et al. (2021) observaron que a mayores temperaturas durante los períodos BBCH51-61 y BBCH51-65 la tasa de desarrollo se incrementó. Dado que la tasa de desarrollo es igual a la inversa de la duración de un periodo entre dos estadios, esto significa que temperaturas más altas en el rango de 10-20°C acortaron los periodos mencionados.

El final del endurecimiento de carozo (EC) se asocia con el inicio del período de expansión de las células del mesocarpo y el comienzo de la fase lineal de acumulación de aceite (Conde et al., 2008). La fecha de EC ocurrió alrededor del final de los tratamientos y el calentamiento generó un adelanto de 11-14 días, lo cual implica un adelanto del período donde ocurre la mayor parte de la síntesis de aceite. Sin embargo, este adelanto fue en

promedio menor al obtenido para el estadio fenológico anterior (BBCH 69), debido a que la duración del período BBCH69-EC no fue afectada o aún se alargó con el calentamiento. Esto sugiere que la temperatura no sería el principal factor que explicaría la duración de esta fase. Otros estudios, también observaron que la duración de los periodos entre final de floración (BBCH69) y estadios del 10% o 50% del tamaño del fruto (BBCH71 y BBCH75) tuvieron menor variación entre localidades que otros períodos (Di Paola et al., 2021). Por ende, adelantos en la floración no se traducirían directamente a adelantos en el desarrollo del fruto y esto debería considerarse al modelar la respuesta. El estadio posterior, 50% del peso seco final del fruto (PSF50), tuvo lugar luego de finalizados los tratamientos térmicos (estos se extendieron hasta EC como máximo) y no mostró diferencias entre tratamientos para cv. Arbequina. Además, la duración del periodo EC-PSF50 fue igual entre tratamientos. En otras palabras, los adelantos en T+ de la floración y el EC no acarrearán un adelanto en PSF50. Es probable que otros factores, más allá de la temperatura, afecten la tasa y duración del crecimiento del fruto. Por ejemplo, Barone et al., (1994) encontraron que la tasa de crecimiento del fruto fue 50% menor y la fecha de final de crecimiento 30 días más tardía entre árboles del cv Cassanese con alta carga en comparación con árboles raleados al 50%. En este sentido, pequeños cambios en la carga entre árboles podrían explicar la importante variabilidad en la fecha de PSF50, superior a los estadios de floración. También, es posible que la fecha de PSF50 varíe entre frutos de una misma planta debido a otros factores no considerados en el muestreo como la posición dentro del conopeo, o la carga en distintos sectores de la planta. En 'Coratina' se observó un adelanto del estadio PSF50 en las plantas sometidas a T+ con respecto a T0 y un acortamiento del periodo EC-PSF50 y esta respuesta podría deberse a un efecto indirecto de la temperatura mediado por la carga frutal que fue menor en T+ (Capítulo 4, Figura 4.6). Trabajos previos observaron que bajas cargas se

asocian con maduraciones aceleradas (Barone et al., 1994) y aumentos en la tasa de crecimiento en peso del fruto (Trentacoste et al., 2010). La escasa variabilidad en la temporalidad del desarrollo del fruto debido a cambios en la temperatura de primavera indicarían que un incremento de alrededor de 4°C en nuestras condiciones ambientales no es suficiente para producir un adelanto en el desarrollo del fruto tal que éste quede expuesto a temperaturas sustancialmente mayores durante la síntesis de aceite. Sin embargo, este punto merece continuar siendo estudiado dado que únicamente fue posible determinar el estadio de PSF50 durante una de las temporadas.

El estadio vegetativo de primeras hojas separadas (BBCH 11) se produjo entre mediados de agosto y mediados de septiembre. En 2018 el calentamiento generó un adelanto de 10 días para ‘Arbequina’ y 17 días para ‘Coratina’, pero este efecto no se repitió en la temporada siguiente. Cuando comparamos localidades con diferentes temperaturas debido a latitud y altitud (Capítulo 2, Figura 2.5) observamos reducida variabilidad en la fecha de ocurrencia del estadio BBCH11. Los escasos trabajos previos en relación a la brotación vegetativa en olivo también sugieren una baja sensibilidad en este estadio en respuesta a la temperatura. Hartman (1953) observó que plantas mantenidas en invernáculo presentan una corta parada invernal del crecimiento vegetativo y que no requieren de un periodo de bajas temperaturas para retomar el crecimiento. Más recientemente, López Bernal et al. (2020) determinaron que una exposición a temperaturas medias de 22°C durante 1-2 semanas son suficientes para que se produzca la ruptura del reposo vegetativo, que en nuestro caso se habría cumplido para ambos tratamientos entre los meses de junio-julio. En nuestros tratamientos temperaturas medias del mes de agosto entre 13,5°C (tratamientos control) y 16°C (tratamientos calentados) aparentemente fueron suficientes para la salida del mismo y

en ese rango de temperaturas se vio un adelanto del estadio fenológico debido al calentamiento durante la primera temporada. Por otra parte, la fecha de 70% de elongación de ramas tuvo una alta variabilidad entre plantas y ramas y no mostró diferencia entre tratamientos, en concordancia con lo observado entre localidades en el Capítulo 2. Los resultados expuestos sugieren que sería importante explorar los efectos de incrementos en la temperatura durante el otoño-invierno para comprender mejor la respuesta de estos estadios a la temperatura y como el impacto de otros factores ambientales (e.g. carga frutal, disponibilidad hídrica) también influyen sobre la fenología vegetativa.

### **3.5 Conclusiones**

El incremento de la temperatura de primavera generó un adelanto de los estadios reproductivos que se profundizó a medida que avanzó el ciclo. Para la plena floración ese adelanto fue de 11-18 días. Además, las duraciones entre estadios reproductivos tendieron a acortarse en los tratamientos calentados. Por el contrario, la duración del período posterior, es decir el crecimiento inicial del fruto (i.e. BBCH69-EC y EC-PSF50) no fueron afectados por el incremento de la temperatura de primavera en forma directa. El inicio del desarrollo vegetativo mostró un adelanto relacionado al incremento de temperatura en una de las temporadas, en cambio estadios más avanzados tuvieron una escasa respuesta al calentamiento, y una alta variabilidad entre plantas. Estos resultados resultan en un aporte importante para el modelado de la fecha de ocurrencia de los diferentes estadios fenológicos. Además, se resalta la importancia de continuar estudios que profundicen en torno a los factores que controlan la duración de la estación de crecimiento vegetativo, con vistas a optimizar la relación entre crecimiento vegetativo y reproductivo.

## **CAPITULO IV**

### **Respuestas del crecimiento y la producción de biomasa al calentamiento primaveral en dos cultivares de olivo**

#### **4.1 Introducción**

El olivo se cultiva en ambos hemisferios en un gradiente muy amplio de latitudes entre los 25° y los 45° y ocupando en torno a 10,3 millones de hectáreas (ha) a nivel mundial. El 97,9% de dicha producción se concentra en la Cuenca Mediterránea europea (Lucena et al., 2017), donde existe una importante tradición en torno al cultivo y éste presenta una larga historia de adaptación. Fuera de la cuenca del mediterráneo, los principales productores son Argentina, Perú, Chile y Australia. La Argentina ha incrementado significativamente su producción de aceite en los últimos 30 años, en la actualidad el país cuenta con alrededor de 77.000 has. implantadas (Carciofi et al., 2021).

La olivicultura argentina se desarrolla principalmente en la región centro-oeste y noroeste del país las cuales tienen importantes diferencias climáticas con la cuenca mediterránea europea de donde es originario el cultivo. Las precipitaciones van entre los 150 - 550 mm anuales y de régimen estival, mientras que en el mediterráneo se dan en invierno y el mínimo en las zonas de cultivo ronda los 350 mm anuales (Torres et al., 2017). Además, el noroeste argentino, parece tener temperaturas invernales y primaverales superiores a las regiones más cálidas del sur de Europa (Searles et al., 2011) y valores superiores de evapotranspiración (ET) en torno a los 1400-1600 mm (Torres et al., 2017). Las prácticas de se diferencian; por ejemplo, la irrigación es indispensable para la supervivencia del cultivo en la producción argentina, siendo posible únicamente una corta parada del riego en invierno que disminuye moderadamente los rendimientos (Rousseaux et al., 2008) y las láminas aplicadas son de alrededor de 800-1000 mm anuales mientras que en el mediterráneo europeo el cultivo se realiza en secano o con láminas máximas de 400-500mm anuales (Searles et al., 2011). En las regiones cálidas de Argentina los crecimientos vegetativos son considerados

excesivos especialmente después de una poda invernal (Albarracín et al., 2017) y con altos volúmenes de riego (Correa-Tedesco et al., 2010, Trentacoste et al., 2019). Esto supone un costo importante en podas anuales y manejo de los restos leñosos. Entender que factores están detrás de estas diferencias regionales es necesario tanto para aumentar la eficiencia y sustentabilidad del cultivo como para prever los posibles cambios de manejo necesarios a nivel global en el contexto del cambio climático.

La temperatura ambiental es uno de los principales factores que regulan el crecimiento de los cultivos. En general, los incrementos de temperatura se asocian a mayores crecimientos. Sin embargo, esta respuesta es dependiente del rango de temperaturas explorada y de umbrales propios de las diferentes especies o grupos funcionales. Dentro de las leñosas, el crecimiento en las especies perennes parece tener una menor sensibilidad al aumento de la temperatura que en las caducas, o incluso una respuesta negativa (Way and Oren, 2010). Dentro de una misma especie, estos umbrales pueden diferir en lo relativo al crecimiento vegetativo y reproductivo (Luo, 2011). En un contexto de calentamiento global podemos esperar modificaciones en la productividad primaria de los cultivos, observables tanto en su biomasa total como de órganos específicos (hojas, raíces, frutos, etc.). Por ejemplo, en plantas de vid calentadas experimentalmente previo a floración se observó que mayores temperaturas medias (15°C) redujeron el número de frutos por inflorescencia, pero incrementaron el porcentaje de cuaje y el tamaño de flores y frutos (Keller et al., 2010) y a su vez, incrementaron la tasa de elongación de ramas y aparición de hojas (Keller y Tarara 2010) con respecto a los tratamientos de menor temperatura (10°C). Sin embargo, a temperaturas superiores a 35°C la tasa de fotosíntesis declinó abruptamente. Por lo tanto,

pasado dicho umbral, el efecto del incremento de temperatura supondría una limitante al crecimiento en vid (Keller, 2020).

En olivo, la primavera es una época determinante para el crecimiento pues durante esta estación se superponen la mayor parte del crecimiento vegetativo (elongación de las ramas y aparición de hojas) con estas etapas de desarrollo reproductivo (Hamze et al., 2022). Sin embargo, hasta el momento no se han documentado los efectos de las temperaturas primaverales sobre variables relacionadas al crecimiento. El rendimiento (o biomasa reproductiva a cosecha) se ve influenciado por la temperatura a la salida del invierno y la primavera a través de los efectos sobre el desarrollo de la inflorescencia, la intensidad de floración, la fecundación, el cuaje y el crecimiento del fruto (Vuletin-Selak et al., 2014a; Rapoport, 2014b). Estos efectos pueden verse reflejados sobre el número o peso de los frutos.

Con respecto a la definición del número de frutos, durante el periodo de endodormancia, las temperaturas supraóptimas inhiben la acumulación del frío requerido para la inducción floral y la ocurrencia de una floración de normal intensidad (Medina Alonso et al., 2020). Por otra parte, el cuaje puede verse reducido por temperaturas superiores a 30°C durante la floración debido a que inhiben la germinación del polen, la penetración del tubo polínico en el ovario y por ende la fertilización (Cuevas et al., 1994; Vuletin-Selak et al., 2013). Esta respuesta negativa del cuaje a la temperatura parece intensificarse en el caso de la autofecundación (Vuletin-Selak et al., 2014b).

Existen evidencias de que el tamaño del fruto es afectado por las altas temperaturas. La exposición de frutos en crecimiento a temperaturas medias superiores a 25°C durante el verano (enero-mayo) se relacionó con una disminución en el peso seco final del fruto en ramas en el campo calentadas adentro de cajas transparentes. En estas mismas condiciones,

la concentración de aceite en el fruto se redujo proporcionalmente al incremento de la temperatura media en un rango de 16- 32°C (García-Inza et al., 2014). Según un estudio reciente esta respuesta a la temperatura es cultivar-dependiente (Miserere et al., 2022) y se observó que niveles más altos de expresión de proteínas de estrés térmico (heat shock proteins, HSP) indican genotipos con mayor estabilidad en la concentración de aceite (Nissim et al., 2020a). A su vez, se observó que altas temperaturas inhiben directamente la expresión de algunos genes relacionados con la síntesis lipídica en el fruto. En olivo, el tamaño final del mesocarpo se relaciona directamente con el número de células formadas en el ovario justo después de floración (Hammami et al., 2011) la cual ocurre al inicio de la primavera en las condiciones ambientales del noroeste argentino. Por estos motivos, es posible que las temperaturas de primavera tengan influencia directa sobre la tasa de crecimiento del fruto inicial del fruto y sobre su peso final.

El crecimiento vegetativo en olivo puede prolongarse indefinidamente mientras las temperaturas se encuentren en un rango entre 10-30°C, en ausencia de otros factores limitantes (déficit hídrico o nutricional), este rango coincide con el óptimo para la fotosíntesis en esta especie mientras que temperaturas alrededor de 35°C conducen al cierre de estomas y a la detención del crecimiento de los brotes (Rallo y Cuevas, 2017). En un cultivo situado en Ciudad Real, España se determinó que las temperaturas base a partir de las cual se acumula tiempo térmico para el crecimiento vegetativo de ramas y copa fueron 13°C -14°C. Por encima de esta base incrementos en la temperatura contribuyen a mayores crecimientos vegetativos a una tasa constante de 13°Cd (grado centígrado día) por 1 mm de elongación Pérez-López et al. (2008). Sin embargo, en ese caso no se evaluaron modelos que consideraran temperaturas máximas limitantes del crecimiento. Por otra parte, en condiciones

experimentales de cámara de crecimiento, se observó una importante reducción en la biomasa de las plántulas cuando la temperatura se mantuvo a 37°C con respecto a un control a 25°C (Benlloch-Gonzales et al., 2016), aunque este efecto no se mantuvo cuando las raíces se mantuvieron a 25°C. Esto último sugiere, que la respuesta a la alta temperatura podría ser más leve a campo donde las raíces en el suelo se mantienen a temperaturas inferiores a las de la parte aérea.

Trabajos previos calentado plantas completas de olivo en cámaras de techo abierto (OTC, por sus siglas en inglés) han sido realizados para aislar el efecto de la temperatura sobre el de otros factores. Usando esta metodología se observó que 4°C de incremento en la temperatura durante el verano en La Rioja, Argentina se asoció a disminuciones en la biomasa de frutos y un incremento del área foliar neta, pero sin cambios en la biomasa total por planta con respecto a plantas sin calentar (Miserere et al., 2022). Además, ante un incremento de 4°C durante el año completo en Andalucía, España se asoció a una disminución en el cuaje, aunque dicho efecto en parte parece ser indirecto y estar mediado por una menor disponibilidad de agua más que a una consecuencia directa de las altas temperaturas (Benlloch-González et al., 2018). En cuanto al crecimiento vegetativo, en los tratamientos calentados se observaron incrementos en el diámetro de troco, el peso de poda y la elongación de ramas. A pesar de la importancia de las condiciones ambientales de la primavera para el crecimiento vegetativo y la definición de los componentes del rendimiento, hasta la fecha no se han realizado experimentos en OTCs que indaguen sobre los efectos del incremento de temperatura primaveral sobre estas variables.

El objetivo de este trabajo es estudiar en un experimento a campo, en plantas completas de olivo los efectos de un incremento de 4°C en la temperatura ambiente durante

la primavera sobre (i) la producción de órganos reproductivos (intensidad de floración, cuaje de frutos), (ii) la dinámica del crecimiento vegetativo (elongación de brotes, aparición de hojas, área seccional del tronco) y (iii) la producción total de biomasa en dos cultivares de olivo. Los resultados obtenidos contribuirán mejorar nuestra comprensión respecto a las respuestas del olivo en regiones cálidas y con calentamiento global.

#### **4.2 Materiales y métodos**

En un experimento manipulativo a campo se sometieron plantas completas y jóvenes de dos cultivares de olivo (Arbequina y Coratina) a dos tratamientos térmicos en cámaras de techo abierto (OTC). Los tratamientos aplicados fueron: control (T0), similar al ambiente, y calentado (T+), aproximadamente 4°C por encima del control. Los tratamientos se realizaron durante la primavera (agosto a noviembre) de dos años: 2018 y 2019 colocando una nueva cohorte de plantas cada año que tuvieron 2 y 3 años respectivamente (Fig. 4.1). Cada OTC alojaba una planta tomada como unidad muestral. Luego de finalizados los tratamientos las plantas fueron cosechadas de forma completa y separadas por órganos para la determinación de biomasa final. El sitio y diseño experimental están descritos en el Capítulo 3 – Sección 3.2.1 y el sistema de calentamiento y medición de la temperatura se detallan en las Secciones 3.2.2 y 3.2.3 respectivamente.



Figura 4.1– Vista de las plantas introducidas en la OTC en un tratamiento control en la temporada 2018 (planta de dos años) (A) y a un tratamiento calentado en la temporada 2019 (planta de tres años).

#### 4.2.1 Producción de órganos reproductivos

La intensidad de floración se determinó en ambas temporadas durante la última semana del mes de septiembre sobre todas las plantas. En 2018 se contabilizó el número total de inflorescencias de la planta y el número total de yemas axilares y se calculó el cociente entre ambos valores (inflorescencias yema<sup>-1</sup>). En 2019, debido al mayor tamaño de la planta, se calculó la intensidad de floración a partir del recuento de inflorescencias y de yemas axilares en un volumen de copa acotado de 20cm x 20cm x 20cm por planta utilizando un cubo hueco metálico. Se tomo como valor de intensidad de floración el promedio de los recuentos en dos volúmenes cúbicos por OTC.

La proporción de frutos cuajados en relación a las inflorescencias desarrolladas se determinó en dos ramas seleccionadas al azar y marcadas en cada una de las plantas en el año

2019. Para ello se realizó un recuento del número de inflorescencias el día 27/9/2019 cuando éstas se encontraban entre los estadios fenológicos BBCH57-60 (pre floración – inicio de floración) y luego un recuento de los frutos cuajados en las mismas ramas el día 12/11/2019. El cociente entre ambos valores define el cuaje.

#### **4.2.2 Medición del crecimiento vegetativo**

Para observar la dinámica del crecimiento vegetativo se midió la elongación de ramas (Fig. 4.2) y el área seccional del tronco durante los tratamientos térmicos. La elongación fue medida en cinco ramas por planta sin inflorescencias ni ramificaciones. Las mediciones se tomaron cada 10-15 días comenzando el 17/8/2018 y 12/8/2019 y finalizando el 29/11/2018 y el 13/12/2019 en ambos años respectivamente. Se calculó la media y el error estándar del valor de elongación para cada fecha y combinación cultivar x tratamiento. El área seccional del tronco se calculó a partir de los diámetros N-S y E-O del tronco a 30cm de altura medidos con calibre. Las medidas se tomaron en forma periódica cada 13-24 días, excepto durante el mes de septiembre en 2019, comenzando los días 17/8/2018 y 26/7/2019 y finalizando el 29/11/2018 y 13/12/2019.



Figura 4.2- Medición de diámetro de tronco con calibre (A) y de elongación apical con regla (B) sobre ramas marcadas en al inicio de los tratamientos (C) y cerca del final de los mismos en el mes de noviembre (D).

#### 4.2.3 Determinaciones de biomasa

Al finalizar los tratamientos térmicos, los primeros días del mes de diciembre, las plantas fueron cosechadas y sus órganos separados en: raíces, tronco (tallo principal por debajo de los 30 cm), ramas (tallo principal por encima de los 30 cm y otros tallos), hojas y frutos. Dentro de los frutos se distinguieron aquellos normales y fecundados (Fig. 4.3) de los partenocárpicos (no fecundados, Ø 2-4 mm). Se contabilizó tanto el número de frutos como de hojas por planta. Todo el material vegetal fue secado en estufa a 70°C hasta que su peso se estabilizó y posteriormente se determinó su peso seco. Durante el año 2019 se observó una marcada caída de hojas durante el tratamiento por lo cual se decidió además realizar una cuantificación de hojas caídas. A este efecto, cerca de la fecha de final del experimento (fines de noviembre) se realizó una recolección de las hojas caídas al pie de la planta dentro de cada

OTC, las mismas se contaron, se secaron en estufa a 70°C hasta que su peso se estabilizó y se determinó su peso seco.

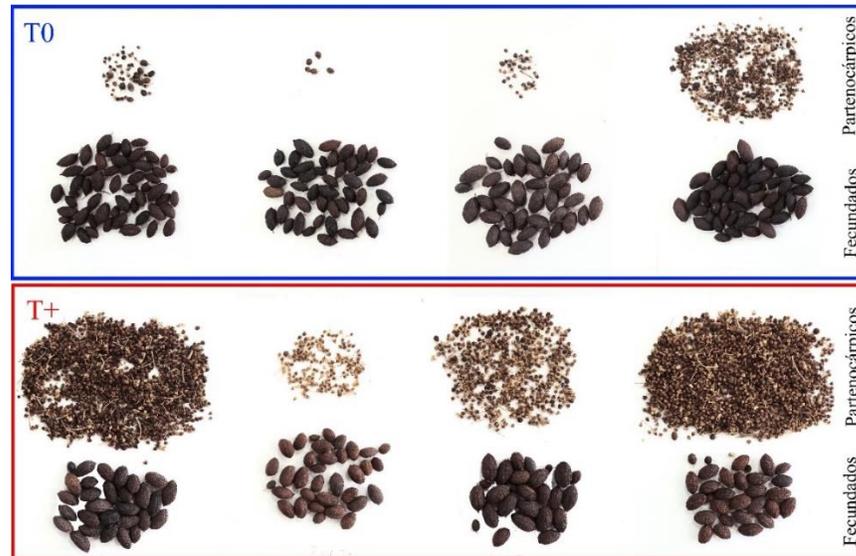


Figura 4.3- Frutos normales y partenocarpicos de cv. Coratina control (T0) y calentados (T+) cosechados al final del tratamiento en la temporada 2019.

#### 4.2.4 Análisis estadísticos

Para determinar el efecto del tratamiento térmico y el cultivar sobre: la intensidad de floración, la proporción de cuaje de frutos, la biomasa final de los distintos órganos vegetativos y reproductivos, el número y peso individual de frutos, el número de hojas caídas y aparecidas y la proporción frutos/biomasa vegetativa se realizaron ANOVA factoriales particionados por año con factores: tratamiento térmico (temp) y cultivar (cv) incluyendo el efecto de la interacción entre ambos (int). El cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza se verificó previamente. Para separar el efecto del tratamiento dentro de cada cultivar se realizaron post-tests de LSD-Fischer. El análisis se realizó con el software estadístico, *Infostat* (Di Rienzo et al., 2016).

Para determinar efecto del tratamiento térmico, cultivar y su interacción sobre la dinámica de elongación de ramas y de crecimiento de tronco en cada año se realizó un

ANOVA de medidas repetidas tres vías con dos factores inter-sujeto (temp y cv) y un factor intra-sujeto (fecha) utilizando el paquete *rstatix* (versión 0.7.0) (Kassambara, 2020) en entorno R. El cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza se verificó previamente. Para las comparaciones entre tratamientos y cultivares dentro de una misma fecha se aplicó el post-test según el método de Bonferroni.

### **4.3. Resultados**

#### **4.3.1. Temperatura ambiente**

En 2018 los tratamientos térmicos comenzaron el día 15/8 y duraron hasta el día 4/12, la temperatura media durante todo el periodo fue de 24,0 °C en T+ y 20,0 °C en T0. En 2019 los tratamientos térmicos comenzaron el día 9/8, algo más temprano que en la temporada previa y duraron hasta el 29/11. Las temperaturas medias durante todo el periodo fueron de 21,6°C en T+ y 18,5°C en T0, algo inferiores que en 2018 probablemente relacionado con el adelanto del inicio de los tratamientos y período de bajas temperaturas ocurrido a mediados de Octubre (Fig. 4.4). Sin embargo, el rango de temperaturas medias diarias explorado durante ambas temporadas para cada tratamiento fue similar, es decir 10-25°C para T0 y 14-28 °C para T+. La brotación vegetativa -estadio BBCH 11 según la escala de Sanz-Cortes et al., (2002)- se produjo en promedio para ambos cultivares y tratamientos los días 7/9/2018 y 25/8/2019 en promedio. La brotación reproductiva - estadio BBCH 53 según la escala de Sanz-Cortes et al., (2002)- se produjo posteriormente a la vegetativa en ambas temporadas, con fechas medias 17/9/2018 y 27/8/2019. Los resultados relacionados a la fenología en las OTCs son expuestos y analizados en detalle en el Capítulo 3, sin embargo, a los efectos del crecimiento, es importante destacar que en general la temporada 2019 fue 10-12 días más

adelantada en el inicio del crecimiento anual de los órganos tanto en el aspecto vegetativo como reproductivo.

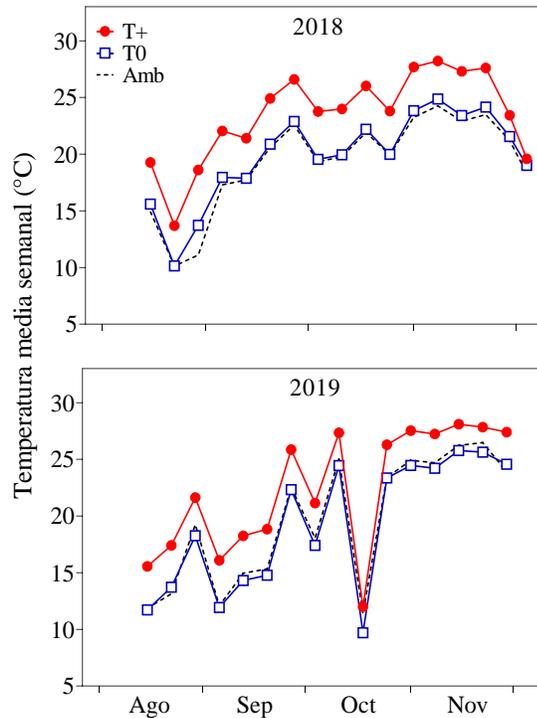


Figura 4.4- Temperatura semanal (media) durante el período de tratamientos térmicos en cámaras de techo abierto (OTC) en tratamiento control (T0), tratamiento calentado mediante un sistema pasivo y activo complementario (T+) y en el ambiente exterior a las OTCs (Amb).

#### 4.3.2 Intensidad de floración y cuaje de frutos

En 2018 la intensidad floración (inflorescencias yema<sup>-1</sup>) en los árboles jóvenes de dos años de edad mostró una interacción entre tratamientos y cultivares. En 'Coratina' la intensidad de floración fue significativamente menor en T+ que en T0 mientras que en cv. Arbequina no se observó diferencia entre tratamientos. Además, en ambos cultivares la intensidad de floración fue muy baja, particularmente en Arbequina el número de inflorescencias (<0,01 inflo. yema<sup>-1</sup>) fue prácticamente despreciable (Fig. 4.5). En 2019, con árboles de tres años de edad, las intensidades de floración fueron más altas y tuvieron una

diferencia significativa entre cultivares. Los valores fueron alrededor de 0,8 inflo. yema<sup>-1</sup> en cv. Coratina y de 0,4 inflo. yema<sup>-1</sup> en cv. Arbequina. Entre tratamientos térmicos no hubo una diferencia significativa, aunque cv. Coratina mostró una intensidad levemente menor en T+ que en T0 siguiendo el mismo patrón que la primera temporada.

El cuaje de frutos solo pudo ser analizado en la temporada 2019 (Fig. 4.6) debido a la baja intensidad de floración en el año previo. En 2019, la respuesta del cuaje mostró una interacción entre el cultivar y el tratamiento de temperatura; mientras que en cv. Coratina el cuaje disminuyó significativamente ( $p < 0,05$ ) en las plantas calentadas, en cv. Arbequina no hubo diferencias entre tratamientos.

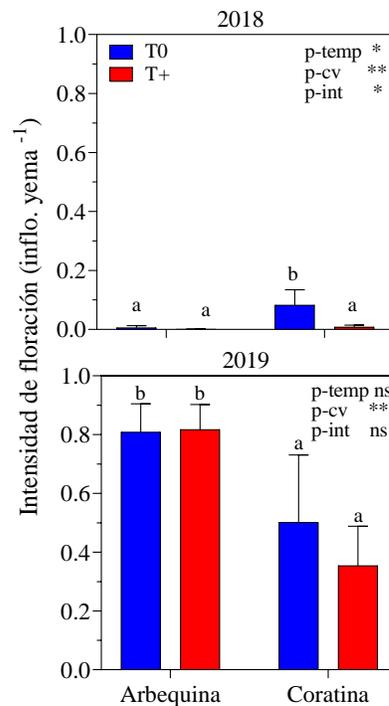


Figura 4.5- Intensidad de floración (Inflorescencias yema<sup>-1</sup>) (media  $\pm$  EE) según cultivar (Arbequina, Coratina) y tratamiento térmico T0 (azul) o T+ (rojo). Se realizó un ANOVA factorial ( $n=4$ ), por temporada de crecimiento (2018, 2019), con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) e interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha=0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $< 0,05$  (\*), p-valor  $< 0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes dentro de una misma temporada indican diferencias significativas.

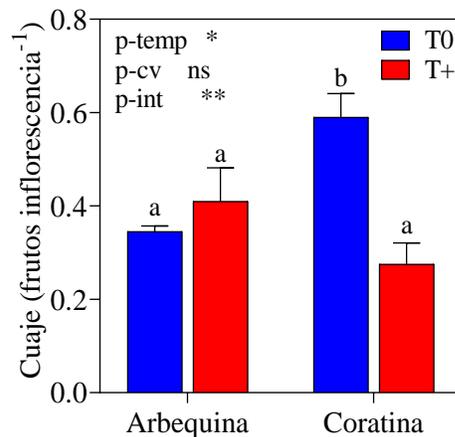


Figura 4.6- Proporción de frutos cuajados (media  $\pm$  EE) en la temporada 2019 para ambos tratamientos térmicos (T0 y T+) y cultivares (Arb y Cor). Se realizó un ANOVA factorial (n=4) con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) y la interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha=0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $<0,05$  (\*), p-valor  $<0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes indican diferencias significativas.

### 4.3.3 Dinámica del crecimiento vegetativo

El inicio de la elongación apical de ramas sin inflorescencias coincide con la fecha de BBCH11 (estadio fenológico de primeras hojas completamente separadas y de un color verdoso grisáceo). La respuesta de BBCH11 a los tratamientos térmicos y el cultivar se encuentra detalladamente analizada en el Capítulo 3. Brevemente, el tratamiento térmico tuvo un efecto significativo ( $p<0,05$ ) sobre la fecha de BBCH11 en el año 2018, adelantándose la fecha en T+ respecto de T0 en 10 días para Arbequina y en 17 días para Coratina (Fig. 4.7A). En el año 2019, no se vio esta diferencia significativa, si bien hubo un leve anticipo en T+ para ambos cultivares (Fig. 4.7B). Durante el periodo de elongación de las ramas, el crecimiento fue mayor en cv. Coratina que en cv. Arbequina en la mayoría de las fechas durante ambos años y la diferencia fue más marcada en las plantas T0. En el año 2019 la elongación total de las ramas en cv. Coratina fue significativamente mayor a la de cv. Arbequina para ambos tratamientos (Fig. 4.7 C y D). El calentamiento solo se asoció con un aumento significativo en la elongación ( $p<0,05$ ) en una fecha temprana (septiembre) en el

año 2019. En las fechas subsiguientes no se vieron diferencias significativas de elongación entre tratamientos térmicos. El número de hojas expandidas tuvo una respuesta similar a la elongación; se vio un aumento significativo en esta variable en T+ sólo en la primera fecha de observación (agosto) del año 2019 (datos no mostrados). Una elevada variabilidad en cuanto a elongación y al número de hojas expandidas se observó tanto entre ramas de una misma planta como entre plantas diferentes.

Como la elongación, el incremento en área seccional del tronco fue significativamente mayor en cv. Coratina que en cv. Arbequina en la mayoría de las fechas. El área seccional del tronco (Fig. 4.7 C y D) respondió al tratamiento térmico en la medición del mes de octubre de 2018, siendo mayor en T+ que en T0 para cv. Coratina. Durante el resto de la temporada 2018 y la temporada 2019, no hubo diferencias significativas entre tratamientos.

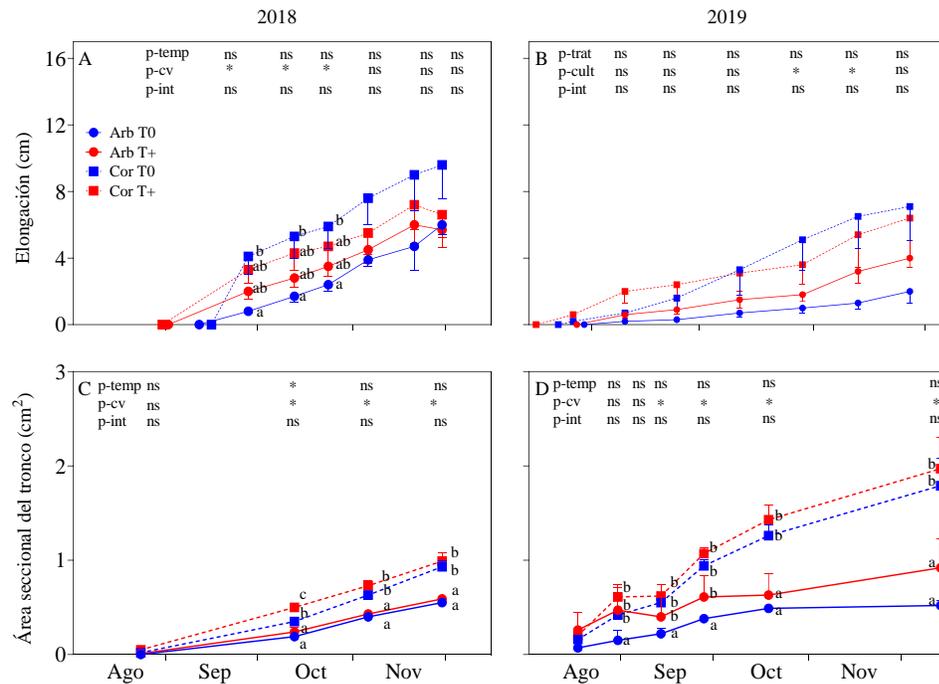


Figura 4.7- Elongación de ramas (media  $\pm$  EE) sin inflorescencias ni brotes axilares (A, B) e incremento en el área seccional del tronco (media  $\pm$  EE) (C, D). Las medidas se tomaron durante la permanencia de las plantas en las OTC para ambos tratamientos térmicos (T+ y T0), en los dos cultivares: Arbutina (Arb) y Coratina (Cor) durante las dos temporadas de tratamiento, 2018 y 2019. Se analizó estadísticamente mediante un ANOVA de medidas repetidas en el tiempo (n=4), para fechas con diferencias significativas entre tratamientos se realizó un post-test según el método de Bonferroni, letras diferentes indican diferencias significativas (p<0,05).

#### 4.3.4 Biomasa reproductiva y vegetativa.

En cv. Coratina el número de frutos fue menor en T+ que en T0 en 2018, aunque la carga general de los árboles (Fig. 4.8A). fue muy baja como consecuencia de la baja intensidad de floración (Fig. 4.2). El peso total de frutos siguió el mismo patrón de respuesta que su número (Fig. 4.8E). En 2019, cuando la intensidad de floración fue mayor, el número de frutos normales (fecundados) disminuyó en T+ respecto de T0, aunque el número de frutos totales no fue diferente debido a que el calentamiento incrementó significativamente (p<0,05) la cantidad de frutos partenocárpicos (Fig. 4.8B) en cv. Coratina. El peso individual de los

frutos normales aumentó en el tratamiento T+ para cv. Coratina en el año 2019; para cv. Arbequina no hubo diferencia entre tratamientos, aunque se vio la misma tendencia (Fig. 4.8D). En la temporada 2018, con baja carga frutal, el peso del fruto en cv. Coratina no se diferenció entre T0 y T+; en cv. Arbequina el número de frutos no fue suficiente para determinar un peso individual medio de los mismos. En cuanto al peso total de frutos por árbol, se encontró un efecto de la interacción tratamiento térmico x cultivar: en cv. Arbequina T+ se observó un aumento asociado con frutos de mayor peso individual, mientras que cv. Coratina se observó una reducción en peso de frutos por árbol debido al menor número de frutos normales (Fig. 4.8F).

La biomasa de hojas, tronco y tallos, así como la biomasa total de las plantas cosechadas al final de la primavera en ambas temporadas (Cuadro 4.1) no se vio afectada significativamente por el tratamiento térmico. Sin embargo, el tratamiento T+ se asoció con un aumento significativo en la biomasa de raíces durante la temporada 2018 aunque en 2019 el incremento no fue significativo. El cultivar, en cambio, tuvo un efecto significativo en el crecimiento de todos los órganos vegetativos durante la temporada 2019, siendo mayor la biomasa en cv. Coratina que en cv. Arbequina. Durante la primavera de 2019, las plantas de cv. Arbequina (calentadas y control) tuvieron una pronunciada caída de hojas viejas (Cuadro 4.2). El número de hojas caídas superó a las crecidas durante el período por lo cual en la Cuadro 4.1 se ve una reducción de la biomasa de hojas en ambos tratamientos. Teniendo en cuenta las hojas caídas en la estimación de biomasa final, ambos cultivares incrementaron en 10-40% su número de hojas, sin diferencias entre tratamientos ni cultivares. La producción total de biomasa (reproductiva + vegetativa; datos no mostrados) fue significativamente

mayor ( $p < 0,05$ ) en cv. Coratina que, en Arbequina durante 2019, pero en ninguno de los años mostró diferencias entre tratamientos.

En la temporada 2019 se puede observar la proporción de frutos respecto de la biomasa vegetativa obtenida al final de la temporada. La interacción cultivar x tratamiento térmico es significativa; mientras que en 'Coratina', la proporción de frutos sobre la biomasa vegetativa fue significativamente menor en T+ , en 'Arbequina' el incremento de temperatura se asoció con un incremento en la proporción de fruta.

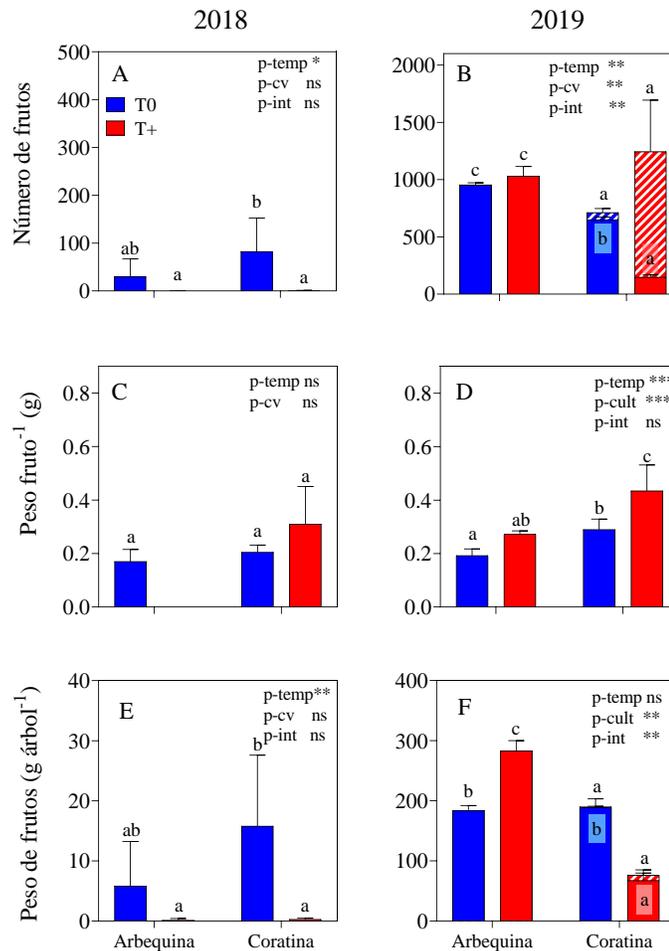


Figura 4.8- Número de frutos normales (barras llenas) y partenocárpicos (barras rayadas) (A, B), peso fruto individual (C, D) y peso total de frutos normales y partenocárpicos por planta (E, F) (media  $\pm$  EE) por cultivar (Arbequina, Coratina) y tratamiento térmico T0 (azul) o T+ (rojo). Se realizó un ANOVA factorial ( $n=4$ ), por temporada de crecimiento (2018, 2019), con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) e interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha=0,05$ . Los

resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $<0,05$  (\*), p-valor  $< 0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes dentro de una misma temporada indican diferencias significativas.

Cuadro 4.1- Incremento en biomasa vegetativa (media  $\pm$ EE) total y por órganos ocurrido durante los tratamientos térmicos (T0 y T+). Se realizó un ANOVA factorial (n=4) para cada temporada (2018, 2019) y variable con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) y la interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha=0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $<0,05$  (\*), p-valor  $<0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes indican diferencias significativas.

Año	Cultivar	Temp	Crecimiento biomasa vegetativa (g)				Total	
			Hojas	Tronco	Tallos	Raíces		
2018	Arb	T0	61 $\pm$ 10	15 $\pm$ 3	42 $\pm$ 7	29 $\pm$ 13 a	148 $\pm$ 30 a	
	Arb	T+	68 $\pm$ 16	18 $\pm$ 4	47 $\pm$ 10	67 $\pm$ 6 b	200 $\pm$ 29 a	
	Cor	T0	56 $\pm$ 3	21 $\pm$ 3	69 $\pm$ 25	19 $\pm$ 7 a	165 $\pm$ 39 a	
	Cor	T+	65 $\pm$ 5	25 $\pm$ 2	71 $\pm$ 17	43 $\pm$ 7 ab	204 $\pm$ 25 a	
		p-temp		ns	ns	ns	**	ns
		p-cult		ns	ns	ns	ns	ns
		p-int		ns	ns	ns	ns	ns
2019	Arb	T0	-65 $\pm$ 9 a	16 $\pm$ 5 a	0 $\pm$ 18 a	76 $\pm$ 78 a	27 $\pm$ 35 a	
	Arb	T+	-56 $\pm$ 37 a	14 $\pm$ 4 a	12 $\pm$ 23 a	118 $\pm$ 23 ab	89 $\pm$ 87 a	
	Cor	T0	63 $\pm$ 19 b	59 $\pm$ 11 b	170 $\pm$ 31 b	161 $\pm$ 55 ab	453 $\pm$ 76 b	
	Cor	T+	60 $\pm$ 18 b	59 $\pm$ 10 b	155 $\pm$ 35 b	171 $\pm$ 30 b	445 $\pm$ 40 b	
		p-temp		ns	ns	ns	ns	ns
		p-cult		**	**	**	*	**
		p-int		ns	ns	ns	ns	ns

Cuadro 4.2- Número de hojas caídas, aparecidas e incremento porcentual durante el periodo de tratamiento en ambas temporadas (2018 y 2019), tratamientos térmicos (T0 y T+) y cultivares (Arb y Cor). Se realizó un ANOVA factorial (n=4) con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) y la interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha=0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $<0,05$  (\*), p-valor  $<0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes indican diferencias significativas.

Año	Cultivar	Temp	# Hojas		Incremento (%)	
			Caídas	Aparecidas		
2018	Arb	T0	0	1102 $\pm$ 106 ab	100 $\pm$ 10	
	Arb	T+	nd	1348 $\pm$ 317 b	123 $\pm$ 29	
	Cor	T0	nd	849 $\pm$ 295 a	97 $\pm$ 34	
	Cor	T+	nd	828 $\pm$ 70 ba	94 $\pm$ 8	
		p-temp			ns	ns
		p-cult			*	ns
		p-int			ns	ns
2019	Arb	T0	574 $\pm$ 159	384 $\pm$ 136	10 $\pm$ 3	
	Arb	T+	485 $\pm$ 152	447 $\pm$ 556	11 $\pm$ 14	
	Cor	T0	28 $\pm$ 5	831 $\pm$ 215	32 $\pm$ 8	
	Cor	T+	43 $\pm$ 22	1055 $\pm$ 448	41 $\pm$ 17	
		p-temp		ns	ns	ns
		p-cult		**	ns	ns
		p-int		ns	ns	ns

Cuadro 4.3- Cociente (media  $\pm$ EE) entre la biomasa de frutos y la biomasa vegetativa (Frutos/BV) para ambos cultivares (Arb y Cor) al finalizar los tratamientos térmicos (T+ y T0) en cada temporada (2018 y 2019). Se realizó un ANOVA factorial (n=4) para cada temporada y variable con factores tratamiento térmico (temp), cultivar (cult) y la interacción temp x cult (int) y nivel de significación  $\alpha=0,05$ . Los resultados se muestran cómo no significativo (ns), p-valor  $<0,05$  (\*), p-valor  $<0,01$  (\*\*). La separación entre medias se realizó con un post-test LSD Fischer, letras diferentes indican diferencias significativas.

Año	Cultivar	Temp	Frutos/BV
2018	Arb	T0	0,12 $\pm$ 0,01b
	Arb	T+	0,00 $\pm$ 0,00a
	Cor	T0	0,32 $\pm$ 0,01c
	Cor	T+	0,00 $\pm$ 0,00a
		p-temp	**
		p-cult	ns
		p-int	ns
2019	Arb	T0	0,18 $\pm$ 0,01c
	Arb	T+	0,27 $\pm$ 0,01 d
	Cor	T0	0,12 $\pm$ 0,01b
	Cor	T+	0,04 $\pm$ 0,01a
		p-temp	ns
		p-cult	**
		p-int	**

#### 4.4 Discusión

Los resultados expuestos constituyen una primera aproximación al estudio de los efectos de un incremento de 4°C en la temperatura de primavera, aislada de otras variables ambientales, sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo en plantas jóvenes de olivo. Esta magnitud de incremento en la temperatura es coherente con la esperada en algunos escenarios potenciales de cambio climático de referencia internacional (IPCC, 2021). Además, durante las últimas décadas en la región Cordillerana Argentina se ha observado una tendencia al incremento diferencial de la temperatura ambiente durante la primavera con respecto a otras estaciones, en el contexto del calentamiento global (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015) y es esperable que esta tendencia se mantenga en los próximos años. Por otra parte, diferencias importantes en cuanto al comportamiento del cultivo, en especial su rendimiento y crecimiento vegetativo se han observado entre las

regiones de cultivo más antiguas del mediterráneo europeo y las nuevas regiones implantadas principalmente durante el siglo XX; algunas de las cuales se han adjudicado en parte a diferencias en las temperaturas ambientales (Searles et al., 2011, Torres et al., 2017). Sin embargo, en lo referido a crecimiento reproductivo y vegetativo y acumulación de biomasa, existe hasta el momento escasa evidencia experimental que relacione directamente incrementos en la temperatura con modificaciones en estas variables.

Durante el año 2018, el cultivar Coratina mostró una reducción en la intensidad de floración en las plantas calentadas durante la primavera. Sin embargo, durante esta primera temporada la intensidad de floración en general fue muy baja para ambos cultivares y tratamientos de temperatura debido al reducido tamaño de las plantas. En la primavera de 2019, con plantas de 3 años desde su plantación, las intensidades de floración fueron muy superiores a las de la primera temporada. Según trabajos previos, temperaturas superiores a 30°C tienen efectos negativos en el desarrollo de las inflorescencias, aunque los requerimientos invernales de frío hayan sido satisfechos previamente (Rapoport et al., 2014b). En nuestro experimento las temperaturas máximas medias en la semana previa al inicio de desarrollo de las inflorescencias fueron 29°C en T0 y 34°C en T+ (datos no mostrados). Sin embargo, no se observaron diferencias en la intensidad de floración entre ambos tratamientos en ninguno de los cvs. evaluados. De modo similar, en un experimento en OTCs en Córdoba, España no se observaron diferencias en intensidad de floración al incrementar 4°C la temperatura sobre plantas completas del cv. Picual en tres temporadas de tratamiento (Benlloch-González et al., 2018), siendo las temperaturas máximas del tratamiento calentado alrededor de 30°C en floración. Entonces, es probable que, en plantas aclimatadas a temperaturas cálidas, como ocurrió en ambos estudios utilizando OTCs, se

requieran temperaturas más elevadas que las evaluadas en este estudio para generar un impacto negativo sobre la intensidad de floración. En este sentido, no debería descartarse un posible impacto negativo de olas de calor ya que las mismas representan un cambio drástico en la temperatura durante un período corto de tiempo sin que haya un proceso previo de aclimatación a la temperatura. Este fenómeno es común en zonas cordilleranas del norte y centro del país y cuyo impacto sobre la intensidad de floración sería interesante evaluar.

El porcentaje de cuaje (frutos/inflorescencia) promedio fue de alrededor de 40%. Experimentos previos han señalado que el porcentaje de cuaje en olivo depende del tamaño potencial de los frutos que varía según el cultivar (Rosati et al, 2010). Así, el cuaje es mayor en cultivares con tamaño potencial de fruto más pequeño que en cultivares con tamaños mayores. ‘Arbequina’ se considera un cultivar de fruto pequeño (peso fresco alrededor de 1,9g), mientras que de ‘Coratina’ presenta un fruto mediano (alrededor de 4,0g) (Barranco, 2017). Por lo tanto, es esperable que el porcentaje de cuaje en ‘Coratina’ sea menor que en ‘Arbequina’. Sin embargo, en nuestro caso el área foliar fue mayor en las plantas de ‘Coratina’, lo cual explica la mayor disponibilidad de fuentes (recursos) y por ende un cuaje similar a pesar de las diferencias genotípicas. En respuesta al calentamiento, el cuaje se redujo significativamente en ‘Coratina’ en la temporada 2019. Trabajos previos observaron una caída en la fertilidad del polen a temperaturas superiores a 26-27°C (Bartolini y Viti, 2018) o 30°C (Cuevas et al., 1994, Vuletin-Selak et al., 2014a, Dias et al., 2020). En nuestros tratamientos calentados la temperatura media en floración fue de 27,2°C y la máxima de 32,8°C. Además, en los tratamientos calentados aparecieron un gran número de frutos partenocárpicos. Más aún, el número de frutos totales (normales y partenocárpicos) no difirió entre tratamientos control y calentado. Los partenocárpicos no se consideran frutos normales

en olivo ya que conservan un tamaño muy inferior al de los frutos fecundados, muchas veces no permanecen hasta el final del ciclo y carecen de valor económico (Rapoport y Moreno-Alías, 2017). Es decir que posiblemente la disminución en el cuaje ante el calentamiento se relacionó con fallas en la polinización, relacionadas a caídas en la fertilidad del polen que condujeron a la autofecundación y a la formación de frutos partenocárpicos. Otra causa posible, sería la ocurrencia de dificultades en la polinización cruzada debido a un desfase temporal de la floración entre cultivares asociado con el calentamiento. Sin embargo, en ‘Arbequina, cultivar auto-incompatible (Sánchez-Estrada y Cuevas, 2018) y totalmente compatible con Coratina (Riella et al., 2022) el cuaje no se vio afectado. Además, se observó que existe interacción entre genotipo y temperatura en relación al rendimiento del polen (Vuletin-Selak et al., 2013). Entonces, sería posible que las diferentes respuestas se deban principalmente a una mayor sensibilidad a la temperatura en el polen de ‘Arbequina’ y una mayor tolerancia en el de ‘Coratina’, con lo cual la polinización cruzada se vería afectada solo en esta última. Sin embargo, la evaluación del efecto de desfases temporales en la floración entre cultivares y de combinaciones de cultivares adecuadas para la polinización cruzada en condiciones mayores temperaturas en un punto relevante a estudiar para mejorar el diseño de futuros cultivos.

Las fallas en la polinización y la reducción del cuaje dieron como resultado una baja carga de frutos fecundados en los tratamientos T+ en ‘Coratina’ lo cual redujo la limitación por fuente al crecimiento de los frutos (Rosati et al., 2010) y pudo ser en parte la causa de un incremento en el peso promedio de los frutos observado en diciembre. Esta correlación negativa entre peso y tamaño del fruto fue observada tanto en olivo (Rallo y Cuevas, 2017, Fernández et al., 2018) como en los frutales en general (DeJong, 2021). En este sentido el

incremento en el peso sería una consecuencia indirecta del calentamiento durante la primavera. Sin embargo, el peso del fruto de las plantas calentadas también fue mayor en ‘Arbequina’ donde la carga fue similar entre tratamientos. Es posible que esto se deba a un leve adelanto en el crecimiento del fruto relacionado con el adelanto de los estadios de floración que haya impactado positivamente en ambos cultivares al calentar (Capítulo 3, Fig. 3.5). Experimentos previos determinaron un menor peso del fruto al calentar ramas (García-Inza et al., 2014) o árboles enteros (Miserere et al., 2014) cuando el calentamiento se aplicó durante el verano coincidiendo con el período de crecimiento de los frutos. En dichos trabajos, no tuvieron un adelanto de las fechas de las etapas fenológicas relativas a la floración y cuaje y el impacto de la temperatura sobre el tamaño de los frutos no estuvo relacionado a cambios en el desarrollo de los mismos. El desplazamiento en el ciclo podría tener un efecto sobre el rendimiento en algunos cultivares mitigando o exacerbando las caídas de rendimiento por aumento de las temperaturas del verano ante escenarios de calentamiento global.

El aumento en el peso individual de los frutos no alcanzó a compensar la reducción en el número de frutos de las plantas calentadas en ‘Coratina’ reduciendo el rendimiento medido en diciembre. En cambio, el rendimiento ‘Arbequina’ fue mayor en las plantas calentadas debido a que el cuaje no se vio afectado por el calentamiento y al momento de cosecha los frutos habían alcanzado mayor grado de desarrollo. Este comportamiento diferencial entre genotipos podría ser un factor de interés en la adaptación del cultivo al contexto de un incremento en la temperatura por calentamiento global. Mayores evidencias de estas diferencias genotípicas serían importantes ya que debido a la baja carga de fruta

durante la primera temporada solo pudieron ser interpretados los resultados de un año de tratamiento.

El crecimiento vegetativo medido como elongación de ramas y como diámetro del tronco fue significativamente mayor en ‘Coratina’ que en ‘Arbequina’ en varias de las fechas de muestreo (Fig. 4.6). Además, el crecimiento en biomasa vegetativa de ‘Coratina’ fue el doble que el de ‘Arbequina’ en el año 2018 y lo superó en siete veces en el año 2019. Esto coincide con el mayor vigor general reportado previamente para cv. Coratina en el sur de Italia (Vivaldi et al., 2015) y en nuestra región del noroeste argentino (Miserere et al., 2022). Durante el segundo año ‘Arbequina’ tuvo una pronunciada caída de hojas, lo cual se repitió de forma similar en ambos tratamientos T0 y T+. Consideramos que esta caída no estaría dada por una limitación a la absorción radicular debido al volumen de la maceta ya que la caída no se observó en ‘Coratina’ las cuales eran plantas con mayor biomasa tanto aérea como radicular. Es común observar en el campo una marcada caída de hojas en ‘Arbequina’ durante la primavera. . Lo Bianco y Scalisi (2017) observaron una caída de 5-14% de las hojas en una temporada en plantas bien regadas con diferencias entre cultivares. Esto podría deberse a una removilización de nutrientes hacia los frutos en crecimiento durante este periodo

El calentamiento tuvo un efecto significativo incrementando la biomasa de raíces en ‘Arbequina’ durante el año 2018. Este mayor crecimiento estuvo en concordancia con un resultado previo en condiciones controladas de crecimiento donde la exposición de la parte aérea a temperaturas de 37°C mientras se mantuvieron las raíces a 25°C incrementó la longitud de raíces (Benlloch-González et al., 2016). En nuestro experimento, consideramos

que si bien la temperatura del aire se incrementó en el tratamiento calentado los órganos subterráneos permanecieron temperaturas inferiores por estar ubicados debajo del nivel del suelo. Benlloch-González et al. (2018) observaron también, que el crecimiento en elongación del tallo y en biomasa de los órganos aéreos no se modificó en condiciones de cámara de crecimiento entre plantas expuestas a temperaturas de 25°C/25°C (aérea/raíces) y de 37°C/25°C. Si bien las temperaturas medias en nuestros tratamientos fueron considerablemente inferiores a las del experimento mencionado (más de 10°C de diferencia), los resultados fueron concordantes.

En nuestro ensayo, en general no se observaron diferencias significativas entre plantas calentadas en primavera y plantas control para la elongación de ramas ni el área seccional del tronco. La biomasa vegetativa aérea al final del tratamiento tampoco mostró diferencias significativas relacionadas a la temperatura. La temperatura media dentro de las OTCs (Fig. 4.3) se mantuvo en un rango entre 10 – 28°C tanto para los tratamientos control como calentados, temperaturas consideradas adecuadas para el crecimiento vegetativo en olivo (Rallo y Cuevas, 2017). Según los parámetros de temperatura base y tasa de elongación de ramas en función del tiempo térmico reportados en la literatura (Pérez-López et al., 2008), la elongación de las plantas calentadas en nuestras OTCs debería superar a las plantas control en aproximadamente 3,4 cm en 2018 y 2,4 cm en 2019, considerando las temperaturas medias y la duración de los ensayos. A pesar de que las diferencias no fueron significativas en 2018 ‘Coratina’ se acercó a esa diferencia esperada en la última fecha de observación y en 2019 lo mismo ocurrió con ‘Arbequina’ (Fig. 4.6). Sin embargo, la variabilidad en la elongación de ramas y la biomasa de tallos y hojas es muy elevada con lo cual el número de unidades necesarias para sacar conclusiones al respecto posiblemente sea mayor al utilizado.

Resultados similares se obtuvieron al determinar la fecha de dos estadios fenológicos reproductivos en un gradiente de temperatura a campo generado por variaciones latitudinales y altitudinales (Hamze et al., 2022). La biomasa total considerando órganos reproductivos y vegetativos resultó significativamente mayor en 'Coratina' que en 'Arbequina' pero no mostró diferencias debidas al tratamiento de temperatura. Esto concuerda con lo observado previamente por Miserere et al. (2022) al calentar plantas enteras de olivo durante el verano. Los resultados sugieren, que otras variables diferentes a las temperaturas como por ejemplo los volúmenes de riego podrían estar más estrechamente asociadas a los altos crecimientos observados en muchas fincas comerciales del noroeste argentino. Por último, la proporción entre biomasa reproductiva y vegetativa mostró una fuerte interacción cultivar por tratamiento. Ante el incremento de la temperatura de primavera 'Arbequina' incrementó su proporción de biomasa reproductiva mientras que 'Coratina' la redujo. Esto fue diferente a lo observado con calentamiento durante el verano (Miserere et al., 2022) donde la proporción de biomasa reproductiva disminuyó en ambos cultivares.

#### **4.5 Conclusiones**

Los resultados exponen que un incremento experimental de 4°C en la temperatura de primavera tiene notorios efectos sobre el crecimiento de olivo algunos de los cuales recibieron escasa atención en el pasado y que pueden tener importantes consecuencias a nivel productivo. El incremento de temperatura no afectó la intensidad de floración, en cambio tuvo efectos contrastantes entre cultivares en la fecundación y cuaje e los frutos. Mientras que 'Arbequina' mantuvo un cuaje de alrededor de 40% en ambos tratamientos térmicos, 'Coratina' redujo su cuaje del 60% en el tratamiento control al 30% en el calentado. Esta disminución se asoció con una gran producción de frutos partenocárpicos sin valor comercial,

causada probablemente por una deficiente polinización cruzada. Como consecuencia de la reducción en el cuaje, el rendimiento final en peso de frutos fue menor en el tratamiento calentado para 'Coratina'. Las raíces fueron el único órgano vegetativo cuya biomasa mostró un incremento significativo ante el incremento de temperatura. Tanto la elongación de las ramas y el crecimiento del tronco, como la biomasa de los órganos vegetativos aéreos se mantuvieron constantes entre tratamientos de forma consistente entre variedades y años, lo cual pone de relieve la importancia de abordar el estudio de la influencia de otras variables (p. ej. volúmenes de riego) sobre los altos crecimientos vegetativos observados en muchas localidades argentinas.

## **CAPITULO V**

### **Desarrollo y crecimiento del fruto en un gradiente de temperatura ambiental a campo**

## 5.1 Introducción

En la Argentina se encuentran implantadas actualmente 77.000 ha de olivo, de las cuales el 90% se ubican en las regiones centro-oeste y noroeste. De la producción total de aceitunas obtenidas del olivar en Argentina, 32% son destinadas a la elaboración de aceituna de mesa y 68% son principalmente aceiteras (INDEC, 2021). El tamaño de fruto y su concentración de aceite son los atributos claves que terminan la calidad para la elaboración de aceitunas de mesa y de aceite, respectivamente.

La definición del tamaño del fruto se extiende durante un largo periodo que puede durar hasta 18-20 semanas luego de la floración ocurrida en primavera. La síntesis y acumulación de aceite en las aceitunas se concentra principalmente luego del endurecimiento de carozo y hasta la madurez de cosecha (desde la semana 6 hasta la 16 luego de la floración, Ben-Ari et al., 2021). Así en olivo, los procesos de crecimiento y acumulación de aceite de los frutos son expuestos a condiciones ambientales contrastantes ocurridas durante parte de la primavera, verano e incluso parte del otoño. En olivo, el tamaño final del fruto (Moret et al., 2023) y la concentración de aceite tienen una importante componente genotípica, existiendo cientos de cultivares alrededor del mundo. Sin embargo, las condiciones ambientales durante el crecimiento del fruto y la interacción entre el genotipo y ambiente han demostrado ser fuentes de variabilidad de gran importancia (Navas-López et al., 2019). En regiones de cultivo de baja latitud en el hemisferio sur se ha observado que el inicio de la síntesis de aceite es más anticipado que en regiones tradicionales de cultivo de la cuenca mediterránea europea (Torres et al., 2017). Asimismo, en regiones cálidas del Valle del Jordán se ha sugerido una fecha de cosecha anticipada con respecto al mediterráneo típico (Dag et al., 2013). La temporalidad del crecimiento del fruto y la síntesis de aceite en los

mismos pueden tener consecuencias sobre el rendimiento y la calidad del aceite obtenido debido a las condiciones ambientales a las cuales quedan expuestos los frutos.

Trabajos previos utilizando un amplio rango de cultivares han observado que el peso seco de los frutos a cosecha y el rendimiento graso son relativamente menores en zonas con altas temperaturas ambientales durante el crecimiento del fruto que zonas templadas (Nissim et al., 2020, Rondanini et al., 2014). En otro estudio, García-Inza et al. (2014) incrementaron la temperatura del aire alrededor de ramas individuales durante el periodo comprendido entre endurecimiento de carozo y cosecha en un experimento a campo. Los autores encontraron que temperaturas medias durante el crecimiento del fruto superiores a 25°C se asocian con disminuciones en el peso del fruto a razón de 0,08g/°C. Por su parte, la concentración de aceite disminuyó linealmente dentro de un rango de temperaturas entre 16 y 32°C en 1,1 puntos porcentuales por °C de incremento. Miserere et al. (2022) evaluaron el incremento de temperatura de 4°C sobre plantas completas durante la temporada de crecimiento del fruto, observando también una disminución en el peso seco del fruto y su concentración de aceite con respecto a plantas sin calentar, en los cultivares 'Arbequina' y 'Coratina'. Sin embargo, un estudio que incluyó un gran número de cultivares, observó una gran diversidad genotípica en cuanto a la respuesta de los caracteres del fruto a la temperatura ambiente (Mousavi et al., 2019). Algunos cultivares mantuvieron relativamente estable su peso de fruto y concentración de aceite en distintos ambientes, mientras que otros experimentaron importantes variaciones.

Un incremento de la temperatura durante primavera podría producir un desplazamiento temporal en el ciclo reproductivo del olivo con posibles consecuencias sobre el crecimiento del fruto y la acumulación de aceite. Resultados previos demuestran que

incrementos en la temperatura de primavera se correlacionan con adelantos en el cuaje del fruto (Benlloch-González et al., 2018). Un aumento de 4°C durante la primavera en nuestro experimento a campo (Capítulo III) adelantó el cuaje de frutos 19,5 y 13,5 días en 'Arbequina' y 'Coratina', respectivamente. Similares resultados observamos al evaluar la fenología a lo largo de un gradiente de temperatura ambiental en el estudio realizado en las mismas localidades evaluadas en el presente capítulo y descrito en el Capítulo II. El estadio de cuaje de frutos en las localidades cálidas ocurrió antes que en las más frías (Hamze et al., 2022). La diferencia entre localidades fue de 27 días entre La Rioja (temperatura media agosto-octubre, periodo de prefloración, 28,9°C) y Rivadavia, Pcia. de Mendoza (temperatura media agosto-octubre de 23,0°C). Se hipotetiza que este adelanto en el cuaje del fruto puede repercutir en un adelanto en los subsiguientes estadios de desarrollo, principalmente el endurecimiento de carozo (EC); a partir del cual comienza la fase de mayor síntesis de aceite (Beltrán et al., 2017). Al adelantarse el EC, la fase linear de crecimiento del fruto y síntesis de aceite podría quedar expuesta a un periodo de mayores temperaturas durante el verano, con consecuencias negativas indirectas sobre el rendimiento.

La dinámica de crecimiento en peso seco del fruto y de la concentración de aceite en el fruto de olivo se puede describir a través de una función doble sigmoide como en otras drupas (Beltrán et al., 2017). Sin embargo, en condiciones de buena disponibilidad hídrica durante este período, el patrón de crecimiento se considera prácticamente lineal (Rapoport et al., 2004) o lineal + plateau (i.e. bilineal) cuando las mediciones se continúan posterior a que los frutos alcanzan el máximo tamaño y/o concentración de aceite. Este es el caso de los cultivos en el oeste argentino los cuales son irrigados durante la totalidad del ciclo. A su vez, la interpretación de las dinámicas de crecimiento en peso de frutos y de acumulación de aceite

a partir de aproximación bilineal, permite estimar los parámetros: "tasa" definido como el incremento en unidades de peso seco del fruto o concentración de aceite por día ( $PSF_{tasa}$  o  $AC_{tasa}$  respectivamente); y "duración" ( $PSF_{dur}$  o  $AC_{dur}$ ), definido como el tiempo entre el inicio del proceso y el momento en que la variable respuesta se estabiliza en un valor máximo o cesa el crecimiento. En estos términos, estudios previos compararon la dinámica de crecimiento de diferentes cultivares de olivo en la Pcia. de Mendoza, y observaron que las variaciones del peso seco máximo del fruto ( $PSF_{max}$ ) asociadas al cultivar estaban explicadas en un 91% por variaciones en  $PSF_{tasa}$  (Trentacoste et al., 2012). De modo similar,  $PSF_{tasa}$  también resultó la variable más asociada al  $PSF_{max}$  al comparar varios cultivares en tres ambientes contrastantes de la Pcia. de la Rioja, aunque en este caso  $PSF_{tasa}$  explicó un 47% de la variabilidad y  $PSF_{dur}$  un 10% (Rondanini et al., 2014). En cambio, para la concentración máxima de aceite en el fruto ( $AC_{max}$ ) los resultados fueron contrapuestos. Trentacoste et al. (2012)- observaron que  $AC_{dur}$  explicó la mayor parte de las diferencias entre cultivares al evaluar una única localidad en el centro-oeste de Argentina, mientras que Rondanini et al. (2014) determinaron que la  $AC_{tasa}$  fue la variable explicativa más importante al evaluar tres localidades climáticamente contrastantes del noroeste de Argentina. La discordancia en los resultados puede estar relacionada a variaciones en la tasa y duración de los procesos relacionadas con diferentes variables ambientales, entre ellas la temperatura mínima y máxima diaria (Trentacoste et al., 2012). Esto resalta la importancia de estudiar la dinámica del crecimiento del fruto y acumulación de aceite en a lo largo de un gradiente amplio de temperaturas ambientales.

El olivo es tradicionalmente cultivado en zonas cálidas y áridas. Estas condiciones de cultivo se exacerbarán durante las próximas décadas debido la expansión de la olivicultura

hacia regiones de diferentes condiciones agroclimáticas, en simultáneo con el aumento global de la temperatura ambiental. Esto tendrá consecuencias directas sobre el crecimiento del fruto incrementando la temperatura experimentada durante este proceso en el verano. También podría haber consecuencias indirectas a través cambios en la temporalidad del ciclo fenológico dados principalmente por la temperatura de primavera. En este contexto, mejorar nuestra comprensión sobre respuesta del crecimiento del fruto y la acumulación de aceite en distintos cultivares ante condiciones de temperatura contrastantes es de importancia. Por lo tanto, los objetivos del presente capítulo son (i) evaluar la fecha de ocurrencia de los diferentes estadios relacionados al crecimiento y acumulación de aceite en el fruto para varios cultivares de olivo frente a diferentes temperaturas ambiente generadas a lo largo de un gradiente latitudinal ( $29^{\circ}$ - $33^{\circ}$  S) que incluye un rango de altitudes (450-1.250 msnm) en la principal región olivícola del oeste argentino; (ii) evaluar los máximos, tasas y duraciones del crecimiento del fruto ( $PSF_{max}$ ,  $PSF_{tasa}$  y  $PSF_{dur}$ ) y la acumulación de aceite ( $AC_{max}$ ,  $AC_{tasa}$  y  $AC_{dur}$ ) en el mismo gradiente y (iii) explorar las posibles correlaciones entre los parámetros de crecimiento del fruto.

## **5.2 Materiales y Métodos**

### **5.2.1 Región y material vegetal**

Se llevaron a cabo muestreos sucesivos de fruto en 6 sitios geográficos “localidades” durante dos temporadas (2018-2019 y 2019-2020). Las localidades fueron seleccionadas a lo largo de un amplio gradiente latitudinal ( $29^{\circ}$  a  $33^{\circ}$  S) que comprende un rango de altitudes (450 a 1.250 msnm) de la principal región olivícola en el oeste argentino con el objetivo obtener un amplio rango de temperaturas. Las localidades fueron La Rioja, Chilecito y Huaco en la Provincia de La Rioja (latitudes más bajas), Cañada Honda en la Provincia de San Juan

(latitud intermedia) y Beltrán y Rivadavia en la Provincia de Mendoza (latitudes más altas). Las localidades diferían en sus altitudes particularmente en la Provincia de La Rioja. En cada localidad se eligió un cultivo comercial para las observaciones fenológicas. Los cultivares evaluados se seleccionaron acorde a aquellos más comunes en olivares modernos de Argentina. Mayores detalles sobre la ubicación y la climatología de las localidades y características del material vegetal fueron desarrollados previamente en el Capítulo II, Sección 2.2.1. Los árboles observados fueron diferentes entre temporadas, aunque se seleccionaron dentro del mismo cuadro de plantación. Se escogieron plantas con cargas medias al momento de floración, las cuales en general se mantuvieron similares durante el muestreo de frutos con excepción de cv. Picual en la localidad de La Rioja que posteriormente al cuaje mostró cargas relativamente bajas.

### **5.2.2 Endurecimiento de carozo**

En cada una de las fincas comerciales seleccionadas se recolectaron muestras de frutos de 3/5 plantas ( $n=3$  o  $n=5$ ) por cultivar. La recolección y procesamiento posterior de las muestras la realizaron dos técnicos entrenados, uno asignado a las tres localidades de la Provincia de La Rioja y otro a las tres localidades restantes en las Provincias de San Juan y Mendoza. El muestreo comenzó en cada temporada en el mes de noviembre y se realizó de forma semanal hasta que todos los cultivares y localidades alcanzaran el final del endurecimiento del . La determinación del endurecimiento del endocarpo se realizó a través de un corte transversal en 15 frutos frescos con cuchilla a fin de determinar la fuerza necesaria para el corte del endocarpo según la metodología de Presicce (2015). Mayores detalles referidos a la metodología de determinación fueron desarrollados en el Capítulo III, Sección 3.2.5. A los fines de este capítulo se distinguieron dos momentos relacionados al

endurecimiento de carozo: inicio de endurecimiento de carozo (*ECini*) cuando el promedio de los frutos de la muestra correspondiente a una planta alcanzaba un valor de fuerza de corte superior a 1,5 y fin de endurecimiento de carozo (*ECfin*) cuando mismo superaba el valor de 2,5. Esta metodología se corresponde con la descripción del endurecimiento de carozo como un proceso en forma de sigmoide (Fig. 3.3).

### 5.2.3 Acumulación de peso seco del fruto

Para la determinación de la dinámica de crecimiento del futo, los muestreos comenzaron en el mes de noviembre y continuaron con una frecuencia mensual hasta el mes de mayo de las respectivas temporadas, al observar la estabilización del peso seco de los mismos. Durante la temporada 2019-2020, la recolección de frutos en la localidad de Cañada Honda debió interrumpirse anticipadamente (en el mes de marzo) debido a las restricciones para el tránsito interprovincial impuestas a causa de la pandemia de SARS-COV2. En cada árbol por cultivar y localidad se extrajo quincenalmente muestras de 1kg de fruta entre 1,2 y 1,7 m de altura desde el suelo y de la zona exterior de la copa del árbol buscando representar sus cuatro caras. En el laboratorio, los frutos fueron secados en estufa eléctrica a 70°C hasta que su peso se estabilizó (en promedio 4 días), el peso seco del fruto (PSF) fue registrado para cada fecha de muestreo.

A partir del peso seco promedio de los frutos en cada muestra se ajustaron funciones bilineales de crecimiento (Fig. 5.1A) para cada planta particular según la ecuación (1)

$$PSF = \begin{cases} PSF_{tasa} * DOY + PSF_{int} & \text{si } DOY < PSF_{100} \\ PSF_{max} & \text{si } DOY \geq PSF_{100} \end{cases} \quad (1)$$

Donde PSF es el peso seco del fruto; *PSFtasa* es la tasa a la cual se incrementa el peso seco del fruto a lo largo de las fechas de muestreo; DOY es la fecha expresada en día del año

comenzando desde el 1 de enero del año en que se inició la temporada de cultivo;  $PSF_{int}$  es la intercepta de la función con el eje y;  $PSF_{100}$  es la fecha a partir de la cual el valor de peso seco del fruto se estabiliza en un valor máximo y constante y  $PSF_{max}$  es el valor del peso seco del fruto alcanzado en  $PSF_{100}$  el cual se considera el máximo peso seco del fruto. Utilizando la parte lineal de la ecuación ajustada se determinó para cada planta la fecha en que sus frutos alcanzaron en promedio la mitad del peso seco final ( $PSF_{50}$ ).

#### 5.2.4 Acumulación de aceite en el fruto

Para la determinación de la dinámica de acumulación de aceite en el fruto se utilizó una submuestra de las aceitunas recolectadas entre noviembre y mayo de ambas temporadas de crecimiento. Dependiendo de la localidad se analizaron muestras recolectadas en 5 a 8 fechas. Una muestra de 25g de fruta seca se volvió a introducir en estufa a 70g durante 12h aproximadamente. Luego, se pesó y molió íntegramente; primero se trituró el carozo utilizando un martillo y luego se terminó el molido utilizando un molinillo de café (DL-KG40 DeLonghi, China). A partir de la pasta de fruto obtenida se determinó la concentración (%) de aceite utilizando un analizador RMN SLK-200 (Spinlock, Argentina). A partir de los valores de concentración de aceite en cada muestra se ajustaron funciones bilineales (Fig. 5.1B) para cada planta (repetición) individualmente según la ecuación (2). Para el ajuste de la función se tomó como fecha de inicio de la acumulación de aceite la fecha de fin de endurecimiento de carozo en cada planta, asignándole a dicha fecha una concentración de aceite igual a cero.

$$AC = \begin{cases} 0 & \text{si } DOY \leq EC_{fin} \\ AC_{tasa} * DOY + AC_{int} & \text{si } EC_{fin} < DOY < AC_{100} \\ AC_{max} & \text{si } DOY \geq AC_{100} \end{cases} \quad (2)$$

Donde  $AC$  es la concentración de aceite en el fruto;  $AC_{tasa}$  es la tasa a la cual se incrementa la concentración de aceite en el fruto a lo largo de las fechas de muestreo;  $DOY$  es la fecha expresada en día del año comenzando desde el 1 de enero del año en que se inició la temporada de cultivo;  $AC_{int}$  es la intercepta de la función con el eje  $y$ ;  $AC_{100}$  es la fecha a partir de la cual el valor de concentración de aceite del fruto se estabiliza en un valor constante y  $AC_{max}$  es el valor de concentración de aceite del fruto alcanzado en  $AC_{100}$  el cual se considera la máxima concentración de aceite en el fruto

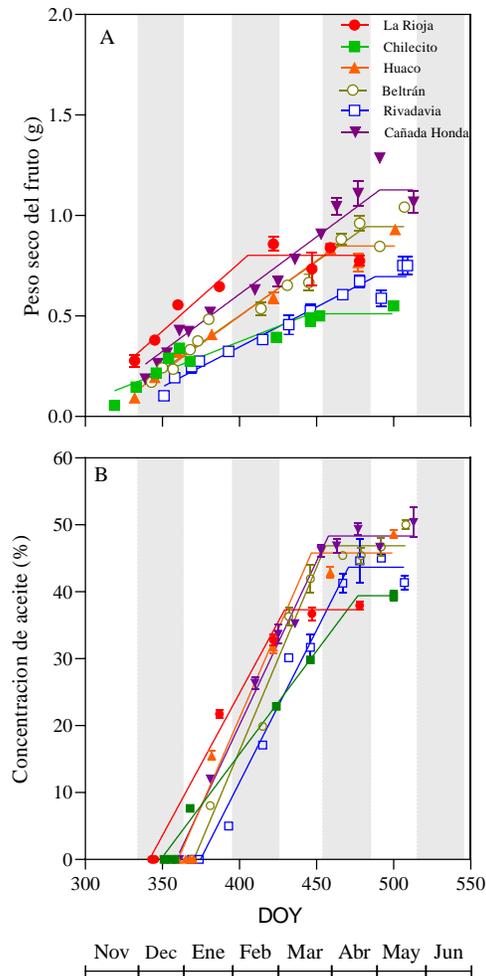


Figura 5.1– Evolución del peso seco del fruto (A) y concentración de aceite en el fruto (B) en cv. Arbequina en función de los días del año (DOY, a partir del 1 de enero de 2018) para la temporada 2018-2019 en seis localidades del oeste argentino (La Rioja, Chilecito, Huaco, Cañada Honda, Beltrán y Rivadavia). Los puntos representan el valor promedio de cuatro plantas ( $n = 5$ ). A partir de los parámetros ajustados en estas funciones para cada repetición se obtuvieron las tasas ( $PSF_{tasa}$ ,  $AC_{tasa}$ ), duraciones ( $PSF_{dur}$ ,  $AC_{dur}$ ) y máximo de peso seco del fruto ( $PSF_{max}$ ) y máxima concentración de aceite ( $AC_{max}$ ) utilizados en los análisis estadísticos.

### 5.2.5 Análisis estadísticos

Para determinar el efecto de la localidad, el cultivar y la temporada sobre las fechas de los distintos estadios relacionados al desarrollo ( $EC_{ini}$ ,  $EC_{fin}$ ) y crecimiento del fruto ( $PSF_{50}$ ,  $PSF_{100}$ ) y a la acumulación de aceite en el mismo ( $AC_{100}$ ) se realizó en primer

lugar un ANOVA de tres vías. Sobre la base de éste se calculó el porcentaje de la suma de cuadrados total correspondiente a cada uno de los factores e interacciones. Dado que el conjunto de datos se encontraba desbalanceado por no incluir todas las combinaciones de cultivar, ubicación y temporada también se realizaron dos ANOVA balanceados por separado. En el primero, las diferencias entre localidad se evaluaron analizando cinco localidades (La Rioja, Chilecito, Huaco, Beltrán, Rivadavia) y dos cultivares (Arbequina y Picual) en ambas temporadas. El segundo análisis estuvo enfocado en evaluar las diferencias entre cinco cultivares (Arbequina, Arbosana, Changlot, Coratina y Picual), los cuales se evaluaron en tres localidades (Chilecito, Huaco y Beltrán) en ambas temporadas. Las medias se separaron mediante post-test LSD con un nivel de significación de  $\alpha = 0,05$  utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2016). Una combinación particular de localidad (L) y temporada de crecimiento (S) se consideró como un ambiente (E) al explicar sus efectos sobre las variables observadas, ya que las condiciones meteorológicas a menudo diferían entre las temporadas de crecimiento en una localidad determinada. El mismo conjunto de análisis se repitió para las variables respuesta descriptivas de la dinámica de crecimiento del fruto ( $PSF_{tasa}$ ,  $PSF_{dur}$  y  $PSF_{max}$ ) y acumulación del aceite ( $AC_{tasa}$ ,  $AC_{dur}$  y  $AC_{max}$ ).

Por otra parte, se exploró la correlación  $PSF_{tasa}$  vs  $PSF_{dur}$  y  $AC_{tasa}$  vs  $AC_{dur}$ , y en aquellos sets de datos donde la correlación resultó significativa se modeló la misma mediante una regresión lineal.

## **5.3 Resultados**

### **5.3.1 Temperatura del aire**

La marcha anual de la temperatura para cada localidad, incluida la temperatura de primavera, sobre la que se basan nuestras hipótesis, fue detallada en el Capítulo II, Sección 2.3.1. En este capítulo pondremos énfasis en las condiciones de temperatura durante los meses de crecimiento y desarrollo del fruto (Fig. 5.2), es decir de noviembre a mayo, que tienen una influencia directa sobre los procesos observados en este capítulo. Para el periodo noviembre-mayo la localidad de La Rioja mantuvo en general las mayores temperaturas máximas ( $32,5^{\circ}\text{C}$  en promedio) y mínimas ( $17,1^{\circ}\text{C}$  en promedio) debido a su baja latitud y altitud sobre el nivel del mar, siendo igualada solamente por Cañada Honda durante el inicio de la estación (noviembre-diciembre) y por las temperaturas máximas de Chilecito entre diciembre-febrero de la temporada 2018-2019. Huaco y Rivadavia fueron las localidades de menores temperaturas durante la estación de crecimiento de los frutos debido a su altitud y latitud, respectivamente, siendo las mínimas en promedio  $11,8^{\circ}\text{C}$  y  $13,2^{\circ}\text{C}$ , mientras que las máximas se ubicaron en  $29,2^{\circ}\text{C}$  y  $27,9^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. La localidad de Huaco, presentó temperaturas máximas más altas que Rivadavia durante los meses de otoño.

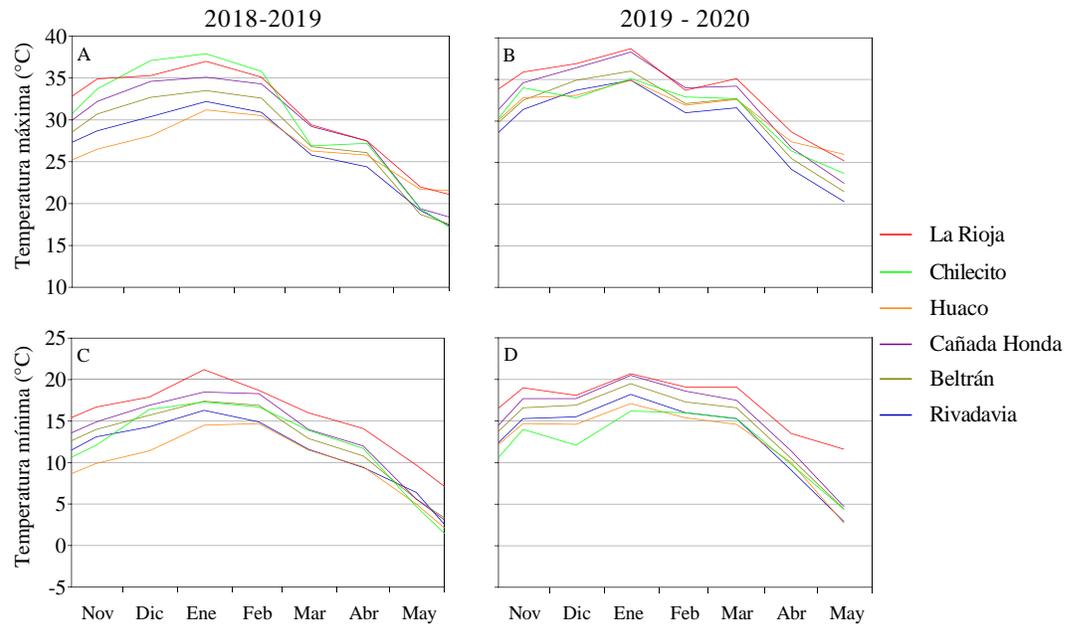


Figura 5.2– Temperatura (°C) máxima (A, B) y mínima (C, D) diaria media mensual en los meses de noviembre a mayo, temporadas 2018-2019 (A, C) y 2019-2020 (B, D) para las seis localidades evaluadas. Se colocó un sensor de temperatura por finca junto a uno de los árboles observados a 1,5 m de altura sobre el suelo.

### 5.3.2 Variabilidad en la fecha de endurecimiento de carozo explicada por localidad, temporada y cultivar

En general para todo el conjunto de datos, el endurecimiento de carozo ocurrió entre mediados de noviembre y mediados de enero. El inicio de endurecimiento ( $EC_{ini}$ ) ocurrió entre el 12/11 y el 6/1 (55 días) y el final ( $EC_{fin}$ ) entre el 28/11 y el 16/1 (49 días). Al analizar las fuentes de la variabilidad observada para la ocurrencia de ambos  $EC_{ini}$  y  $EC_{fin}$  la mayor parte (87% y 93% respectivamente) fue explicada por la localidad (L), mientras que la influencia del cultivar (C) estuvo en segundo lugar (Cuadro 5.1). Para el análisis del diseño balanceado (2 cultivares en 6 localidades, Cuadro 5.2) el efecto de la localidad fue significativo ( $p < 0,05$ ). En promedio para 'Arbequina' y 'Picual' la localidad más temprana fue La Rioja ( $EC_{ini} = 331$  DOY y  $EC_{fin} = 346$  DOY) y las más tardías fueron Huaco, Beltrán y Rivadavia para  $EC_{ini}$  (DOY 351-353) y Beltrán y Rivadavia para  $EC_{fin}$  (DOY 369 y 370,

respectivamente). El efecto del cultivar fue también significativo ( $p < 0,05$ ) (Cuadro 5.3) aunque el orden entre los cultivares fue diferente para *ECini* que para *ECfin*. En promedio podemos decir que 'Arbosana' se comportó como el cultivar más temprano y 'Coratina' como el más tardío, aunque la interacción CxL fue significativa con lo cual no podemos establecer un orden consistente para los cultivares entre las distintas localidades.

### **5.3.3 Variabilidad en el crecimiento del fruto explicada por localidad, temporada y cultivar**

La fecha en que los frutos alcanzaron la mitad de su peso seco (*PSF50*) ocurrió entre el 29/11 y el 21/12 (22 días), mientras que el máximo peso seco (*PSF100*) se produjo entre el 22/12 y el 3/6 (163 días). Al analizar las fuentes de esta variabilidad se observa que tanto *PSF50* como *PSF100* debieron la mayor parte (83% y 76%, respectivamente) a las diferencias entre localidades (L), mientras que la influencia del cultivar (C) y la temporada (S) fueron similares y en torno a un 6% (Cuadro 5.1). Para el análisis del diseño balanceado (2 cultivares en 6 localidades, Cuadro 5.2) el efecto de la localidad fue significativo ( $p < 0,05$ ). En cuanto a *PSF50*, en promedio para 'Arbequina' y 'Picual' las localidades más tempranas fueron La Rioja (DOY 356) y Chilecito (DOY 363) y la más tardía Rivadavia (DOY 405). Para *PSF100* La Rioja y Chilecito se mantuvieron como localidades más tempranas (DOY 412 y 426 respectivamente) y las restantes no difirieron entre sí. El efecto del cultivar fue significativo ( $p < 0,05$ ) sólo para *PSF50* (Cuadro 5.3) siendo 'Arbosana' el cultivar más temprano en alcanzar la mitad del peso seco del fruto y 'Changlot' el más tardío, aunque al igual que para EC la interacción CxL resultó significativa. Considerando ambos análisis balanceados (Cuadro 5.2 y 5.3) el efecto de la temporada sobre *PSF50* y *PSF100* fue significativo ( $p < 0,05$ ) siendo la temporada 2018-2019 más temprana que 2019-2020.

La fecha en que se alcanzó el máximo de acumulación de aceite (*AC100*) se obtuvo en un periodo amplio, entre el 10/2 y el 14/5 (93 días). Al igual que para los estadios anteriores, para *AC100* la localidad fue el factor que mayor parte de la variabilidad explicó (40%), mientras que el cultivar y la temporada explicaron un 25 y 24%, respectivamente (Cuadro 5.1). Para el análisis del diseño balanceado (2 cultivares en 6 localidades, Cuadro 5.2) las localidades tuvieron un efecto significativo ( $p < 0,05$ ). La Rioja, Beltrán y Rivadavia fueron las localidades más tempranas en alcanzar *AC100* (DOY 445-452) mientras que Chilecito y Huaco fueron las más tardías (DOY 462 y 466, respectivamente). El cultivar también tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ). En promedio, ‘Changlot’ fue el más temprano en alcanzar la máxima acumulación de aceite (DOY 442), mientras que ‘Arbequina’ y ‘Coratina’ fueron los más tardíos (DOY 463 y 466, respectivamente). Sin embargo, al igual que para los estadios anteriores, la interacción CxL fue significativa ( $p < 0,05$ ) con lo cual el orden entre cultivares no se mantuvo similar en las distintas localidades. La temporada no mostró efecto significativo en los análisis balanceados.

Cuadro 5.1- Variabilidad (%) como fracción del cuadrado medio total explicado por cultivar (C), localidad (L) y temporada (S) para cada uno de los estadios de Desarrollo del fruto en todo el conjunto de datos. Los estadios considerados fueron: fecha de inicio y fin del endurecimiento de carozo (ECini y ECfin), fecha en la que se alcanza la mitad o la totalidad del peso seco del fruto (PSF50, PSF100) y la fecha en la que se alcanza la máxima concentración de aceite (AC100).

Fuente de variabilidad	gl	ECini	ECfin	PSF50	PSF100	AC100
Cultivar	6	5,7	3,3	5,9	6,7	25,2
Localidad	6	87,0	93,0	83,0	75,7	40,1
Temporada	1	0,8	0,9	6,6	6,7	24,0
C x L	20	1,2	0,9	2,2	5,0	5,5
C x S	6	5,0	1,7	1,8	4,3	4,0
Error	211	0,3	0,2	0,5	1,5	1,3
Total	250	100	100	100	100	100

Cuadro 5.2 - Estadios (día del año, DOY) de desarrollo del fruto: inicio (ECini) y fin (ECfin) de endurecimiento del carozo, momento en que se alcanza la mitad (PSF50) o la totalidad (PSF100) del peso seco máximo del fruto y momento en que se alcanza la máxima concentración de aceite en el fruto (AC100) para todas las localidades (L) y dos temporadas de crecimiento (S) en los dos cultivares más comunes evaluados (C; Arbequina y Picual), Se observaron cinco arboles (replicas) por cada combinación de C x L x S, Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ).

Fuentes de variación	ECini	ECfin	PSF50	PSF100	AC100
<b>Cultivar (C)</b>					
Arbequina	342 a	359 a	378 a	450	456
Picual	347 b	362 b	387 b	455	451
p-valor	<0,01	<0,01	<0,01	0,38	0,27
<b>Localidad (L)</b>					
La Rioja	331 a	346 a	356 a	412 a	447 a
Chilecito	336 b	352 b	363 a	426 a	466 b
Huaco	351 d	366 d	393 b	465 b	462 b
Cañada Honda	347 c	360 c	-	-	-
Beltrán	352 d	369 e	395 b	477 b	445 a
Rivadavia	353 d	370 e	405 c	483 b	452 a
p-valor	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Temporada (S)</b>					
2018-2019	347 b	362 b	379 a	446 a	455
2019-2020	343 a	358 a	386 b	459 b	452
p-valor	<0,01	<0,01	0,01	0,04	0,06
<b>Significancia de las interacciones (p-valor)</b>					
C x L	<0,01	0,51	<0,01	0,01	<0,01
C x S	0,38	0,01	0,07	0,26	0,12
C x L x S	0,26	0,46	0,64	0,11	0,38

Cuadro 5.3- estadios (día del año, DOY) de desarrollo del fruto para todas los cultivares (C), tres localidades (L) y dos temporadas de crecimiento (S), Se observaron cinco arboles (réplicas) por cada combinación de C x L x S, Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ). Los estadios están detallados en el cuadro 5.3.

Fuente de variación	ECini	ECfin	PSF50	PSF100	AC100
Cultivar (C)					
Arbequina	346 ab	361 b	381 ab	459	463 c
Arbosana	346 a	360 a	377 a	442	473 d
Changlot	347 ab	359 a	387 c	456	442 a
Coratina	351 c	364 b	384 bc	450	466 c
Picual	348 bc	363 b	386 bc	454	449 b
p-valor	<0,01	<0,01	0,01	0,23	<0,01
Localidad (L)					
Chilecito	335 a	349 a	362 a	421 a	470 c
Huaco	353 b	366 b	392 b	461 b	463 b
Beltrán	352 b	369 c	396 b	474 c	445 a
p-valor	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Temporada (S)					
2018-2019	346 a	362	380 a	444 a	461 b
2019-2020	350 b	361	387 b	459 b	457 a
p-valor	0,12	0,18	<0,01	<0,01	0,02
Significancia de las interacciones (p-valor)					
C x L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
C x S	<0,01	0,06	0,07	0,50	0,13
C x L x S	0,53	0,84	<0,20	<0,02	<0,01

#### 5.3.4 Variabilidad en la dinámica de crecimiento del fruto y acumulación de aceite explicada por la localidad, cultivar y temporada

En el presente capítulo describimos la dinámica de incremento de peso seco del fruto sobre la base de su tasa de crecimiento ( $PSF_{tasa}$ ), la duración del mismo ( $PSF_{dur}$ ) y el máximo peso seco alcanzado ( $PSF_{max}$ ), y analizamos la influencia que tienen los factores localidad, cultivar y temporada sobre estos parámetros. El cultivar explica la mayor parte de la variabilidad tanto en  $PSF_{tasa}$  (87%) como  $PSF_{max}$  (88%, Cuadro 5.4). En contraste, el cultivar sólo explicó un 27% de la variabilidad observada en  $PSF_{dur}$ , donde la localidad fue

la fuente de variación más importante. Para *PSFdur* también fue importante la interacción CxL que explicó un 13% de la variabilidad. Si bien la localidad tuvo un efecto significativo sobre *PSFtasa* y *PSFmax*, el orden entre localidades no parece consistente con el gradiente latitudinal y el rango de altitud (Cuadro 5.5). En el análisis balanceado (Cuadro 5.6) el cultivar tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) sobre *PSFtasa*, siendo 'Changlot' el de mayor tasa (0,02g/día) y el que alcanzó el mayor *PSFmax* (2,61g). En contraste, 'Arbosana' y 'Arbosana' fueron los de menor tasa de crecimiento (0,005g/día) y menor *PSFmax* (0,84g y 0,72g, respectivamente). En cuanto al parámetro *PSFdur* fue significativamente afectado por la localidad, en Rivadavia y Beltrán el crecimiento del fruto fue prolongado (156 y 165 días respectivamente) mientras que en La Rioja la duración fue menor (112 días). El factor temporada explicó significativamente la variabilidad de los parámetros *PSFdur* (1,1%) y *PSFmax* (2,4%), aunque en una proporción menor que el resto de las fuentes de variación evaluadas (Cuadro 5.5 y Cuadro 5.6). En la temporada 2019-2020 el *PSFmax* fue mayor que en 2018-2019, relacionado a una mayor duración del periodo (*PSFdur*) durante esta temporada.

La dinámica de acumulación de aceite fue descrita a través de la estimación de los parámetros: tasa de acumulación de aceite en el fruto (*ACtasa*), duración (*ACdur*) y máxima concentración de aceite en el fruto completo (*ACmax*), obtenidos a través de modelos bilineales con plateau y considerando como inicio de la acumulación de aceite la fecha de final de endurecimiento de carozo. La localidad explicó la mayor parte de la variabilidad observada en los parámetros *ACtasa* (73%) y *ACdur* (60%), mientras que sólo explicó el 26% de la variabilidad en *ACmax* (Cuadro 5.4). En el grupo de datos balanceados, las localidades con mayores tasas de acumulación de aceite (*ACtasa*) fueron Beltrán (0,550 %/día) y

Rivadavia (0,449 %/día), mientras que Chilecito presentó los valores más bajos (0,298 %/día) (Cuadro 5.5). Por el contrario, la duración del periodo de acumulación de aceite (*ACdur*) fue más corta en Beltrán (77 días) y Rivadavia (82 días) y más larga en Chilecito (120 días) y La Rioja (107 días). La máxima concentración de aceite (*ACmax*) resultó significativamente menor en Chilecito y La Rioja (37-38%) que en Huaco (46%), localidad cuyos valores de *ACtasa* y *ACdur* fueron intermedios. El efecto del cultivar resultó significativo ( $p < 0,05$ ) para explicar la variabilidad observada en *ACmax*, donde 'Changlot' presentó los valores más altos (48%), mientras 'Coratina' (41%) y 'Picual' (42%) los más bajos (Cuadro 5.6). Se evidencia que *ACmax* estuvo asociado de manera directa a *ACtasa*, tanto para la variabilidad de origen genotípico como ambiental. Por último, la temporada tuvo un efecto significativo sobre *ACmax* explicando un 48% de su variabilidad. La concentración de aceite fue 3-4 puntos porcentuales mayor en 2018-2019 que en la temporada anterior (Cuadro 5.5 y Cuadro 5.6), de forma inversa a lo ocurrido con el máximo peso seco del fruto.

Cuadro 5.4– Variabilidad (%) como fracción del cuadrado medio total explicado por cultivar (C), localidad (L) y temporada (S) para los parámetros de las funciones ajustadas para crecimiento del fruto y acumulación de aceite en el fruto en todo el conjunto de datos. Las variables analizadas fueron: tasa de acumulación, duración de la acumulación y máximo acumulado de peso seco en el fruto (*PSFtasa*, *PSFdur*, *PSFmax*) y tasa de acumulación, duración de la acumulación y máxima concentración de aceite en el fruto (*ACTasa*, *ACdur*, *ACmax*).

Fuente de variabilidad	gl	PSFtasa	PSFdur	PSFmax	ACTasa	ACdur	ACmax
Cultivar	6	87,5	27,3	87,6	19,4	19,3	20,8
Localidad	6	9,0	44,7	6,7	73,3	60,1	26,1
Temporada	1	0,2	1,1	2,4	0,2	9,2	48,3
C x L	20	1,5	13,1	2,3	5,0	4,2	3,2
C x S	6	1,4	6,7	0,7	1,5	5,9	1,0
Error	216	0,3	7,2	0,3	0,6	1,3	0,5
Total	255	100	100	100	100	100	100

Cuadro 5.5– Parámetros de crecimiento del fruto (PSFtasa, PSFdur y PSFmax) y acumulación de aceite (ACtasa, ACdur, ACmax) para todas las localidades (L) y dos temporadas de crecimiento (S) en los dos cultivares más comunes evaluados (C; Arbequina y Picual), Se observaron cinco árboles (replicas) por cada combinación de C x L x S, Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ ).

Fuente de variación	PSFtasa (g/día)	PSFdur (días)	PSFmax (g)	ACtasa (%/día)	ACdur (días)	ACmax (%)
Cultivar (C)						
Arbequina	0,006 a	138	0,83 a	0,443	100	42
Picual	0,015 b	144	2,07 b	0,447	94	41
p-valor	<0,01	0,52	<0,01	0,72	0,35	0,33
Localidad (L)						
La Rioja	0,011 b	112 a	1,35 b	0,367 b	107 bc	37 a
Chilecito	0,008 a	131 ab	1,07 a	0,298 a	120 c	38 a
Huaco	0,012 b	143 bc	1,69 c	0,453 c	105 b	46 d
Cañada Honda	0,010 b	-	-	0,454 c	-	-
Beltrán	0,009 a	165 c	1,45 bc	0,550 d	77 a	42 b
Rivadavia	0,011 b	156 bc	1,69 c	0,549 d	82 a	44 c
p-valor	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Temporada (S)						
2018-2019	0,011	133	1,35 a	0,447	95	44 b
2019-2020	0,011	149	1,56 b	0,444	99	40 a
p-valor	0,20	0,06	<0,01	0,77	0,95	<0,01
Significancia de las interacciones (p-valor)						
C x L	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
C x S	0,88	0,37	0,13	0,46	0,07	0,75
C x L x S	<0,01	0,08	0,20	0,01	0,81	<0,01

Cuadro 5.6- Parámetros de crecimiento del fruto (PSFtasa, PSFdur y PSFmax) y acumulación de aceite (ACtasa, ACdur, ACmax) para tres localidades (L) y dos temporadas de crecimiento (S) en cinco cultivares (C; Arbequina, Arbosana, Changlot, Coratina y Picual), Se observaron cinco arboles (replicas) por cada combinación de C x L x S. Letras diferentes indican diferencias significativas utilizando post-test LSD ( $p < 0,05$ )

Fuente de variación	PSFtasa (g/día)	PSFdur (días)	PSFmax (g)	ACtasa (%/día)	ACdur (días)	ACmax (%)
<b>Cultivar (C)</b>						
Arbequina	0,005 a	156	0,84 a	0,423 ab	106 b	43 b
Arbosana	0,005 a	133	0,72 a	0,394 a	117 c	45 c
Changlot	0,020 d	137	2,61 d	0,607 c	87 a	48 d
Coratina	0,009 b	138	1,24 b	0,403 a	106 b	41 a
Picual	0,014 c	140	2,01 c	0,444 b	90 a	42 a
p-valor	<0,01	0,19	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Localidad (L)</b>						
Chilecito	0,010 a	126 a	1,22 a	0,324 a	128 c	42 a
Huaco	0,010 b	142 b	1,75 c	0,465 b	102 b	47 b
Beltrán	0,012 a	155 b	1,58 b	0,573 c	77 a	42 a
p-valor	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Temporada (S)</b>						
2018-2019	0,011	129 a	1,45 a	0,448	104	45 b
2019-2020	0,011	152 b	1,57 b	0,461	100	42 a
p-valor	0,16	<0,01	<0,01	0,16	0,02	<0,01
<b>Significancia de las interacciones (p-valor)</b>						
C x L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	<0,01
C x S	0,01	0,12	<0,01	0,02	0,09	0,54
C x L x S	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,03

### 5.3.5 Relación entre la tasa y la duración para el crecimiento del fruto y la acumulación de aceite

Al explorar la relación entre la tasa y duración del crecimiento del fruto (Fig. 5.3A) pudimos ver una correlación significativa ( $p < 0,05$ ) e inversa, solamente en cv. Arbequina donde se ajustó una regresión lineal ( $R^2=0,44$ ), mientras que en 'Picual' solo se observó una tendencia en el mismo sentido, pero la correlación no fue significativa. Por su parte, la relación entre la tasa y duración de acumulación de aceite (Fig. 5.3B) fue más clara. La correlación fue significativa ( $p < 0,05$ ) para ambos cultivares. Las funciones lineales ajustadas

para ambos cultivares no difirieron entre sí en pendiente ni ordenada al origen, con lo cual pudo ajustarse una única función lineal ( $R^2=0,77$ ).

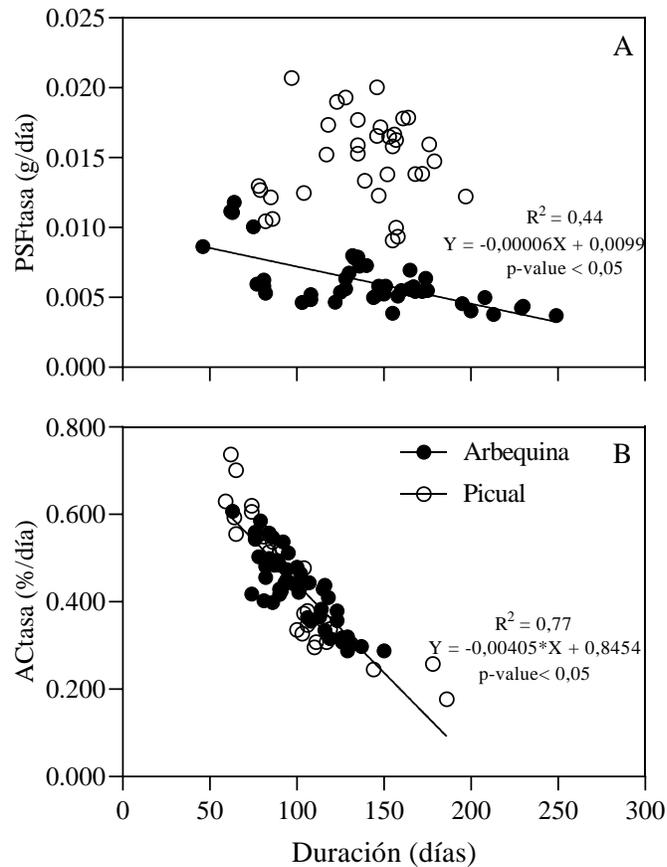


Figura 5.3– Tasa de acumulación de peso seco en el fruto (A) y acumulación de aceite (B) en función de su respectiva duración en dos cvs. de olivo ('Arbequina' y 'Picual') en todas las localidades y ambas temporadas evaluadas.

#### 5.4 Discusión

El periodo de endurecimiento de carozo o endocarpo (EC) es ampliamente utilizado como indicador para distintas prácticas de manejo, principalmente la aplicación de estrategias de riego deficitario (Pérez-López et al., 2008). El desarrollo y esclerificación del endocarpo inicia (*ECini*) al final de la Fase I de crecimiento del fruto. Durante la Fase II este proceso continúa a la vez que se ralentiza el crecimiento del mesocarpo. El fin del endurecimiento

(*ECfin*) marca el inicio de la Fase III (Rapoport et al., 2013) en la cual ocurre la biosíntesis de aceite en las células del mesocarpo. La influencia del ambiente sobre la temporalidad del EC ha sido poco estudiada y principalmente asociada a estudios de riego. Nuestros resultados indican que, a campo, entre las localidades extremas del gradiente, una diferencia de 5,5°C en la temperatura media de primavera (septiembre-noviembre, tomado de Capítulo II) se asoció con un adelanto de 22 y 24 días para el *ECini* y *ECfin*, respectivamente (Cuadro 5.2). El inicio del incremento lineal de la biosíntesis de aceite en el mesocarpo generalmente coincide con el final del endurecimiento del endocarpo (Beltrán et al., 2017, Ben Ari et al., 2021). Es decir que adelanto del *ECfin* en las localidades más cálidas indica que existe también un adelanto en el inicio de la acumulación de aceite. Además, en estas mismas localidades y temporadas, el adelanto en el cuaje del fruto (BBCH69, Capítulo II) había sido de 27 días, el desfase entre localidades se suavizó levemente entre BBCH69 y *ECfin*, de forma similar a lo observado por Mafrica et al., (2021) en un gradiente altitudinal en el sur de Italia. El adelanto de *ECfin* podría estar asociado indirectamente a las temperaturas de invierno y primavera temprana. En promedio para ambos años *ECfin* ocurrió el día 12/12 (DOY 346) en La Rioja, localidad de menor latitud y baja altitud, mientras que, en Rivadavia, localidad de mayor latitud, ocurrió el 5/1 (DOY 370). La variación similar entre la fecha de *ECini* y *ECfin* indica que no se modificó la duración del periodo entre ambos estadios. Por su parte, un estudio previo en España observó un efecto significativo de la temperatura sobre la duración del periodo de esclerificación masiva del endocarpo (Sánchez-Piñero et al., 2022). El nivel de riego es otro factor que parece influir en la duración de la esclerificación (Hamammi et al., 2013) y podría estar asociado a las diferencias observadas entre ambos resultados

Entre las localidades extremas del gradiente latitudinal (La Rioja y Rivadavia), la diferencia de temperatura del verano (enero-marzo) en promedio para ambas temporadas fue de 3,5°C (Capítulo II). Mientras que en La Rioja (localidad más cálida) *PSF100* se alcanzó en el mes de febrero (verano) en Rivadavia (localidad más fría) ocurrió en el mes de abril (otoño), quedando la fase lineal de crecimiento del fruto expuesta a mayor temperatura ambiente en el primer caso. El rango de peso seco final del fruto (*PSFmax*) estuvo entre 1,1g - 2,0g para todos los cultivares y ambientes. Como es esperable, el *PSFmax* estuvo principalmente influenciado por el cultivar (Cuadro 5.4), siendo 'Changlot' el de mayor tamaño y 'Arbequina' el menor en promedio entre localidades (Cuadro 5.5). Sin embargo, la localidad también tuvo un efecto significativo (Cuadro 5.6). En las localidades de mayor latitud (Rivadavia y Beltrán) o mayor altitud (Huaco) el tamaño de los frutos fue alrededor de un 30% superior a las de menor latitud (La Rioja y Chilecito). Esto concuerda con lo observado previamente a campo en nuestra región (Rondanini et al., 2014), y en Israel (Nissim et al., 2020). Así como también con los menores pesos finales obtenidos a partir de olivos calentados durante el verano (Miserere et al., 2023). Por el contrario, Mafrica et al., (2021) en el sur de Italia, observaron un mayor incremento del peso fresco del fruto en una localidad más cálida (menor altitud) con respecto a otras más frescas (mayor altitud), aunque este diferencial se asoció con un inicio anticipado del crecimiento de los frutos a mayores temperaturas que podría afectar positivamente el tamaño potencial del fruto (Sánchez-Piñeiro et al., 2022).

Las diferencias de *PSFmax* entre cultivares estuvieron asociadas a *PSFtasa*, lo cual concuerda con lo observado previamente por Trentacoste et al. (2012) para el peso fresco del fruto. Por el contrario, la disminución en *PSFmax* en las localidades más cálidas parece estar

asociada a una disminución en la duración del crecimiento de los frutos (*PSFdur*), mientras que la tasa (*PSFtasa*) tiene un menor cambio entre las localidades evaluadas (Cuadro 5.5) y éste no se asocia con el gradiente de latitud y rango de altitudes. En las condiciones de nuestro experimento, en las localidades más cálidas el periodo de crecimiento del fruto se acortó y se desplazó hacia fechas más temprana en la temporada. Sin embargo, esto no coincide con el nulo impacto del calentamiento sobre la duración de crecimiento del fruto observado para ‘Arbequina’ y ‘Coratina’ en un experimento manipulativo a campo (Miserere et al., 2023). La interacción localidad x cultivar también resultó significativa al explicar las variaciones en *PSFmax* en ambos análisis balanceados (Cuadro 5.2 y 5.5), lo cual concuerda con las observaciones de Nissim et al. (2020), donde uno de los cultivares ('Barnea') no varió su peso final de fruto entre localidades, mientras que otros cuatro cultivares si lo hicieron.

En olivo la concentración de aceite es un factor importante para definir la fecha de cosecha. La fecha de finalización de la acumulación de aceite (*AC100*) fue más temprana y tuvo un desfase menor entre localidades (21 días) que *PSF100* (Cuadro 5.2). La localidad fue el factor que mejor explicó *AC100* y en segundo lugar estuvo la temporada. Esto coincide con un estudio multiambiental realizado en el sur de España donde la combinación de localidad y temporada fue el único factor significativo para este mismo estadio (Navas-López et al., 2019). Sin embargo, en dicho estudio, mayores temperaturas entre junio y agosto (equivalente a diciembre-febrero en el hemisferio sur) se asociaron a un retraso en la fecha de *AC100*, mientras que, en nuestros resultados, la variación no pudo ser asociada claramente al gradiente de latitudes o rango de altitudes. La carga frutal es un factor que podría explicar parcialmente la variación de *AC100* ya que reducciones en la carga por raleo contribuyen a acelerar la evolución del índice de madurez del fruto (Barone et al., 1994), muchas veces

utilizado como indicador del fin de la acumulación de aceite (Trentacoste et al., 2010). Otros potenciales factores ambientales asociados podrían ser explorados en futuros estudios (por ej. estrés térmico, factores nutricionales). El cultivar explicó una proporción menor de la variabilidad en *ACI00*, aunque tuvo un efecto significativo siendo 'Changlot' el más temprano (18/3, DOY 442) y 'Arbosana' el más tardío (18/4, DOY 473). El rango de concentración de aceite final en el fruto (*ACmax*) estuvo entre 36,5% - 47,0%, para todos los cultivares y ambientes. Estos valores están en línea con los observados previamente en la región (Rondanini et al., 2014, Trentacoste et al., 2012). Las concentraciones máximas (~45%), fueron similares a las observadas en Israel (Nissim et al., 2020) pero las mínimas allí obtenidas en la localidad más cálida (~20%) fueron muy inferiores a las nuestras. Las localidades de Rivadavia, Beltrán y Huaco (mayor latitud o altitud) tuvieron concentraciones de aceite (*ACmax*) entre 42-46%, mientras que en La Rioja (menor latitud y altitud) se obtuvo un 37% en promedio entre cultivares. García-Inza et al. (2016) obtuvieron reducciones en la concentración de aceite en el mesocarpo directamente proporcionales a la temperatura durante el crecimiento del fruto, a razón de 1,8%/°C de incremento en la temperatura. Este valor se asemeja a nuestro caso, donde la diferencia entre la localidad más cálida (La Rioja) y la más fría (Huaco) durante el período enero-marzo fue de 4,1°C y la diferencia en *ACmax* fue de 9%, es decir a razón de 2,2%/°C. Esto indica que el adelanto y acortamiento del periodo de crecimiento del fruto en localidades más cálidas no parece causar un impacto adicional en la reducción de *ACmax* al efecto localidad por sí mismo. Sería importante realizar experimentos de calentamiento durante primavera y verano a fin de evaluar con más detalle las consecuencias del desplazamiento del ciclo sobre el rendimiento y calidad de aceite.

Las localidades de mayor latitud (Beltrán y Rivadavia) tuvieron las mayores tasas de acumulación de aceite (*AC<sub>tasa</sub>*) de 0,55%/día mientras que las menores se dieron en La Rioja (0,37%/día) seguida por Chilecito (0,29%/día). La duración de la acumulación de aceite (*AC<sub>dur</sub>*) también varió significativamente entre localidades, siendo más corta en Beltrán y Rivadavia y más extensa en La Rioja y Huaco. En general, los resultados indican que la variación en la concentración de aceite entre localidades está explicada principalmente por *AC<sub>tasa</sub>*, lo cual concuerda con lo observado en estudios previos (Rondanini et al., 2014, Miserere et al., 2023). La menor *AC<sub>tasa</sub>* en ambientes cálidos puede explicarse por efecto directo de la temperatura en la represión de genes involucrados en la biosíntesis de aceite (Nissim et al., 2020b), o bien por efectos negativos sobre la fotosíntesis e incrementos de la respiración del fruto (Ranalli et al., 1998) que limitan la cantidad de asimilados disponibles que tienen como destino la acumulación de aceite en el fruto. Otros factores, como la irradiancia o nutrición podrían condicionar la producción de fotoasimilados y la tasa de acumulación de aceite en los frutos, sin embargo, dada las similitudes en el manejo de los establecimientos considerados en nuestro estudio podemos considerar serian de poca magnitud en relación al efecto del ambiente térmico y el genotipo. Entre cultivares, *AC<sub>max</sub>* también parece estar explicada principalmente por *AC<sub>tasa</sub>* que presenta mayores variaciones que *AC<sub>dur</sub>* (Cuadro 5.6). Es decir que la variación en la concentración final de aceite en los frutos está explicada por la tasa de acumulación tanto al comparar entre ambientes como entre cultivares. Por su parte *AC<sub>dur</sub>* podría estar limitada por temperaturas bajas en el otoño ya que mínimas -1,7°C generan daños permanentes en el fruto (revisado por Fernández, 2014). Sin embargo, en el extremo sur de nuestro gradiente latitudinal las temperaturas mínimas absolutas estuvieron entre 0,8 y 8,0°C en marzo y entre 2,1 y 4,5°C en abril, por lo cual no existen indicios de efectos posibles sobre la lipogénesis. Aunque potencialmente

temperaturas mínimas bajas ocurridas en precosecha algunas noches del mes de marzo podrían detener o ralentizar el proceso, como fuera sugerido por Trentacoste et al. (2010). Es interesante profundizar esta evaluación como una posible limitante al cultivo en zonas de clima frío como la Patagonia argentina y para la introducción de nuevos cultivares, especialmente aquellos que alcanzan más tarde el final de su síntesis de aceite.

Resultan interesantes las relaciones inversas que se observaron entre tasa y duración de los procesos tanto de crecimiento de fruto como de acumulación de aceite (Fig. 5.3). Entre *PSF<sub>tasa</sub>* y *PSF<sub>dur</sub>* (Fig 5.3A), la correlación fue significativa solo para 'Arbequina' ( $R^2 = 0,44$ ). Para 'Picual' la tendencia es similar, y los valores de *PSF<sub>dur</sub>* son superiores a las de 'Arbequina' a igual tasa. La compensación entre *PSF<sub>tasa</sub>* y *PSF<sub>dur</sub>* sugiere una limitante genética para el peso seco del fruto. Es decir que, una variación en *PSF<sub>tasa</sub>* por factores ambientales (por ej. temperatura ambiente) traerá aparejada variación de signo opuesto en *PSF<sub>dur</sub>* ya que el incremento en peso no puede continuar más allá de un máximo potencial. Según lo observado en estudios previos el peso final del fruto se asocia principalmente al del mesocarpo y en menor medida al del endocarpo. Las diferencias de tamaño del mesocarpo asociadas al cultivar dependen a su vez del número de células mayormente formadas en las primeras 8 semanas post floración (Hamammi et al., 2013). Además del cultivar; la carga, el estadio hídrico de la planta, el ambiente lumínico y la temperatura ambiente son factores que modifican el tamaño del fruto (Fernández et al., 2015, Gucci et al., 2018, Cherbiy-Hoffmann et al., 2013, García-Inza et al., 2014). En consecuencia, un mejor entendimiento de la relación negativa observada entre *PSF<sub>tasa</sub>* y *PSF<sub>dur</sub>* puede requerir de experimentos en condiciones controladas.

En cuanto a la acumulación de aceite la correlación entre tasa y duración fue clara y ambos cultivares (Picual y Arbequina) se ajustaron a un único modelo con un alto coeficiente de determinación ( $R^2 = 0,77$ ). Esto había sido reportado previamente por Rondanini et al., (2014), aunque con un menor coeficiente de determinación ( $R^2=0,41$ ). De acuerdo a nuestras observaciones, el incremento de *ACdur* fue marcadamente menor en magnitud que *ACtasa*, con lo cual, a pesar de la compensación predomina el efecto de *ACtasa* sobre el peso final del fruto. Es difícil establecer hipótesis claras para explicar las causas de esta correlación dado que *ACtasa* está influenciada por el gradiente altitudinal y el rango de altitudes mientras que esta influencia no es clara en *ACdur*. Aunque, la variación en *ACdur* podría estar asociado al adelanto del inicio en la acumulación de aceite (*ECfin*) en localidades más cálidas. Los cuerpos lipídicos se forman en las células del mesocarpo a partir de las 7 semanas post floración, estos se agrupan mediante el proceso de coalescencia a partir en la semana 8, llegando a ocupar el ~80% del volumen celular en la semana 17 post-floración (Mateucci et al., 2011). Trabajos que aborden la influencia de la temperatura y otros factores ambientales sobre el número de cuerpos lipídicos y el proceso de coalescencia pueden ser importantes para comprender las causas la compensación entre tasa y duración observadas en la acumulación de aceite. Es interesante también que la compensación entre *ACtasa* y *ACdur* puede describirse con una única función para 'Arbequina' y 'Picual'. Evaluar un número más amplio de cultivares sería importante para explorar genotipos cuya correlación entre tasa y duración del proceso resulte en mayores concentraciones de aceite aún a temperaturas cálidas.

## 5.5 Conclusiones

El uso de un gradiente latitudinal con un rango de altitudes nos permitió observar la influencia de ambientes con temperaturas contrastantes sobre el desarrollo y la dinámica del crecimiento y la acumulación de aceite en el fruto de distintos cultivares de olivo. El endurecimiento de carozo se adelantó en las localidades más cálidas, lo cual trae aparejado un inicio más temprano de la síntesis de aceite. El momento en que se alcanzó el máximo peso seco del fruto también se adelantó en las localidades más cálidas. Si bien el peso final del fruto estuvo principalmente influido por el cultivar, las localidades más frescas tuvieron en promedio mayores pesos de fruto. La variación en el peso seco del fruto entre cultivares se explicó por la tasa de crecimiento mientras que entre localidades parece asociarse a la duración del mismo. La concentración final de aceite resultó mayor en localidades más frescas, y se asocia principalmente con la tasa de acumulación. Además, existen fuertes correlaciones negativas entre tasa y acumulación de peso seco y de aceite del fruto sobre las cuales sería interesante indagar en futuros experimentos manipulativos.

# **CAPITULO VI**

## **Discusión General**

## 6.1 Importancia y originalidad de la tesis

El olivo, al igual que todos los frutales de clima templado, presenta un ciclo anual de desarrollo reproductivo y vegetativo que responde a factores genotípicos y ambientales. La domesticación del olivo comenzó hace alrededor de 6000 años en medio oriente expandiéndose luego a toda la cuenca del Mar Mediterráneo. En cada región se desarrollaron cultivares locales obtenidos por propagaciones clonales de ejemplares excepcionales, los cuales también se distribuyeron por intercambio comercial o migraciones (Trujillo et al., 2013). Los cultivares utilizados en las plantaciones actuales conservan sus características de adaptación a climas de tipo mediterráneo. Sin embargo, en el último siglo la producción a gran escala de olivo se expandió a nuevas regiones del mundo con otros tipos climáticos. En la Argentina, se concentró en Cuyo y la región del Noroeste (NOA). Simultáneamente, las temperaturas globales se incrementaron entre 0,95°C y 1,2°C sobre los niveles preindustriales (IPCC, 2023) y continuará aumentando, en conjunto con el aumento de la frecuencia de eventos climáticos extremos (Arias et al., 2021). La temperatura, particularmente la de invierno y primavera, es el factor principal que controla la fenología y los procesos de desarrollo (Pope et al., 2014), los cuales inciden directamente sobre el rendimiento y la calidad de la fruta y del aceite. El avance en nuestro entendimiento sobre el impacto de aumento de temperatura sobre el ciclo del cultivo es indispensable para generar estrategias de adaptación que permitan mitigar los efectos negativos de cambios abruptos en el ambiente del cultivo sobre el rendimiento del cultivo y la calidad de la producción (Fraga et al., 2021)

Esta tesis es uno de los primeros trabajos en abordar el comportamiento fenológico del olivo en las principales regiones productoras argentinas. Además, lo hace desde una doble

perspectiva: por un lado, utilizando datos tomados a campo en cultivos comerciales en localidades de tres provincias, Mendoza, San Juan y La Rioja, e incluyendo en el caso de La Rioja un rango de altitudes que refleja la realidad productiva de la provincia. Por otra parte, se utilizó una metodología experimental que cámaras de techo abierto (OTC) previamente diseñada y ajustada por el grupo de trabajo (Miserere et al., 2019) que nos permitió ejercer un calentamiento de 4°C sobre la temperatura ambiente en plantas completas y mantener controles apropiados no calentados de forma de separar los efectos del factor temperatura de otros factores ambientales. Además, esta metodología nos permitió aislar el factor "temperatura de primavera" de la temperatura durante otros momentos del ciclo, lo cual no es posible en ensayos a nivel geográfico. La información obtenida a partir de las dos metodologías mencionadas es complementaria, enriquece las conclusiones obtenidas y favorece la aplicabilidad de los resultados al diseño de estrategias a futuro.

## **6.2 Validación de hipótesis de la tesis**

A partir de los resultados obtenidos y expuestos en los Capítulos II-V se pudieron poner a prueba las hipótesis derivadas de cada uno de los objetivos específicos. En esta sección, pasaremos en limpio la aceptación o rechazo de las hipótesis planteadas y su justificación. Cada uno de los objetivos específicos y sus respectivas hipótesis apuntan a ser respondidos a partir de los resultados obtenidos a partir de solo uno de abordajes metodológicos (ensayo en un gradiente latitudinal con rango de altitudes -OE1 y OE4- o ensayo en cámara de techo abierto -OE2 y OE3). Aunque en algunos casos, contribuyen a responder un interrogante conjuntamente. A los fines de la discusión general ordenaremos la respuesta de las hipótesis de modo del condensar los resultados obtenidos en ambos experimentos.

A partir del OE1, se hipotetizó que *en aquellas localidades de mayores temperaturas medias en pre-floración algunos de los cultivares evaluados retrasan la fecha de los estadios fenológicos de desarrollo de la inflorescencia y floración, mientras que otros cultivares adelantan la fecha con respecto a lo que ocurre en localidades más frías* (Hipótesis 1- OE1). Los resultados expuestos en el Capítulo II muestran que todos los cultivares adelantaron la plena floración (BBCH65), principal estadio reproductivo primaveral, en localidades más cálidas debido a menores latitudes y/o altitudes. Es decir que en todos los casos la magnitud del adelanto de la fenología debido a altas temperaturas durante la ecodormición, superó a la respuesta de sentido opuesto (retraso de la fenología) que podría suponer la menor acumulación de frío durante la endodormición. El adelanto de BBCH65 fue de 26 días con una diferencia de temperatura de 4,2°C en invierno y 6°C a principios de la primavera entre las localidades extremas del gradiente. El único indicio de atraso en la fenología en localidades más cálidas se vio en el estadio de apertura de yemas florales (BBCH 53) en la localidad de La Rioja durante 2018-2019, donde en los cultivares Arbequina, Arbosana, Manzanilla y Picual, el estadio BBCH 53 se retrasó con respecto a las localidades más frescas de Chilecito y Huaco. Esto sugiere que temperaturas extremadamente altas durante la primavera, prácticamente fuera de nuestro rango de evaluación, podrían tener consecuencias retrasando la fenología o al menos sus estadios tempranos. Diferencias contundentes entre cultivares no pudieron observarse en nuestro diseño experimental. **Por este motivo la Hipótesis 1-OE1 en su sentido completo es rechazada.** Por su parte el OE2- Hipótesis 1 planteaba que en el experimento en OTCs *las plantas expuestas a tratamientos térmicos calentados (T+) durante la primavera adelantarían BBCH53 y BBCH65*. Los resultados expuestos en el Capítulo III indican que todos los estadios reproductivos se adelantaron en los tratamientos T+ tanto para 'Arbequina' como para 'Coratina'. En este caso, un incremento

de 4°C en la temperatura únicamente durante la primavera, una vez completados los requerimientos de frío, se asoció con un adelanto de 15 días en promedio entre cultivares y temporadas. **En este sentido la Hipótesis 1-OE2 puede ser aceptada.** Los resultados de ambos experimentos van en el mismo sentido, la acumulación de tiempo térmico tiene un peso mayor sobre la fenología que la acumulación de frío invernal causando un adelanto de todos los cultivares en aquellos ambientes con primaveras más cálidas, independientemente de las temperaturas invernales.

La segunda Hipótesis 2 desprendida del OE1 postula que *La duración de los períodos de desarrollo de la inflorescencias y floración se acorta en aquellas localidades donde la temperatura durante el mismo periodo es más elevada.* Tanto el periodo entre BBCH53-60 (desarrollo de las inflorescencias) como BBCH60-69 (floración) se acortaron a razón de 4,3 días/°C y 0,6 días/°C respectivamente al incrementarse la temperatura durante el mismo periodo en la mayor parte del rango de temperaturas exploradas (15°C-23°C). **Por lo cual la Hipótesis 2-OE1 puede ser aceptada.** Por su parte la Hipótesis 2- OE2 propone que, en las OTCs, *la duración de los mismos períodos de desarrollo se acorta en los tratamientos T+ con respecto a los T0.* En este experimento los períodos BBCH53-60 y BBCH60-69 fueron significativamente ( $p < 0,05$ ) más cortos en T+ que en T0. BBCH53-60 se acorto a razón de 1,25 días/°C de incremento en la temperatura durante el mismo y BBCH60-69 lo hizo a razón de 1,65 días/°C. De esta forma **la Hipótesis 2-OE2 puede ser aceptada sobre la base a los resultados.** A partir de ambos experimentos podemos concluir que la duración de los períodos reproductivos de formación de las inflorescencias y floración son altamente sensibles a las temperaturas ambientes, acortándose al aumentar la temperatura media durante los mismos en todos los cultivares analizados.

Con respecto al desarrollo vegetativo en primavera la Hipótesis 3- OE1 plantea que el mismo *inicia más temprano y finaliza más tardíamente en localidades de mayor temperatura ambiental, haciendo que en estas localidades el crecimiento vegetativo sea más prologado que en aquellas más frescas*. El estadio de separación de las primeras hojas (BBCH11) tuvo una variabilidad relativamente escasa entre las localidades y esta variabilidad no parece responder al gradiente de temperatura. Además, el estadio que marca un 70% de la elongación de brotes (BBCH37) fue muy variable entre árboles en una misma localidad lo cual podría indicar que otros factores no evaluados en nuestro ensayo tendría una influencia muy importante y no es posible sacar conclusiones contundentes respecto de su correlación con la temperatura ambiente. Por último, la duración del periodo entre ambos BBCH11-37 no mostró correlación con la temperatura media durante el mismo período.

**Sobre la base de estos resultados expuestos en el Capítulo II la Hipótesis 3-OE1 es rechazada.** Por otra parte, en el OE2- Hipótesis 4 se plantea que en el experimento de las OTCs *BBCH11 ocurre más temprano en las plantas sometidas a tratamientos T+ que, en los controles, en cambio BBCH37 no mostraría diferencias por ocurrir posteriormente al fin de los tratamientos*. En los resultados expuestos en el Capítulo III se obtuvo un adelanto de BBCH11 de 10 días para 'Arbequina' y 17 días para 'Coratina' en T+ respecto de T0 en la primavera de la temporada 2018-2019. Por otro lado, BBCH37 tuvo un elevado desvío estándar y no se pudieron ver diferencias significativas entre tratamientos **Esto lleva a aceptar la Hipótesis 3-OE1 sobre la base de los resultados.** El análisis en conjunto de ambos experimentos permite concluir que el estadio BBCH11 responde, como era esperado, con un adelanto ante el incremento de las temperaturas de primavera, si bien su sensibilidad es considerablemente menor que los estadios reproductivos. Además, existe una gran variabilidad en la fecha de BBCH11 para distintos brotes dentro de cada planta. Eso hace

que, en nuestros diseños experimentales, especialmente en el experimento en fincas comerciales, la variabilidad entre localidades resulte difícil de observar. En futuros experimentos sería importante incrementar la intensidad de muestreo (número de brotes por planta) en este estadio a fin de disminuir el error experimental y poder extraer resultados más precisos.

El Objetivo Específico 3 (OE3) es evaluar el impacto de la temperatura primaveral sobre la producción de biomasa reproductiva y vegetativa. La Hipótesis 1-OE3 plantea que *ante un calentamiento primaveral de 4°C (T+) por sobre las temperaturas control (T0) en el experimento en OTCs la intensidad de floración no muestra diferencias con respecto T0 mientras que el porcentaje de cuaje y la biomasa total de frutos es menor en T+ que en T0.* El cultivar 'Coratina' se comportó según lo predicho a partir de la hipótesis, pero la respuesta fue diferente en 'Arbequina'. La intensidad de floración en la temporada 2019-2020 se mantuvo igual entre tratamientos en T+ y T0 para ambos cultivares. En 'Coratina' las plantas sometidas a T+ tuvieron una caída en el cuaje con respecto a T0 que se asoció con un gran incremento en la proporción de frutos partenocárpicos (no fecundados y sin valor comercial). En cambio, el cuaje en 'Arbequina' se mantuvo constante entre tratamientos y el rendimiento final en peso de fruta fue superior en el tratamiento T+ respecto de T0 probablemente debido en parte al estadio más avanzado de desarrollo de los frutos en T+ al momento de cosecha. En cambio, en 'Coratina' el rendimiento se redujo en T+ debido a que la disminución en el tamaño de frutos no fue compensada por el incremento en su peso. **Estos resultados, expuestos en el Capítulo IV, nos llevan a rechazar la hipótesis en sentido estricto.** Esta respuesta diferencial entre cultivares es interesante, ya que nos indica que aquellos cultivares

con un cuaje de fruto más tolerante a altas temperaturas podrían adaptarse mejor a ambientes cálidos, sosteniendo su cuaje y manteniendo o incrementando su rendimiento.

En relación al crecimiento vegetativo, dentro del OE3 la Hipótesis 2 postula que *en los tratamientos calentados se da un inicio anticipado y una mayor tasa de crecimiento de los órganos vegetativos (ramas y tronco) y una mayor biomasa vegetativa final*. Sobre la base de los resultados expuestos en el Capítulo IV, la elongación de ramas y el crecimiento del área seccional del tronco no mostraron diferencias entre tratamientos de temperatura al ser evaluados en distintas fechas durante la primavera. En cuanto a la biomasa vegetativa al final de los tratamientos, las raíces son el único órgano que incrementó su peso en T+ respecto de T0, el resto de los órganos y la biomasa vegetativa total se mantuvieron iguales entre ambos tratamientos. Es decir que **la Hipótesis 2-OE3 es rechazada**. Esto concuerda con lo discutido en cuanto a los estadios fenológicos vegetativos, la variabilidad ante diferentes ambientes térmicos parece ser relativamente baja en lo relativo al crecimiento y desarrollo vegetativo. Al menos, la magnitud de variación lograda en la temperatura ambiente en los experimentos expuestos en esta tesis no permite concluir que exista una correlación fuerte entre la temperatura de la primavera y el crecimiento vegetativo.

La relación entre la biomasa vegetativa y reproductiva al final de la primavera condiciona la proporción entre fuentes y destinos dentro de la planta durante todo el resto de la estación de crecimiento hasta la madurez del fruto. La **Hipótesis 3-OE3** propone que *la carga de fruta en relación a la biomasa vegetativa al final de los tratamientos (diciembre) es menor en aquellas plantas calentadas durante la primavera*. Los resultados mostraron una interacción cultivar x tratamiento respecto de esta variable. Para 'Coratina' la proporción de fruta respecto a la biomasa vegetativa fue menor en T+, mientras que para 'Arbequina' fue mayor en este tratamiento. Esto se explica principalmente por las diferencias en el cuaje y

por ende el número de frutos. **Esto permite rechazar la Hipótesis 3-OE3 en sentido estricto**, aunque sería interesante evaluar en futuros experimentos diferencias genotípicas en esta respuesta y sus consecuencias en productividad al momento de madurez del fruto.

El objetivo específico 4 (OE4) es caracterizar el crecimiento del fruto y la acumulación de aceite en el mismo gradiente latitudinal y rango de altitudes, asociado a variaciones en la temperatura ambiente observado en OE1. En este sentido, la **Hipótesis 1 - OE4** postula que *en las localidades más cálidas la fecha de endurecimiento de carozo y la fecha en que se alcanza la concentración máxima de aceite se adelantan con respecto a aquellas de menor temperatura*. En base a los resultados expuestos en el Capítulo V **podemos rechazar la Hipótesis 1-OE4**, ya que si bien el endurecimiento de carozo si se adelanta en más de 20 días en la localidad más cálida (La Rioja) respecto de la más fresca (Rivadavia) este adelanto no se sostiene hacia el final de la acumulación de aceite donde no se ve diferencia significativa entre la fecha de dichas localidades. De esta forma, si bien el inicio del periodo en que se da la fase lineal de la síntesis de aceite comienza más temprano en localidades cálidas, el periodo completo no tiene un desplazamiento en la temporada y las condiciones a las que queda expuesta la lipogénesis no parecen quedar indirectamente determinadas por la temperatura de primavera y su efecto sobre la fenología primaveral

La **Hipótesis 2- OE4** postula que *en las localidades más cálidas la concentración final de aceite en el fruto es menor que en aquellas más frías, lo cual se explica por un cambio en la tasa de acumulación de aceite*. Las mayores concentraciones de aceite y tasas de acumulación observadas en las localidades de Huaco (mayor altitud) y Beltrán (mayor latitud) respecto a las más cálidas especialmente La Rioja (menor altitud y latitud) permite aceptar la Hipótesis 2-OE4. Esto brinda evidencias a campo y en condiciones productivas

que explican el mecanismo general por el cual tiene lugar la disminución en el contenido de aceite a altas temperaturas ambientales, proceso previamente observado en estudios previos del grupo de trabajo.

### **6.3 Posibles líneas de investigación futuras**

La presente tesis buscó indagar en cuestiones hasta el momento poco investigadas acerca del efecto de la temperatura ambiental sobre distintos estadios fenológicos tanto reproductivos como vegetativos y sus implicancias sobre el crecimiento y la producción en olivo. Sin embargo, algunos resultados dejan interrogantes abiertos que podrán ser respondidos en el marco de futuras investigaciones.

#### **¿La información recopilada en esta tesis es útil para contribuir a la validación de los actuales modelos fenológicos utilizados para olivo y otros frutales?**

A los efectos de este trabajo una importante cantidad de datos fenológicos y meteorológicos fueron obtenidos a lo largo de dos temporadas en siete localidades productivas diferentes en un gradiente latitudinal con un rango de altitudes. Los datos fueron tomados con instrumental calibrados y criterios de observación unificados, lo cual es valioso para futuros usos y análisis. Uno de estos usos puede ser la validación de modelos fenológicos de floración desarrollados en regiones tradicionales de cultivo del mediterráneo (De Melo Abreu et al., 2004) o utilizados en varias especies de frutales templados (Fischman et al., 1987a, 1987b). En general estos modelos se validan únicamente en la misma región donde fueron calibrados excluyendo así fuentes de variabilidad ambiental muy importantes si el objetivo es comprender el funcionamiento del cultivo. A su vez estos modelos fenológicos son una pieza importante de los modelos agronómicos generales para el cultivo.

Aprovechando nuestro seguimiento fenológico completo, la validación de los modelos podría realizarse también sobre estadios tempranos del desarrollo de la inflorescencia. Estos estadios se encuentran más próximos al final de la endodormición y podrían mejorar nuestra comprensión de los efectos del frío invernal sobre las modificaciones en la fenología del cultivo. Además, continuar con los esfuerzos de muestreo fenológico y registro de temperaturas en futuras temporadas sería interesante para tener estimaciones sobre el cambio en la fecha de ocurrencia de los estadios fenológicos en series de años a fin de tener una mayor precisión a la hora de proyectar cambios en los ciclos en un futuro cercano. En este sentido, sería importante también la calibración de metodologías que permitan realizar observaciones fenológicas a partir de imágenes satelitales u obtenidas mediante vehículos aéreos no tripulados, siendo que existen técnicas en desarrollo principalmente para cultivos anuales (Yang et al., 2020, Han et al., 2020, Pan et al., 2021) y especies forestales (Park et al, 2019, Gray et al., 2021)

**¿La respuesta diferencial observada en el cuaje entre 'Arbequina' y 'Coratina' puede evaluarse en un set más amplio de cultivares? ¿Una menor caída en el cuaje podría ser un carácter importante en la selección de cultivares adaptados a altas temperatura ambiental?**

Los experimentos manipulativos de la temperatura sobre plantas completas de olivo permiten observar efectos muy interesantes de la temperatura, los cuales a campo en ocasiones son difíciles de detectar debido al gran número de variables que influyen en los procesos y la imposibilidad de su control. Por ejemplo, los resultados expuestos en el Capítulo IV permiten observar un claro efecto negativo de un incremento en 4°C en la temperatura en primavera sobre el cuaje en 'Coratina', mientras que este se mantuvo estable

en 'Arbequina'. Esto posiblemente guarda relación con diferencias en el rendimiento del polen en un ambiente determinado (Vuletin-Selak et al., 2013). Hacia el final de la primavera, esta diferencia se asoció a un rendimiento estable ante la temperatura para 'Arbequina' y una gran caída del rendimiento en 'Coratina' ante altas temperaturas. Por esto, la evaluación en condiciones de OTCs de un set más amplio de cultivares y las compatibilidades entre ellos puede ser una estrategia importante para seleccionar de forma acelerada dentro de aquellos cultivares existentes, los más adecuados para implantar en zonas cálidas en los próximos años.

**¿Es posible determinar con mayor precisión la magnitud de la influencia de la temperatura ambiental sobre el desarrollo vegetativo?**

La variabilidad en el desarrollo vegetativo y su control genotípico y ambiental es un factor poco abordado en la literatura hasta la fecha y de gran importancia para el manejo de la poda y la gestión de los restos vegetales. Estudios previos en la cuenca del mediterráneo han propuesto temperaturas base de alrededor de 13°C para el crecimiento vegetativo en olivo y mayores tasas de crecimiento a temperaturas superiores (Pérez-López et al., 2008). Nuestros resultados a campo en las regiones productoras argentinas (Capítulo II) y mediante manipulaciones a campo de la temperatura (Capítulo III y IV) parecen indicar que el desarrollo y el crecimiento vegetativo tienen una menor sensibilidad a la temperatura ambiente que las variables reproductivas. Además, existe una mayor variabilidad a nivel de rama, dentro de cada árbol. Nuevos estudios a nivel de planta, con mayor número de mediciones dentro de cada planta y un incremento en el número de repeticiones serían importantes para cuantificar con precisión los efectos de la temperatura ambiental sobre el inicio, la tasa y la duración del crecimiento y desarrollo vegetativo en olivo. Además, la

evaluación de otros factores ambientales (disponibilidad hídrica, carga, nutrición) en conjunto con la temperatura sería de importancia.

**¿La relación inversa entre la tasa y la duración de la acumulación de aceite se asocia a un potencial máximo de concentración propio del genotipo?**

Los resultados del Capítulo V muestran una correlación importante entre la tasa y la duración de acumulación de aceite, esto podría deberse a que existe un potencial genético máximo de concentración de aceite propio del cultivar en un ambiente determinado, el cual se define durante los estadios tempranos de desarrollo del fruto. Por ende, incrementos en la tasa de acumulación incidirían necesariamente en disminuciones en la duración del período por alcanzarse antes dicho peso potencial. Por otra parte, la correlación negativa podría asociarse a otras variables no consideradas que influyen simultáneamente y de manera opuesta en la tasa y la duración. Este punto es interesante de explorar a future en experimentos manipulativos que permitan comprender cuales son las limitantes para la obtención de frutos con mayor concentración de aceite.

## BIBLIOGRAFIA

---

- Aguilera, F., Trigo, M. del M., Orlandi, F., Msallem, M., Díaz-de la Guardia, C., Ruiz-Valenzuela, L., Galán, C., Ben Dhiab, A., Bonofiglio, T., Fornaciari, M. (2015). Phenological models to predict the main flowering phases of olive (*Olea europaea* L.) along a latitudinal and longitudinal gradient across the Mediterranean region. *Int. J. Biometeorol.* 59, 629–641. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0876-7>.
- Ainsworth, E.A., Long S.P. (2021). 30 years of free air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global change biology*, 27, 27-49. doi: 10.1111/gcb.15375
- Albarracín, V., Hall, A. J., Searles, P. S., & Rousseaux, M. C. (2017). Responses of vegetative growth and fruit yield to winter and summer mechanical pruning in olive trees. *Scientia Horticulturae*, 225, 185-194.
- Arias, P.A., Bellouin N, Coppola E., Jones R.G., Krinner G., Marotzke V, Naik V., Palmer M.D., Plattner G.-K., Rogelj J., Rojas M., Sillmann J., Storelvmo T., Thorne P.W., Trewin B., Achuta Rao K., Adhikary B., Allan R.P., Armour K.,...and Zickfeld K. (2021). Technical Summary. En: Masson-Delmotte, V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., and Zhou B. (Eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (pp. 33–144) Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.002.
- Atkinson, D., & Porter, J. R. (1996). Temperature, plant development and crop yields. *Trends in Plant Science*, 1(4), 119-124.
- Aybar, V., Ladux J.L., Montalván D., Fernández, F. (2006). Fenología del Olivar- Observaciones Fenológicas en el Olivar (pp. 1–12).
- Aybar, V. E., De Melo-Abreu, J. P., Searles, P. S., Matias, A. C., Del Río, C., Caballero, J. M., & Rousseaux, M. C. (2015). Evaluation of olive flowering at low latitude sites in argentina using a chilling requirement model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(1), 1–10. doi: <https://doi.org/10.5424/sjar/2015131-6375>
- Ayerza, R., Sibbett, G. S. (2001). Thermal adaptability of olive (*Olea europaea* L.) to the Arid Chaco of Argentina. *Agriculture, ecosystems & environment*, 84(3), 277-285. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00260-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00260-7)
- Barone, E., Gullo, G., Zappia, R., & Inglese, P. (1994). Effect of crop load on fruit ripening and olive oil (*Olea europaea* L.) quality. *Journal of Horticultural Science*, 69(1), 67-73.
- Barranco, D. (2017). Variedades y Patrones, In: Barranco, D., Fernandez-Escobar, R., Rallo,

- L. (Eds.), *El Cultivo del Olivo* (7th Edition), Mundiprensa. Madrid, pp. 65-95
- Barranco, D., Cimato, A., Fiorino, P., Rallo, L., Touzani, A., Castañeda, C., Serafini, F., Trujillo, I. (2000). *Catálogo mundial de variedades de olivo*. Consejo Oleícola Internacional, Madrid.
- Bartolini, S., Leccese, A., & Andreini, L. (2014). Influence of canopy fruit location on morphological, histochemical and biochemical changes in two oil olive cultivars. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 148(6), 1221-1230.
- Belaj, A., de la Rosa, R., León, L., Gabaldón-Leal, C., Santos, C., Porras, R., de la Cruz-Blanco, M., Lorite, I.J. (2020). Phenological diversity in a world olive germplasm bank: Potential use for breeding programs and climate change studies. *Spanish J. Agric. Res.* 18, e0701. <https://doi.org/10.5424/sjar/2020181-15017>.
- Beltrán, G., Uceda, M., Hermoso, M., Frías, L. (2017). Maduración. En: Barranco, D., Fernández-Escobar, R., Rallo L., *El cultivo del olivo*, 6, 187-212.
- Ben-Ari, G., Biton, I., Many, Y., Namdar, D., & Samach, A. (2021). Elevated temperatures negatively affect olive productive cycle and oil quality. *Agronomy*, 11(8), 1492.
- Benlloch-González, M., Manuel, J., Paz, M., Sánchez-lucas, R., Fernández-escobar, R., Benlloch, M. (2016). Effect of moderate high temperature on the vegetative growth and potassium allocation in olive plants. *Journal of Plant Physiology*, 207, 22–29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.10.001>
- Benlloch-González, M., Sánchez-Lucas, R., Benlloch, M., Ricardo, F.E. (2018). An approach to global warming effects on flowering and fruit set of olive trees growing under field conditions. *Sci. Hortic.* 240, 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.054>.
- Benlloch-González, M., Sánchez-Lucas, R., Bejaoui, M. A., Benlloch, M., Fernández-Escobar, R. (2019). Global warming effects on yield and fruit maturation of olive trees growing under field conditions. *Scientia Horticulturae*, 249, 162-167.
- Berman, M. E., DeJong, T. M. (1997). Diurnal patterns of stem extension growth in peach (*Prunus persica*): temperature and fluctuations in water status determine growth rate. *Physiologia Plantarum*, 100(2), 361-370. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb04794.x>
- Besnard, G., Terral, J. F., Cornille, A. (2018). On the origins and domestication of the olive: a review and perspectives. *Annals of botany*, 121(3), 385-403. doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcx145>
- Bonofiglio, T., Orlandi, F., Sgromo, C., Romano, B., Fornaciari, M., (2009). Evidences of olive pollination date variations in relation to spring temperature trends. *Aerobiologia*. 25, 227–237. <https://doi.org/10.1007/s10453-009-9128-4>.
- Bonofiglio, T., Orlandi, F., Sgromo, C., Romano, B., Fornaciari, M., 2008. Influence of

- temperature and rainfall on timing of olive (*Olea europaea*) flowering in Southern Italy. *New Zeal. J. Crop Hortic. Sci.* 36, 59–69. <https://doi.org/10.1080/01140670809510221>.
- Burkart, R., Bárbaro, N.O., Sánchez, O., Gómez, D.A., 1999. Ecorregiones de la Argentina, Administración de Parques Nacionales y Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible, Buenos Aires.
- C3S, Copernicus Climate Change Service (2023). Surface air temperature for July 2023. <https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-july-2023>
- Cabezas, J.M., Ruiz-Ramos, M., Soriano, M.A., Gabaldón-Leal, C., Santos, C. & Lorite, I.J. (2020). Identifying adaptation strategies to climate change for Mediterranean olive orchards using impact response surfaces. *Agric. Syst.* 185, 102937. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102937>
- Cabré, F., Nuñez, M. (2020). Impacts of climate change on viticulture in Argentina. *Reg. Environ. Chang.* 20. doi: <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01607-8>
- Cámara Olivícola de San Juan. (2018). Informe olivícola nacional 2017. <http://camaraolivicola.com.ar/wp-content/uploads/2018/09/Informe-Oliv%C3%ADcola-5-de-septiembre-de-2018.pdf>
- Campoy, J.A., Ruiz, D., Egea, J., 2011. Dormancy in temperate fruit trees in a global warming context: A review. *Sci. Hortic.* 130, 357–372. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.011>.
- Carciofi I., Guevara Lynch J. P., Maspi N. (2022). Olivicultura en Argentina. Aprendiendo de la experiencia internacional: políticas públicas para el desarrollo sostenible del sector. Ministerio de Desarrollo Productivo Argentina. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2022/05/26\\_-\\_olivicultura\\_-\\_arg.\\_productiva.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2022/05/26_-_olivicultura_-_arg._productiva.pdf)
- Caretta A., Ortega A., Ortiz Maldonado A. (2004) Probabilidades de daño por viento zonda en la floración de frutales, vid y olivos. Mendoza, Argentina. *Rev. FCA UNCuyo*, 2, 49-59
- Ceci, L. N., Carelli, A. A. (2007). Characterization of monovarietal argentinian olive oils from new productive zones. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 84(12), 1125–1136. <https://doi.org/10.1007/s11746-007-1140-7>
- Cherbiy-Hoffmann, S. U., Hall, A. J., & Rousseaux, M. C. (2013). Fruit , yield and vegetative growth responses to photosynthetically active radiation during oil synthesis in olive trees. *Scientia Horticulturae*.
- Cherbiy-Hoffmann, S. U., Hall, A. J., Searles, P. S., & Rousseaux, M. C. (2015). Responses of olive tree yield determinants and components to shading during potentially critical phenological phases. *Scientia Horticulturae*, 184, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.029>
- Chmielewski, F. M., Müller, A., Bruns, E. (2004). Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest*

- Meteorology*, 121(1–2), 69–78. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(03\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00161-8)
- Chmielewski, F. M. (2013). Phenology in Agriculture and Horticulture. En: Schuartz M.D. (Ed.) Phenology: an integrative environmental science (pp 539-561). DOI 10.1007/978-94-007-6925-0
- Chuine, I. (2000). A unified model for budburst of trees. *Journal of theoretical biology*, 207(3), 337-347. doi: <https://doi.org/10.1006/jtbi.2000.2178>
- Chuine, I., Garcia de Cortazar-Anturi, I., Koen, K., Hanninen, H., (2013). Plant development models. En: Schuartz M.D. (Ed.) Phenology: an integrative environmental science (pp. 275-293). DOI 10.1007/978-94-007-6925-0
- Civantos L. (1997). La olivicultura en el mundo y en España Pp. 90-33 en Barranco D., Fernández-Escobar, R. y Rallo L. (eds.) El cultivo del olivo. Jura de Andalucía, Ediciones Mundi-Prensa, Andalucía.
- Clark, D. B., Clark, D. A., Oberbauer, S. F. (2010). Annual wood production in a tropical rain forest in NE Costa Rica linked to climatic variation but not to increasing CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*, 16(2), 747-759. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02004.x>
- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A., & Schwartz, M. D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in ecology & evolution*, 22(7), 357-365. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>
- Colbrant, P., Fabre, P. (1975). Stades repères de l'olivier. *L'Olivier. Invuflec, Paris*, 24-25.
- Conde-Innamorato, P., Arias-Sibillotte, M., Villamil, J. J., Bruzzone, J., Bernaschina, Y., Ferrari, V., Zoppolo, R., Villamil, J., Leoni, C., 2019. It is feasible to produce olive oil in temperate humid climate regions. *Front. Plant Sci.* 10, 1544. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01544>
- Conde, C., Delrot, S. & Gerós, H. (2008). Physiological, biochemical and molecular changes occurring during olive development and ripening. *J. Plant Physiol.* 165, 1545-1562. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.04.018>
- Contreras, C., Pierantozzi, P., Maestri, D., Tivani, M., Searles, P., Brizuela, M., ... & Torres, M. (2022). How temperatures may affect the synthesis of fatty acids during olive fruit ripening: Genes at work in the field. *Plants*, 12(1), 54.
- Cornes, R., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M., Jones, P.D., 2018. An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation datasets, *J. Geophys. Res. Atmos.* 123, 9391-9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Correa-Tedesco, G., Rousseaux, M. C., & Searles, P. S. (2010). Plant growth and yield responses in olive (*Olea europaea*) to different irrigation levels in an arid region of Argentina. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1829–1837. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.020>

- Cuevas J., Rallo L & Rapoport H. (1994). Initial fruit set at high temperature in olive, *Olea europaea* L. *Journal of Horticultural Science*, 69 (4) 65-672.
- Dag, A., Bustan, A., Avni, A., Tzipori, I., Lavee, S., & Riov, J. (2010). *Scientia Horticulturae* Timing of fruit removal affects concurrent vegetative growth and subsequent return bloom and yield in olive (*Olea europaea* L.), 123, 469–472. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.11.014>
- De Andres F. (1974). Estados tipo fenológicos de olivo. *Comunicaciones del Servicio de Defensa contra Plagas Estudios y Experiencias. Ministerio de Agricultura*. 33-74.
- d'Andria, R., Morelli, G. (2000, September). Irrigation regime affects yield and oil quality of olive trees. In *IV International Symposium on Olive Growing 586* (pp. 273-276).
- D'Arrigo R.D., Kaufmann R.K., Davi N., Jacoby G.C., Laskowski C., Myneni R.B., Cherubini P. (2004). Thresholds for warming-induced growth decline at elevational tree line in the Yukon Territory, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 18, 1-7. doi: doi:10.1029/2004GB002249
- Davidson, A., Da Silva, D., Quintana, B., DeJong, T. M. (2015). The phyllochron of prunus persica shoots is relatively constant under controlled growth conditions but seasonally increases in the field in ways unrelated to patterns of temperature or radiation. *Scientia Horticulturae*, 184, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.033>
- De Boeck H.J., Lemmens C.M.H.M., Zavalloni C., Gielen B., Malchair S., Carnol M., Merckx R., Van den Berge J., Ceulemans R., Nijs I. (2008) Biomass production in experimental grasslands of different species richness during three years of climate warming. *Biogosciences*, 5 585-594
- De Melo-Abreu, J. P., Barranco, D., Cordeiro, A. M., Tous, J., Rogado, B. M., Villalobos, F. J. (2004). Modelling olive flowering date using chilling for dormancy release and thermal time. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125(1–2), 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.02.009>
- DeJong, T.M. (2015). Ecophysiological limits to yield of peach production systems. *Acta Hort.* 1084, 503-516. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1084.69>
- DeJong, T.M (2021). *Concepts for understanding fruit trees*. CABI
- Dias, C. S., Arias-Sibillotte, M., Tiscornia, G., Severino, V., Pasa, M., Herter, F. G., Mello-Farias P., Conde-Innamorato, P. (2022). Low spring temperature may negatively influence olive yield. *Australian Journal of Crop Science*, 16(9), 1094-1100.
- Di Lena, B., Farinelli, D., Palliotti, A., Poni, S., Theodore, M., Tombesi, S., Theodore, M. (2017). Impact of climate change on the possible expansion of almond cultivation area pole-ward : a case study of Abruzzo , Italy. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 0(0), 1–7. <https://doi.org/10.1080/14620316.2017.1357433>
- Di Paola, A., Chiriaco, M.V., Di Paola, F., Nieddu, G. (2021). A phenological model for olive (*Olea europaea* l. var *europaea*) growing in Italy. *Plants*. 10, 1115-1131.

<https://doi.org/10.3390/plants10061115>.

- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, Y.C. (2020). InfoStat (Version 2020). Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Donnelly, A., Yu, R. (2017). The rise of phenology with climate change: an evaluation of IJB publications. *International Journal of Biometeorology*, 61(1), 29-50. doi: <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1371-8>
- Eccel, E., Rea, R., Caffarra, A., Crisci, A. (2009). Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phenological acclimation. *International journal of biometeorology*, 53(3), 273-286. doi: <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0213-8>
- El Yaacoubi, A., Malagi, G., Oukabli, A., Hafidi, M., Legave, J. M. (2014). Global warming impact on floral phenology of fruit trees species in Mediterranean region. *Scientia Horticulturae*, 180, 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.041>
- Elloumi O., Ghrab M., Chatti A., Chaari, A., Ben Mimoun M. (2020) Phenological performance of olive tree in a warm production area of central Tunisia. *Scientia Horticulturae*, 259, 108759
- Engelen, C., Wechsler, T., Bakhshian, O., Smoly, I., Flaks, I., Friedlander, T., ... & Samach, A. (2023). Studying Parameters Affecting Accumulation of Chilling Units Required for Olive Winter Flower Induction. *Plants*, 12(8), 1714.
- Fatima, Z., Ahmed, M., Hussain, M., Abbas, G., Ul-Allah, S., Ahmad, S., Shakeel A., Niah A., Arif Ali M., Sarwar G., ul Haque E., Iqbal P., Hussain, S. (2020). The fingerprints of climate warming on cereal crops phenology and adaptation options. *Scientific Reports*, 10(1), 1-21. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74740-3>
- Feeley, K. J., Joseph Wright, S., Nur Supardi, M. N., Kassim, A. R., Davies, S. J. (2007). Decelerating growth in tropical forest trees. *Ecology letters*, 10(6), 461-469. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01033.x>
- Fernández, F. J., Ladux, J. L., Searles, P. S. (2015). Dynamics of shoot and fruit growth following fruit thinning in olive trees: Same season and subsequent season responses. *Scientia Horticulturae*, 192, 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.06.028>
- Fernández, F. J., Ladux, J. L., Hammami, S. B., Rapoport, H. F., & Searles, P. S. (2018). Fruit, mesocarp, and endocarp responses to crop load and to different estimates of source: sink ratio in olive (cv. Arauco) at final harvest. *Scientia Horticulturae*, 234, 49-57.
- Fernández, E., Caspersen, L., Illert, I., & Luedeling, E. (2021). Warm winters challenge the cultivation of temperate species in South America—a spatial analysis of chill accumulation. *Climatic Change*, 169(3), 1-19. doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03276-w>

- Fishman, S., Erez, A., & Couvillon, G. A. (1987a). The Temperature Dependence of Dormancy Breaking in Plants: Mathematical Analysis of a Two-Step Model Involving a Cooperative Transition. *J. Theor. Biol.*, *124*, 473–483.
- Fishman, S., Erez, A., & Couvillon, G. A. (1987b). The temperature dependence of dormancy breaking in plants: computer simulation of processes studied under controlled temperatures. *Journal of Theoretical Biology*, *126*(3), 309–321.
- Fleckinger, J. (1948). Les stades végétatifs des arbres fruitiers en rapport avec les traitements. *Pomologie Française, Supplément*, 81-93.
- Fraga, H., Moriondo, M., Leolini, L. & Santos, J.A. (2021). Mediterranean olive orchards under climate change: A review of future impacts and adaptation strategies. *Agronomy* *11*, 56-71. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010056>
- Freitas, T. R., Santos, J. A., Silva, A. P., Fonseca, A., & Fraga, H. (2023). Evaluation of historical and future thermal conditions for almond trees in north-eastern Portugal. *Climatic Change*, *176*(7), 89.
- Fu, Y., Li, X., Zhou, X., Geng, X., Guo, Y., & Zhang, Y. (2020). Progress in plant phenology modeling under global climate change. *Science China Earth Sciences*, *63*(9), 1237-1247.
- Gabaldón-Leal, C., Ruiz-Ramos, M., de la Rosa, R., León, L., Belaj, A., Rodríguez, A., Santos, C., Lorite, I.J., 2017. Impact of changes in mean and extreme temperatures caused by climate change on olive flowering in southern Spain. *Int. J. Climatol.* *37*, 940–957. <https://doi.org/10.1002/joc.5048>.
- Galán, C., García-Mozo, H., Cariñanos, P., Alcázar, P., Domínguez-Vilches, E., 2001. The role of temperature in the onset of the *Olea europaea* L. pollen season in southwestern Spain. *Int. J. Biometeorol.* *45*, 8–12. <https://doi.org/10.1007/s004840000081>.
- García-Inza, G. P., Castro, D. N., Hall, A. J., & Rousseaux, M. C. (2014). Responses to temperature of fruit dry weight, oil concentration, and oil fatty acid composition in olive (*Olea europaea* L. var. “arauco”). *European Journal of Agronomy*, *54*, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.12.005>
- García-Mozo, H., Oteros, J., Galán, C., 2015. Phenological changes in olive (*Olea europaea* L.) reproductive cycle in southern Spain due to climate change. *Ann. Agric. Environ. Med.* *22*, 421–428. <https://doi.org/10.5604/12321966.1167706>.
- Gómez del Campo, M., Morales Sillero, A. M., Vita Serman, F., Rousseaux, M. C., & Searles, P. S. (2010). El Olivar de los Valles áridos del Noroeste de Argentina (provincia de Catamarca, La Rioja y San Juan). *Olivae: revista oficial del Consejo Oleícola Internacional*, *2010* (114), 23-45.
- Gómez del Campo, M., Pérez-Expósito, M. Á., Hammami, S. B., Centeno, A., & Rapoport, H. F. (2014). Effect of varied summer deficit irrigation on components of olive fruit growth and development. *Agricultural Water Management*, *137*, 84-91.

- Gray, R. E., & Ewers, R. M. (2021). Monitoring forest phenology in a changing world. *Forests*, *12*(3), 297.
- Greven, M., Neal, S., Green, S., Dichio, B., Clothier, B. (2009). The effects of drought on the water use, fruit development and oil yield from young olive trees. *Agricultural Water Management*, *96*(11), 1525-1531.
- Guédon, Y., Legave, J. M. (2008). Analyzing the time-course variation of apple and pear tree dates of flowering stages in the global warming context. *Ecological Modelling*, *219*(1-2), 189-199. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.08.010>
- Guo, L., Dai, J., Ranjitkar, S., Xu, J., Luedeling, E. (2013). Response of chestnut phenology in China to climate variation and change. *Agricultural and Forest Meteorology*, *180*, 164-172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.004>
- Guo L., Dai J., Wang M., Xu J., Luedeling E. (2015). Responses of spring phenology in temperate zone trees to climate warming: A case study of apricot flowering in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, *201*, 1-7. doi:
- Gu, H., Qiao, Y., Xi, Z., Rossi, S., Smith, N. G., Liu, J., Chen, L. (2022). Warming-induced increase in carbon uptake is linked to earlier spring phenology in temperate and boreal forests. *Nature communications*, *13*(1), 1-8.
- Gucci, R., Caruso, G., Gennai, C., Esposto, S., Urbani, S., & Servili, M. (2019). Fruit growth, yield and oil quality changes induced by deficit irrigation at different stages of olive fruit development. *Agricultural Water Management*, *212*, 88-98.
- Gutiérrez, F., Varona, I., & Albi, M. A. (2000). Relation of acidity and sensory quality with sterol content of olive oil from stored fruit. *Journal of agricultural and food chemistry*, *48*(4), 1106-1110.
- Haberman, A., Bakhshian, O., Cerezo-Medina, S., Paltiel, J., Adler, C., Ben-Ari, G., Mercado J.A., Pliego-Alfaro, F., Lavee S. Samach, A. (2017). A possible role for flowering locus T-encoding genes in interpreting environmental and internal cues affecting olive (*Olea europaea* L.) flower induction. *Plant, cell & environment*, *40*(8), 1263-1280.
- Hackett, W. P., & Hartmann, H. T. (1963). Morphological development of buds of olive as related to low-temperature requirement for inflorescence formation. *Botanical Gazette*, *124*(5), 383-387.
- Hackett, W. & Hartmann, H.T. (1964). Inflorescence formation in olive as influenced by low temperature, photoperiod, and leaf area. *Bot. Gaz.* *125*, 65-72.
- Hammami, S. B., Manrique, T., & Rapoport, H. F. (2011). Cultivar-based fruit size in olive depends on different tissue and cellular processes throughout growth. *Scientia horticultrae*, *130*(2), 445-451.
- Hammami S.B.M., Costagli G., Rapoport H.F. (2013). Cell and tissue dynamics of olive endocarp sclerification vary according to water availability. *Physiologia Plantarum*, *149*(4), 571-582. <https://doi.org/10.1111/ppl.12097>

- Hamze, L. M., Trentacoste, E. R., Searles, P. S., & Rousseaux, M. C. (2022). Spring reproductive and vegetative phenology of olive (*Olea europaea* L.) cultivars at different air temperatures along a latitudinal-altitudinal gradient in Argentina. *Scientia Horticulturae*, 304, 111327.
- Johnson, I. R., & Thornley, J. H. M. (1985). Temperature dependence of plant and crop process. *Annals of Botany*, 55(1), 1-24.
- Han, J. H., Cho, J. G., Son, I. C., Kim, S. H., Lee, I. B., Choi, I. M., Kim, D. (2012). Effects of elevated carbon dioxide and temperature on photosynthesis and fruit characteristics of 'Niiitaka' pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai). *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 53(5), 357-361.
- Han, J., Shi, L., Yang, Q., Huang, K., Zha, Y., & Yu, J. (2021). Real-time detection of rice phenology through convolutional neural network using handheld camera images. *Precision Agriculture*, 22, 154-178.
- Hartmann, H.T. (1953). Effect of winter chilling on fruitfulness and vegetative growth in the olive. *Proc. Am. Soc Hort. Sci.*, 62, 184-190.
- Hatfield J.L., Prueger J.H. (2015) Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10
- Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in ecology & evolution*, 15 (2), 56-60.
- Inês, C., Gomez-Jimenez, M. C., & Cordeiro, A. M. (2023). Inflorescence Emergence and Flowering Response of Olive Cultivars Grown in Olive Reference Collection of Portugal (ORCP). *Plants*, 12(11), 2086.
- INDEC (2021). Censo Nacional Agropecuario 2018. Resultados definitivos. [https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/economia/cna2018\\_resultados\\_definitivos.pdf](https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/economia/cna2018_resultados_definitivos.pdf)
- IOOC (2000). *World Catalogue of Olive Varieties*. Madrid: International Olive Oil Council.
- IOOC. (2016). Trade Standard Applying to Olive Oils and Olive-Residue Oils. (*COIT.15/No.1*), (3), 1-17.
- IPCC (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on Climate Change. Team, C. W., Pachauri, R. K., & Meyer, L. A. *Geneva, Switzerland*, 151.
- IPCC (2018) Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)

- IPCC (2021). Technical Summary. en: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R.Y. and B.Z. (eds.)
- IPCC (2023) Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, (in press)
- Jach, M. E., Ceulemans, R., Murray, M. B. (2001). Impacts of greenhouse gases on the phenology of forest trees. En: Karnoski D.F., Ceulemans R., Scarascia-Mugnozza G.E, Innes J.L. (Eds.) *The impact of carbon dioxide and other greenhouse gases on forest ecosystems*. (pp. 193-235). CAB International.
- Jagadish, S. K., Way, D. A., Sharkey, T. D. (2021). Plant heat stress: Concepts directing future research. *Plant, Cell & Environment*, 44(7), 1992-2005. doi: <https://doi.org/10.1111/pce.14050>
- Kassambara, A. (2020). Rstatix: Pipe-friendly framework for basic statistical tests. 2020. R Package Version 0.7. 0. Available online: <https://cran.r-project.org/package=rstatix>
- Keller, M., & Tarara, J. M. (2010). Warm spring temperatures induce persistent season-long changes in shoot development in grapevines. *Annals of botany*, 106(1), 131-141.
- Keller, M., Tarara, J. M., & Mills, L. J. (2010). Spring temperatures alter reproductive development in grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16(3), 445-454.
- Keller, M (2020). *The Science of Grapevines*. Elsevier Inc.
- Körner, C. (2003). Carbon limitation in trees. *Journal of ecology*, 91(1), 4-17.
- Lambardi, M., & Rugini, E. (2003). Micropropagation of olive (*Olea europaea* L.). *Micropropagation of woody trees and fruits*, 621-646.
- Lavee, S. (2007). Biennial bearing in olive (*Olea europaea* L.). In *Annales Ser His Nat*. 17, 101-112.
- Leakey A.D.B, Ainsworth E.A., Bernacchi C.J., Rogers A., Long S. P., Ort D. R. (2009). Elevated CO<sub>2</sub> effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany*, 60(10), 2859-2876
- Legave, J. M., Christen, D., Giovannini, D., Oger, R. (2009). Global warming in Europe and its impacts on floral bud phenology in fruit species. *Acta Horticulturae*, 838, 21-26. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.838.1
- Legave, J. M., Guédon, Y., Malagi, G., El Yaacoubi, A., Bonhomme, M. (2015).

- Differentiated responses of apple tree floral phenology to global warming in contrasting climatic regions. *Frontiers in plant science*, 6, 1054. doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01054>
- Linderholm, H. W. (2006). Growing season changes in the last century. *Agricultural and forest meteorology*, 137(1-2), 1-14.
- Lo Bianco, R., & Scalisi, A. (2017). Water relations and carbohydrate partitioning of four greenhouse-grown olive genotypes under long-term drought. *Trees*, 31, 717-727. DOI 10.1007/s00468-016-1502-6
- López-Bernal Á, Morales A, García-Tejera O., Testi L., Orgaz F., De Melo-Abreu J.P. and Villalobos F.J. (2018) OliveCan: A Process-Based Model of Development, Growth and Yield of Olive Orchards. *Frontiers Plant Science*. 9, 632. doi: 10.3389/fpls.2018.00632
- López-Bernal, Á., García-Tejera, O., Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F. J. (2020). Studying and modelling winter dormancy in olive trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280, 107776. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107776>
- López-Bernal, Á., Fernandes-Silva, A. A., Vega, V. A., Hidalgo, J. C., León, L., Testi, L., & Villalobos, F. J. (2021). A fruit growth approach to estimate oil content in olives. *European Journal of Agronomy*, 123, 126206. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126206>
- López-Sáez, J. F., Gimenez-Martin, G., & González-Fernández, A. (1966). Duration of the cell division cycle and its dependence on temperature. *Zeitschrift für Zellforschung und Mikroskopische Anatomie*, 75, 591-600.
- Lorite, I. J., Gabaldón-leal, C., Ruiz-Ramos, M., Belaj, A., Rosa, R. De, León, L., Santos, C. (2018). Evaluation of olive response and adaptation strategies to climate change under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 204, 247–261. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.008>
- Luedeling, E., Schiffers, K., Fohrmann, T., & Urbach, C. (2021). PhenoFlex-an integrated model to predict spring phenology in temperate fruit trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108491. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108491>
- Luo, Q. (2011). Temperature thresholds and crop production: a review. *Climatic change*, 109(3-4), 583-598.
- Mafrika, R., Piscopo, A., De Bruno, A. & Poiana, M. (2021). Effects of climate on fruit growth and development on olive oil quality in cultivar carolea. *Agric*. 11, 1-18. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020147>
- Mairech, H., López-Bernal, Á., Moriondo, M., Dibari, C., Regni, L., Proietti P., Villalobos F.J., Testi, L. (2021). Sustainability of olive growing in the Mediterranean area under future climate scenarios: Exploring the effects of intensification and deficit irrigation. *Eur. J. Agron*. 129, 126319. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126319>
- Matteucci, M., DiAngeli, S., Errico, S., Lamanna, R., Perrotta, G., Altamura, M.M.,(2011).

- Cold affects the transcription of fatty acid desaturases and oil quality in the fruit of *Olea europaea* L. genotypes with different cold hardiness. *J. Exp. Bot.* 62, 3403–3420.
- Medina-Alonso M.G., Navas J.F., Cabezas J.M., Wwiland, C.M, Ríos-Mesa D., León L., de la Rosa R. (2020). Differences on flowering phenology under Mediterranean and Subtropical environments for two representative olive cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, 180, 104239
- Miserere, A., Searles, P.S., Hall, A.J., García-inza, G.P. & Rousseaux, M.C. (2019). Complementary active heating methods for evaluating the responses of young olive trees to warming. *Sci. Hortic.* 257, 108754. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108754>
- Miserere, A., Searles, P. S., Rousseaux, M. C. (2022). Oil yield components and biomass production responses to warming during the oil accumulation phase in young olive trees. *Scientia Horticulturae*, 291, 110618. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110618>
- Miserere, A., Searles, P. S., & Rousseaux, M. C. (2023). Influence of Experimental Warming on the Rate and Duration of Fruit Growth and Oil Accumulation in Young Olive Trees (cvs. Arbequina, Coratina). *Plants*, 12(10), 1942.
- Menzel, A. (2013). Plant phenological “fingerprints”. En Schwartz M.D. (Ed.) *Phenology: an integrative environmental science* (pp. 335-350). Springer, Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-007-6925-0
- Morales, A., Leffelaar, P. A., Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F. J. (2016). A dynamic model of potential growth of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *European journal of agronomy*, 74, 93-102.
- Moreno-Alías, I., Rapoport, H. F., León, L., & De la Rosa, R. (2010). Olive seedling first-flowering position and management. *Scientia horticulturae*, 124(1), 74-77.
- Moret, M., Ramírez-Tejero, J. A., Serrano, A., Ramírez-Yera, E., Cueva-López, M. D., Belaj, A., León L., de la Rosa, R., Bombarely, A. & Luque, F. (2022). Identification of genetic markers and genes putatively involved in determining olive fruit weight. *Plants*, 12(1), 155.
- Mousavi, S., de la Rosa, R., Moukhli, A., el Riachy, M., Mariotti, R., Torres, M., Pierantozzi, P., Stanzione, V., Mastio, V., Zaher, H., el Antari, A., Ayoub, S., Dandachi, F., Youssef, H., Aggelou, N., Contreras, C., Maestri, D., Belaj, A., Bufacchi, M.,... & Leon, L. (2019). Plasticity of fruit and oil traits in olive among different environments. *Scientific Reports* 9: 16968. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53169-3>
- Murphy G.M., Hurtado, R. H., Long, M. F., Serio, L. A., Faroni, P. A., Maio, S., Spescha, L. B., Barnatán, I. E. (2008). *Atlas agroclimático de la Argentina*. G. M. Murphy (Ed.). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Navas-López, J.F., Leon, L., Rapoport, H.F., Moreno-Alías, I., Lorite, I.J., de la Rosa, R.

- (2019). Genotype, environment and their interaction effects on olive tree flowering phenology and flower quality. *Euphytica* 215, 184-196. <https://doi.org/10.1007/s10681-019-2503-5>.
- Nissim, Y., Shlosberg, M., Biton, I., Many, Y., Doron-Faigenboim, A., Hovav, R., Kerem, Z., Avidan, B. & Ben-Ari, G. (2020a). A high temperature environment regulates the olive oil biosynthesis network. *Plants*, 9(9), 1135.
- Nissim, Y., Shlosberg, M., Biton, I., Many, Y., Doron-Faigenboim, A., Hovav, R., ... & Ben-Ari, G. (2020b). A high temperature environment regulates the olive oil biosynthesis network. *Plants*, 9(9), 1135.
- Orlandi, F., Lanari, D., Romano, B. & Fornaciari, M. (2006). New model to predict the timing of olive (*Olea europaea*) flowering: A case study in central Italy. *New Zeal. J. Crop Hortic. Sci.* 34, 93-99. <https://doi.org/10.1080/01140671.2006.9514392>
- Osborne, C. P., Mitchell, P. L., Sheehy, J. E., Woodward, F. I. (2000a). Modelling the recent historical impacts of atmospheric CO<sub>2</sub> and climate change on Mediterranean vegetation. *Global Change Biology*, 6(4), 445-458.
- Osborne, C.P., Chuine, I., Viner, D. & Woodward, F.I. (2000b). Olive phenology as a sensitive indicator of future climatic warming in the Mediterranean. *Plant, Cell Environ.* 23, 701-710. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00584.x>
- Oteros, J., García-Mozo, H., Vázquez, L., Mestre, A., Domínguez-Vilches, E., Galán, C. (2013). Modelling olive phenological response to weather and topography. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 179, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.07.008>
- Pan, L., Xia, H., Zhao, X., Guo, Y., & Qin, Y. (2021). Mapping winter crops using a phenology algorithm, time-series Sentinel-2 and Landsat-7/8 images, and Google Earth Engine. *Remote sensing*, 13(13), 2510.
- Pérez-López, D., Ribas, F., Moriana, A., Rapoport, H. F., De Juan, A. (2008). Influence of temperature on the growth and development of olive (*Olea europaea* L.) trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 83(2), 171–176. <https://doi.org/10.1080/14620316.2008.11512366>
- Piao S., Friedlingstein P., Ciais P., Viovy N., Demarty J. (2007) Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades. *Global biogeochemical cycles*, 21, 1-11
- Ponti, L., Gutierrez, A. P., Ruti, P. M., Dell'Aquila, A. (2014). Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(15), 5598-5603.
- Pope, K. S., Da Silva, D., Brown, P. H., & DeJong, T. M. (2014). A biologically based approach to modeling spring phenology in temperate deciduous trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.07.009>

- Porter, J.R., Xie L., Challinor A.J., Cochrane K., Howden S.M., Iqbal M.M., Lobell D.B., and Travasso M.I, 2014: Food security and food production systems. En: C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (Eds.) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 485-533) Cambridge University Press.
- Post, E., Steinman, B. A., Mann, M. E. (2018). Acceleration of phenological advance and warming with latitude over the past century. *Scientific reports*, 8(1), 1-8. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22258-0>
- Presicce, L. (2015). Variabilita' degli stadi fenologici in cultivar di olivo: studio di una collezione in Spagna. Universita' degli studi de Milano.
- Rallo, L., Martin, G. C. (1991). The role of chilling and releasing olive floral buds from dormancy. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 116(6), 1058-1062.
- Rallo, L. (1997). Fructificacion y Producción, in: Barranco, D., Fernandez Escobar, R., Rallo, L. (Eds.), *El Cultivo Del Olivo*. Mundiprensa y Junta de Andalucia, Madrid, pp. 107-116.
- Rallo, L., Cuevas, J. (2017). Fructificación y producción, In: Barranco, D., Fernandez-Escobar, R., Rallo, L. (Eds.), *El Cultivo del Olivo (7th Edition)*, Mundiprensa. Madrid, pp. 145-186.
- Ramos, A., Rapoport, H.F., Cabello, D., Rallo, L. (2018). Chilling accumulation, dormancy release temperature, and the role of leaves in olive reproductive budburst: Evaluation using shoot explants. *Sci. Hortic.* 231, 241-252. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.11.003>.
- Ranalli, A., Tombesi, A., Ferrante, M. L., & De Mattia, G. (1998). Respiratory rate of olive drupes during their ripening cycle and quality of oil extracted. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 77(3), 359-367.
- Rapoport H. (1997) Botánica y Morfología. Pp 37-60 en Barranco D., Fernández-Escobar, R. y Rallo L. (eds.) *El cultivo del olivo*. Juta de Andalucía, Ediciones Mundi-Prensa, Andalucía.
- Rapoport, H. F., Costagli, G., & Gucci, R. (2004). The effect of water deficit during early fruit development on olive fruit morphogenesis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 129(1), 121-127. <https://doi.org/10.21273/JASHS.129.1.0121>
- Rapoport, H.F., Hammami, S.B.M., Martins, P., Pérez-Priego, O., Orgaz, F. (2012). Influence of water deficits at different times during olive tree inflorescence and flower development. *Environ. Exp. Bot.* 77, 227-233. doi:10.1016/j.envexpbot.2011.11.021

- Rapoport, H.F., Pérez-López, D., Hammami, S.B.M., Agüera, J. & Moriana, A. (2013). Fruit pit hardening: Physical measurement during olive fruit growth. *Ann. Appl. Biol.* 163, 200-208. <https://doi.org/10.1111/aab.12046>
- Rapoport, H.F. (2014a). The reproductive biology of the olive tree and its relationship to extreme environmental conditions. *Acta Horticulturae* 1057, 41-50. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1057.2>
- Rapoport, H. F., Hammami, S. B. M., Rosati, A., & Gucci, R. (2014b). Advances in olive fruit cell and tissue development. En: *International Symposium on Physiological Principles and Their Application to Fruit Production* 1177, 209-214.
- Rapoport, H. F., Moreno-Alías, I. (2017). Botánica y morfología. En: Barranco, D., Fernández-Escobar, R., Rallo L., *El cultivo del olivo*, 2, 37-64.
- Ren P., Ziacco E., Rossi S., Biondi F., Prislán P., Liang E. (2019) Growth rate rather than growing season length determines wood biomass in dry environments. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 46-53.
- Richardson E.A., Seeley S.D., Walker D.R. (1974) A model for estimating the completion of rest for “Redhaven” and “Elberta” peach trees. *HortScience* 9. 331–332
- Riella, V., Borges, A., Arias-Sibillotte, M., Speroni, G., & Speranza, P. (2022). The effective pollination period of the olive cultivar ‘Arbequina’(*Olea europaea* L.) in a non-traditional region. *South African Journal of Botany*, 151, 246-254.
- Ro, H. M., Kim, P. G., Lee, I. B., Yiem, M. S., Woo, S. Y. (2001). Photosynthetic characteristics and growth responses of dwarf apple (*Malus domestica* Borkh. cv. Fuji) saplings after 3 years of exposure to elevated atmospheric carbon dioxide concentration and temperature. *Trees*, 15(4), 195-203. doi: <https://doi.org/10.1007/s004680100099>
- Rodrigo, J., Herrero, M. (2002). Effects of pre-blossom temperatures on flower development and fruit set in apricot. *Scientia Horticulturae*, 92(2), 125-135. doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00289-8](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00289-8)
- Royo, J., Pérez-Badía, R. (2014). Effects of topography and crown-exposure on olive tree phenology, 449–459. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0962-1>
- Royo, J., Pérez-Badía, R. (2015). Models for forecasting the flowering of Cornicabra olive groves. *Int. J. Biometeorol.* 59, 1547–1556. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-0961-6>.
- Rondanini, D. P., Castro, D. N., Searles, P. S., Rousseaux, M. C. (2011). Fatty acid profiles of varietal virgin olive oils (*Olea europaea* L.) from mature orchards in warm arid valleys of Northwestern Argentina (La Rioja). *Grasas Y Aceites*, 62(4), 399–409. <https://doi.org/10.3989/gya.125110>
- Rondanini, D. P., Castro, D. N., Searles, P. S., Rousseaux, M. C. (2014). Contrasting patterns of fatty acid composition and oil accumulation during fruit growth in several olive varieties and locations in a non-Mediterranean region. *European Journal of Agronomy*,

- 52, 237–246. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.002>
- Root, T.L., Price, J. T., Hall, K.R., Schneider S.H., Rosenzweig C. & Pounds J.A. (2013). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Letters to nature*, 421, 57-60. doi:10.1038/nature01333
- Rosati, A., Zipančić, M., Caporali, S., & Paoletti, A. (2010). Fruit set is inversely related to flower and fruit weight in olive (*Olea europaea* L.). *Scientia horticultrae*, 126(2), 200-204.
- Rosenzweig, C., Casassa G., Karoly D.J., A. Imeson A., Liu C., Menzel A., Rawlins S., Root T.L., Seguin B., Tryjanowski P., (2007) Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. En: *Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J and Hanson C.E. (Eds) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 79-131)
- Rousseaux, M.C., Figuerola, P.I., Correa-Tedesco, G. & Searles, P.S. (2009). Seasonal variations in sap flow and soil evaporation in an olive (*Olea europaea* L.) grove under two irrigation regimes in an arid region of Argentina. *Agric. Water Manag.* 96, 1037-1044. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.02.003>
- Sadras, V. O., Moran, M. A. (2013). Nonlinear effects of elevated temperature on grapevine phenology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.10.003>
- Salas, J. J., Sánchez, J., Ramli, U. S., Manaf, A. M., Williams, M., & Harwood, J. L. (2000). Biochemistry of lipid metabolism in olive and other oil fruits. *Progress in Lipid Research*, 39(2), 151-180.
- Sánchez-Estrada, A., & Cuevas, J. (2018). ‘Arbequina’ olive is self-incompatible. *Scientia Horticulturae*, 230, 50-55.
- Sánchez-Piñero, M., Martín-Palomo, M. J., Moriana, A., Corell, M., & Pérez-López, D. (2022). Endocarp Development Study in Full Irrigated Olive Orchards and Impact on Fruit Features at Harvest. *Plants*, 11(24), 3541. <https://doi.org/10.3390/plants11243541>
- Sanz-Cortés, F., Martínez-Calvo, J., Badenes, M. L., Bleiholder, H., Hack, H., Llácer, G., Meier, U. (2002). Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea*). *Annals of Applied Biology*, 140, 151–157. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2002.tb00167.x>
- Schwartz, M. D. (1999). Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. *International Journal of Biometeorology*, 42(3), 113-118.
- Searles, P. S., Agüero Alcarás, M., Rousseaux, M. C. (2011). *El consumo del agua por el cultivo de olivo (Olea europaea L.) en el noroeste de Argentina: una comparación con la Cuenca Mediterránea* (Doctoral dissertation, Asociación Argentina de Ecología).
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2015). Cambios climáticos en la región de Andes, en: Cambio Climático en Argentina; Tendencias y Proyecciones.

- Tercera Comunicación Nacional de la Republica Argentina a la Convencion Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (pp. 212-281)
- Segura J.(2008). Introduccion al desarrollo vegetal. Concepto de hormona vegetal. En: Azcon-Bieto J. y Talón M. (Eds.) Fundamentos de Fisiologia Vegetal. McGraw-Hill - Interamericana de España (pp. 351-373).
- Sicard, P., Thibaudon, M., Besancenot, J. P., Mangin, A. (2012). Forecast models and trends for the main characteristics of the *Olea* pollen season in Nice (south-eastern France) over the 1990–2009 period. *Grana*, 51(1), 52-62.
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M., Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global change biology*, 20(11), 3313-3328.
- Tognetti, R., Morales-Sillero, A., d'Andria, R., Fernandez, J. E., Lavini, A., Sebastiani, L., Troncoso, A. (2008). Deficit irrigation and fertigation practices in olive growing: convergences and divergences in two case studies. *Plant Biosystems*, 142(1), 138-148.
- Tombesi, S., Scalia, R., Connell, J., Lampinen, B. & Dejong, T.M. (2010). Fruit development in almond is influenced by early Spring temperatures in California. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 85, 317-322. <https://doi.org/10.1080/14620316.2010.11512674>
- Torres, M., Pierantozzi, P., Searles, P., Rousseaux, M.C., García-Inza, G., Miserere, A., Bodoira, R., Contreras, C., Maestri, D. (2017). Olive cultivation in the southern hemisphere: flowering, water requirements and oil quality responses to new crop environments. *Front. Plant Sci.* 8, 1830. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01830>.
- Trentacoste, E.R., Puertas, C.M., Sadras V.O. (2010). Effect of fruit load on oil yield components and dynamics of fruit growth and oil accumulation in olive (*Olea europaea* L.). *European Journal of Agronomy.* 32 (4), 249-254 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.01.002>
- Trentacoste, E. R., Puertas, C. M., Sadras, V. O. (2012). Modelling the intraspecific variation in the dynamics of fruit growth, oil and water concentration in olive (*Olea europaea* L.). *European Journal of Agronomy*, 38(1), 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.01.001>
- Trentacoste, E. R., Gómez-del-Campo, M., Rapoport, H. F. (2016). Olive fruit growth, tissue development and composition as affected by irradiance received in different hedgerow positions and orientations. *Scientia horticultrae*, 198, 284-293.
- Trentacoste, E.R., Calderón, F.J., Contreras-Zanessi, O., Galarza, W., Banco, A.P., Puertas, C.M. (2019). Effect of regulated deficit irrigation during the vegetative growth period on shoot elongation and oil yield components in olive hedgerows (cv. Arbosana) pruned annually on alternate sides in San Juan, Argentina. *Irrig. Sci.* 37, 533–546. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00632-8>.
- Trujillo, I., Ojeda, M. A., Urdiroz, N. M., Potter, D., Barranco, D., Rallo, L., & Diez, C. M. (2014). Identification of the Worldwide Olive Germplasm Bank of Córdoba (Spain)

- using SSR and morphological markers. *Tree Genetics & Genomes*, *10*, 141-155.
- Vivaldi, G. A., Strippoli, G., Pascuzzi, S., Stellacci, A. M., & Camposeo, S. (2015). Olive genotypes cultivated in an adult high-density orchard respond differently to canopy restraining by mechanical and manual pruning. *Scientia Horticulturae*, *192*, 391-399.
- Vuletin-Selak, G., Perica, S., Ban, S. G., & Poljak, M. (2013). The effect of temperature and genotype on pollen performance in olive (*Olea europaea* L.). *Scientia horticulturae*, *156*, 38-46.
- Vuletin-Selak, G., Cuevas, J., Goreta Ban, S., Pinillos, V., Dumicic, G., Perica, S. (2014a). The effect of temperature on the duration of the effective pollination period in “Oblica” olive (*Olea europaea*) cultivar. *Annals of Applied Biology*, *164*(1), 85–94. <https://doi.org/10.1111/aab.12082>
- Vuletin-Selak, G., Cuevas, J., Goreta Ban, S., & Perica, S. (2014b). Pollen tube performance in assessment of compatibility in olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, *165*, 36-43.
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J., Fromentin J-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, *416*(6879), 389-395. doi: <https://doi.org/10.1038/416389a>
- Wang, Shuxin, Wu, Z., Gong, Y., Wang, Shubiao, Zhang, W., Zhang, S., De Boeck, H.J. & Fu, Y.H. (2022). Climate warming shifts the time interval between flowering and leaf unfolding depending on the warming period. *Sci. China Life Sci.* 101413, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11427-022-2094-6>
- Way, D. A., Oren, R. (2010). Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data. *Tree physiology*, *30*(6), 669-688. doi: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq015>
- Xi, W., Zhang, Q., Lu, X., Wei, C., Yu, S., Zhou, Z. (2014). Improvement of flavour quality and consumer acceptance during postharvest ripening in greenhouse peaches by carbon dioxide enrichment. *Food chemistry*, *164*, 219-227.
- Zadoks, J. C., Chang T., Konzak C.F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, *14*, 415-421.