

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ACEITES ESENCIALES
EN FRUTOS DE LIMÓN UBICADOS EN LA ZONA INTERIOR Y
EXTERIOR DE ÁRBOLES PODADOS Y SIN PODAR**

por

Santiago PEÑA CARRETTO

Luis Mario SILVESTRI SILVA

**Trabajo final de grado
presentada como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

MONTEVIDEO

URUGUAY

2026

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento-No Comercial**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Directora:

Ing. Agr. (Dra.) Giuliana Gambetta

Codirectora:

Ing. Agr. (Mag.) Natalia Guimaraes

Tribunal:

Ing. Agr. (Dra.) Giuliana Gambetta

Ing. Agr. Oscar Bentancur

Ing. Agr. (Mag.) Ana Paula Mautone

Fecha:

30 de abril de 2026

Estudiantes:

Santiago Peña Carretto

Luis Mario Silvestri Silva

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	8
1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA CITRICULTURA NACIONAL	9
1.2 CICLO PRODUCTIVO EN CITRUS.....	9
1.2.1 <i>Brotación, floración y cuajado de frutos</i>	9
1.2.2 <i>Crecimiento y maduración de frutos</i>	10
1.3 FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN LA FISIOLOGÍA DEL FRUTO	11
1.4 EFECTO DE LA PODA EN LA DISTRIBUCIÓN DE LA LUZ Y SUS CONSECUENCIAS FISIOLÓGICAS	13
1.5 ACEITES ESENCIALES EN CÍTRICOS	15
1.5.1 <i>Influencia del material genético en la producción de aceite esencial</i>	16
1.5.2 <i>Efecto del tamaño y estado de desarrollo del fruto en la producción de aceite</i>	16
1.5.3 <i>Efecto de la irrigación y la nutrición mineral en el rendimiento de aceite</i> ...	17
2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	19
2.1 HIPÓTESIS	19
2.2 OBJETIVOS.....	19
3 MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1 TRATAMIENTOS	20
3.2 EVALUACIONES	21
3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	24
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1 MICROCLIMA DEL ÁRBOL: LUZ.....	26
4.2 MICROCLIMA DEL ÁRBOL: TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA.....	29
4.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS FRUTOS COSECHADOS	34
4.3.1 <i>Peso medio del fruto y grosor de la cáscara</i>	34
4.3.2 <i>Color de los frutos</i>	35
4.3.3 <i>Contenido de aceites esenciales en los frutos</i>	39
5 CONCLUSIONES.....	43
6 BIBLIOGRAFÍA.....	44

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1	Peso medio y grosor de cáscara de frutos de limón Criollo.....	34
Tabla 2	Color de frutos de limón Criollo en tres fechas de cosecha.....	35
Tabla 3	Concentración de aceites esenciales en frutos de limón determinado en tres fechas de cosecha.....	40
Figura 1	Vista general de un árbol podado (A) y no podado (B).....	21
Figura 2	Medición de radiación en la entrefila utilizando un ceptómetro.....	22
Figura 3	Sensor de temperatura y humedad relativa instalado en el interior de la copa del árbol.....	23
Figura 4	Escala de color de cosecha para limón.....	24
Figura 5	Radiación fotosintéticamente activa (PAR), (A, B) y diferencia entre PAR incidente y PAR transmitida (C).....	28
Figura 6	Temperatura mínima, media y máxima durante la estación de crecimiento de los frutos.....	29
Figura 7	Proporción de horas mensuales en diferentes rangos de temperatura en la copa de los árboles.....	31
Figura 8	33
Figura 9	Proporción de frutos en diferentes categorías comerciales de color.....	37

Resumen

La citricultura uruguaya consta de aproximadamente 13.300 hectáreas efectivas y una producción anual cercana a 245.000 toneladas, de las cuales el 40 % se destina a la exportación. Sin embargo, el limón, que representa el 31 % de la producción, se destina principalmente a la extracción de aceites esenciales (69 %). La concentración y composición de estos compuestos localizados en las glándulas del flavedo depende del microclima del árbol, la madurez del fruto y las prácticas de manejo. Existe escasa información sobre el efecto de la poda y la ubicación del fruto en el árbol sobre la producción de aceites esenciales. El objetivo general del trabajo fue evaluar la concentración de aceites esenciales de frutos de limón situados en la zona interior y exterior de árboles podados y no podados. Los objetivos específicos fueron: determinar el efecto de la poda y la ubicación de los frutos en el árbol, en su coloración, grosor de piel y concentración de aceites esenciales conforme avanza la madurez. El trabajo se realizó en un monte comercial de limón "Criollo" (*Citrus limon* (L.) Burm. F.) ubicado en Kiyú, San José. Se utilizaron 16 árboles distribuidos en dos tratamientos (podados y no podados), evaluándose frutos provenientes del interior y del exterior de la copa en tres fechas de cosecha (junio, julio y agosto 2021). Se registró la radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura y humedad relativa durante las fases II y III del crecimiento del fruto, y en cosecha se determinó el tamaño, color y contenido de aceites esenciales mediante el método Scott. El análisis estadístico se realizó mediante modelos lineales con medidas repetidas en el tiempo y prueba Tukey ($p \leq 0,05$). La poda incrementó la transmisión de radiación PAR al interior de la copa al inicio de la temporada, pero las diferencias disminuyeron hacia el otoño debido al crecimiento vegetativo. En los árboles podados y no podados, los frutos del interior permanecieron más verdes que los del exterior, y presentaron mayor concentración de aceites esenciales, independientemente del tratamiento. El avance de la maduración redujo la concentración de aceites, obteniéndose los valores más bajos en agosto. Asimismo, la poda redujo significativamente el contenido de aceites. Las principales conclusiones del trabajo son: (1) los frutos de limón Criollo cosechados en plena estación (junio y julio) presentaron mayor concentración de aceites esenciales que aquellos frutos cosechados a fines del invierno (agosto), (2) la poda realizada a fines de noviembre provocó una reducción de la concentración de aceites esenciales en los frutos y (3) los frutos ubicados en la zona interior de árboles podados y no podados lograron menor coloración que los del exterior y presentaron mayor concentración de aceites esenciales. Estos resultados resaltan la importancia del microclima y del manejo como determinantes del rendimiento de aceites

esenciales en limón, y evidencian la necesidad de profundizar en el desarrollo de prácticas de manejo dirigidas a optimizar este componente de alto valor.

Palabras clave: aceites esenciales, cítricos, poda

Abstract

Uruguayan citrus cultivation covers approximately 13.300 hectares and has an annual production of around 245.000 tons, of which 40% is exported. However, lemons, which account for 31% of production, are mainly used for the extraction of essential oils (69%). The concentration and composition of these compounds, located in the flavedo glands, depend on the microclimate of the tree, the ripeness of the fruit, and management practices. There is little information on the effect of pruning and the location of the fruit on the tree on the production of essential oils. The overall objective of the study was to evaluate the concentration of essential oils in lemon fruits located in the inner and outer areas of pruned and unpruned trees. The specific objectives were: determine the effect of pruning and fruit location on fruit color, peel thickness, and essential oil concentration as maturity progresses. The study was conducted in a commercial orchard of "Criollo" lemons (*Citrus limon* (L.) Burm. F.) located in Kiyú, San José. Sixteen trees were used, divided into two treatment groups (pruned and unpruned), and fruits from inside and outside the canopy were evaluated on three harvest dates (June, July, and August 2021). Photosynthetically active radiation (PAR), temperature, and relative humidity were recorded during Stage II and III of fruit growth, and at harvest, size, color, and essential oil content were determined using the Scott method. Statistical analysis was performed using linear models with repeated measures over time and Tukey's test ($p \leq 0.05$). Pruning increased PAR radiation transmission into the canopy at the beginning of the season, but the differences decreased toward autumn due to vegetative growth. In both pruned and unpruned trees, the fruits in the interior remained greener than those on the outside and had a higher concentration of essential oils, regardless of treatment. Advancing ripeness reduced the concentration of oils, with the lowest values obtained in August. Pruning also significantly reduced the oil content. The main conclusions of the study are: (1) Criollo lemons harvested in the middle of the season (June and July) had a higher concentration of essential oils than those harvested at the end of winter (August), (2) pruning at the end of November caused a reduction in the concentration of essential oils in the fruit, and (3) fruit located in the interior of pruned and unpruned trees achieved less coloration than those on the outside and had a higher concentration of essential oils. These results highlight the importance of microclimate and management as determinants of essential oil yield in lemons and demonstrate the need to further develop management practices aimed at optimizing this high-value component.

Keywords: essential oils, citrus, pruning

1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Características de la citricultura nacional

La citricultura en el Uruguay se distribuye esencialmente en dos zonas del país. La zona principal está ubicada en el norte, incluyendo principalmente a los departamentos de Salto, Paysandú, Río Negro y Artigas. Esta zona corresponde a un 81 % del área total citrícola. El 19 % restante se sitúa en el sur del país, siendo principalmente los departamentos de San José, Montevideo, Canelones, Colonia y Maldonado, en los cuales se desarrolla tal actividad (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2024). Presenta una superficie aproximada de 13.273 hectáreas efectivas, de las cuales 12.297 hectáreas se encuentran en producción. La producción promedio es de 244.621 toneladas por año. El 37 % de la producción total se destina a la exportación, un 26 % a la industria, un 35 % al consumo interno en fresco y un 2 % a otros destinos. La producción por especie se distribuye en 36,0 % de naranjas, 32,7 % de mandarinas, 31,0 % de limones y 0,3 % de pomelos y otras frutas (DIEA, 2024). Actualmente, el principal destino de la producción de limones es la industria, alcanzando el 69 % del total en el año 2023 (DIEA, 2024). Si se considera toda su cadena agroindustrial, en su zafra alcanza a ocupar unos 20.000 puestos de trabajo, lo que hace a tal actividad de interés nacional (Otero et al., 2020).

1.2 Ciclo productivo en citrus

1.2.1 Brotación, floración y cuajado de frutos

El proceso de brotación en los cítricos se inicia con el crecimiento de las yemas y se extiende hasta el final de la extensión de los brotes. Presenta una duración de cuatro a cinco semanas, variando en función de las condiciones del clima y del manejo aplicado. En el siguiente flujo de brotación, el reinicio del crecimiento se producirá a partir de una yema axilar que se encuentre cercana al ápice (Spiegel-Roy & Goldschmidt, 1996, como se cita en Gravina, 2014).

La floración en los cítricos es un proceso anual dependiente de las condiciones estacionales y climáticas. En regiones de clima subtropical, la misma se produce mayormente durante la primavera, luego de ocurrida la inducción floral de las yemas que se encontraban en reposo por el período de bajas temperaturas invernales. Por otro lado, en aquellas regiones de clima tropical, la floración, así como también la brotación pueden ocurrir durante todo el año, aunque la floración principal todavía se concentra durante la primavera (Tadeo et al., 2008).

El cuajado de los cítricos se puede considerar desde dos puntos de vista diferentes: botánico o agrícola. Desde el punto de vista botánico, consiste en el reinicio del crecimiento del ovario, luego de ocurridas la polinización y fecundación o mediante un estímulo partenocárpico. Como concepto agrícola, refiere al período en el cual los pequeños frutos pueden sufrir abscisión, es decir, sería el período en el cual se define el número de frutos capaces de alcanzar la madurez. La ocurrencia de un factor que interrumpa el crecimiento normal de los frutos en esta etapa conduce a los mismos hacia su abscisión (Gravina, 2014).

1.2.2 Crecimiento y maduración de frutos

Los frutos cítricos presentan tres etapas de crecimiento. La primera etapa comienza con un proceso de división celular y el crecimiento es exponencial. En la segunda etapa, de crecimiento lineal, se establece el aumento del tamaño celular y el llenado de vesículas, con un importante aumento del diámetro y peso del fruto. Finalmente, en la tercera etapa ocurre la maduración del fruto, donde el crecimiento se reduce y operan los cambios de color, acumulación de azúcares y mayor degradación de la acidez (Bain, 1958).

La maduración de la piel y la pulpa de los cítricos no está del todo coordinada, siendo independiente una de la otra (Tadeo et al., 2008), lo que resulta en la necesidad de estudios que contemplen ese grado de independencia que tiene un tejido con el otro. Esto se debe, entre otros factores, a la falta de conexiones vasculares entre tales tejidos (Monselise, 1977, como se cita en Lado et al., 2018). Entre ambos tejidos existen grandes variaciones de contenido y composición de carotenoides y ácido ascórbico, siendo generalmente mayores en la piel (Rodrigo et al., 2013).

Se ha demostrado el rol que cumplen las giberelinas endógenas en el cambio de color de los frutos de variedades de naranja dulce (*Citrus sinensis* L.Osb.) 'Washington', 'Navelate' y 'Valencia Delta Seedless', disminuyendo su nivel en el flavedo antes del cambio de color. Dicha hormona está involucrada en la regulación del traslado de la sacarosa, la acumulación de ácido abscísico (ABA) y la retención de nitrógeno en el flavedo de los cítricos (Gambetta et al., 2012, 2014). Otros estudios también afirman que las giberelinas que se encuentran en el flavedo de los frutos cítricos impiden su cambio de color, evidenciando cómo esta hormona genera un retraso en la adquisición de color en frutos de naranja dulce, limón y pomelo (Coggins et al., 1981), si se aplica cercano a dos semanas antes del cambio de color de los frutos (Gambetta et al., 2014).

Por otra parte, también se ha observado cómo los niveles de sacarosa y nitrógeno en la piel de los cítricos influyen en la toma de color. Existe una correlación positiva entre un

alto índice de color y el contenido de sacarosa en la piel y una correlación negativa con niveles altos de nitrógeno (Iglesias et al., 2001).

1.3 Factores ambientales que afectan la fisiología del fruto

La exposición a la luz solar afecta la calidad de los frutos cítricos. Esto se debe a que, mientras los frutos son verdes, son órganos fotosintéticamente activos, que destinan en mayor medida dichos fotoasimilados a la misma piel del fruto, siendo precisamente el flavedo, la zona donde ocurre tal actividad (Goldschmidt & Koch, 1996, Huang et al., 1992, Yen & Koch, 1990, como se citan en Cronje et al., 2013). Los frutos expuestos al sol, es decir, ubicados en la zona exterior de la copa de los árboles, desarrollan una coloración anaranjada más brillante que los frutos no expuestos o parcialmente sombreados, que presentan una tonalidad más clara (Cronje et al., 2013). El pomelo rojo (*Citrus × paradisi*) constituye una excepción, ya que la fruta sombreada es la que presenta una mayor acumulación de licopeno, pigmento relacionado con su color rojizo (Lado et al., 2015). Este efecto general, producto de la exposición a la luz puede estar directamente relacionado con cambios en la expresión de genes involucrados en la biosíntesis de carotenoides, así como también con el proceso de diferenciación de cromoplastos (Lado et al., 2015). Este efecto parece depender tanto de la cantidad como de la calidad de la luz que el fruto reciba. Puede ocurrir que bajo ciertas condiciones ambientales o dentro de determinadas locaciones geográficas, cuando la fruta permanece expuesta a un exceso de luz solar, ocurra el quemado de la piel, daño que puede ser mitigado en cierta medida por la cobertura vegetal que presenta el árbol (Alquézar et al., 2008). Además del efecto que ejerce la luz solar en el color de la piel, se ha constatado que los frutos que crecen por fuera de la copa del árbol tienen menor contenido de ácidos, mayor contenido de sólidos solubles totales (TSS) y presentan una madurez más avanzada, probablemente por una tasa de desarrollo más rápida en relación con los frutos que se desarrollan dentro de la copa (Reitz & Embleton, 1968, como se cita en Lado et al., 2018). El contenido de glucosa, fructosa y sacarosa es mayor en la piel de los frutos expuestos al sol, en comparación con los frutos que se encuentran sombreados en la zona interior del árbol (Cronje et al., 2013). Adicionalmente, el contenido de ácido ascórbico en los cítricos está estrechamente influenciado por la luz solar (Magwaza et al., 2017). Se ha reportado que la reducción de la exposición a la luz solar reduce el contenido de ácido ascórbico en la piel y suprime la expresión de genes específicos que codifican en la ruta biosintética de dicho componente, sin embargo, este proceso no ocurre en la pulpa de los frutos (Lado et al., 2015). En el mismo sentido, Magwaza et al. (2013), a través de un estudio realizado en

mandarina “Clementina de Nules” (*Citrus reticulata*), constataron que las variaciones en las condiciones del microclima dentro de la copa de los árboles durante su temporada de crecimiento afectan posteriormente el perfil bioquímico, tanto en la piel como en el interior de la fruta. Se evidencia que la cáscara de frutos ubicados en la parte externa de la copa de los árboles, desarrollados bajo condiciones de mayor intensidad de luz solar, adquiere una mejor coloración anaranjada en comparación con los frutos ubicados en el interior del árbol, que eran más amarillos. Sus resultados también lograron constatar que las concentraciones de azúcares, de ácido ascórbico, cítrico y málico en la cáscara son mayores en la fruta desarrollada en el exterior del dosel en comparación con la fruta desarrollada en el interior de este, sugiriendo una menor capacidad de sintetizar azúcares y, por lo tanto, menor disponibilidad para los frutos.

La temperatura del ambiente es otro factor preponderante en el desarrollo y en la fisiología de los frutos cítricos. La velocidad de las reacciones químicas que ocurren en el fruto responde a los cambios de temperatura. La conversión de los cloroplastos a cromoplastos se vuelve óptima a temperaturas cercanas a 13 °C. Si esta condición anterior de temperatura se cumple, el fruto paulatinamente comienza a perder la coloración verde que posee adquiriendo el color característico que presenta la variedad (Stearns & Young, 1942, como se cita en Alquézar et al., 2008). Según este último autor, si las temperaturas permanecen por encima de los 20 °C diurnos, el desverdizado de los frutos se enlentece. Por otro lado, para el caso del limón (*Citrus limon* (L.) Burm.f.), se ha reportado que la tasa de desverdizado de los frutos es significativamente más lenta en aquellos expuestos a temperaturas de 5 °C que en los expuestos a 10-20 °C. Esto podría ser debido a la baja actividad que presentan las enzimas asociadas al cambio de color de los cítricos a temperaturas cercanas a 5 °C (Mitalo et al., 2020).

La temperatura del suelo también repercute en el cambio de color de los frutos cítricos. Una reducción temprana de la temperatura del suelo acelera el cambio de color de los frutos (Mesejo et al., 2012). Las altas temperaturas alcanzadas en el suelo, en conjunto con una variación poco acentuada de temperaturas diurnas/nocturnas retardan el desverdizado de los frutos. Esto ocurre ya que temperaturas superiores a 30 °C inhiben la expresión de genes encargados de la biosíntesis de carotenoides y de la degradación de la molécula de clorofila (Ballester & Lafuente, 2017).

1.4 Efecto de la poda en la distribución de la luz y sus consecuencias fisiológicas

Según Agustí (2003), una forma de generar cambios en el microclima de los árboles es a través de la poda. Este indica que en árboles cítricos esta es una práctica que se realiza con múltiples propósitos, uno de los cuales incluye lograr una distribución equitativa de nutrientes entre las ramas del árbol, de manera tal que se genere un equilibrio entre la brotación vegetativa y la fructificación. Señala también que al remover una rama se reduce la competencia entre las que persisten en el árbol por lo que se mejora la nutrición e iluminación de aquellas ramas cercanas a la removida, las cuales pueden aumentar su producción. Otro de los objetivos que menciona es el mantener la copa del árbol con un porte adecuado para lograr un manejo más fácil del mismo. Para esto se eliminan ramas pequeñas, ramas secas, "chupones", ramas altas, ramas que se encuentren cercanas al suelo y ramas que se encuentran entrecruzadas.

Según Mendonça et al. (2006) la poda permite lograr una mejor distribución de la luz en el interior de la copa del árbol, generando así una ampliación de la zona productiva dentro de la misma. Los procesos de fotosíntesis y transpiración, así como también el rendimiento potencial y la calidad del producto que puede proporcionar un vegetal se relacionan estrechamente con la capacidad de este de interceptar y absorber la radiación solar. Esto estará limitado por el área foliar y por la eficiencia de la interceptación de la luz que presente el mismo. Estos aspectos a su vez dependen tanto de la arquitectura como de la densidad foliar (Pilau & Angelocci, 2015). Considerando un árbol cítrico como el vegetal en cuestión, el porte que presente el mismo determina la cantidad de luz que es capaz de interceptar y los posibles lugares sombreados que puedan generarse. La sombra que ocurre repercute negativamente en la tasa fotosintética del árbol, así como también en la calidad de los frutos desarrollados en aquellos lugares sombreados (Looney, 1968, como se cita en Hernández Mazzini, 2017). El hábito de crecimiento que presentan los árboles cítricos determina que la luz incidente en el centro del árbol sea muy reducida, por lo que la brotación allí también se presenta de manera reducida. Mediante la poda se puede revertir dicha situación, ya que la entrada de luz al centro del árbol será mayor y de esa manera se incrementará la brotación y la eficiencia del árbol en su conjunto (Gravina, 2014).

En las plantas hay un nivel de intensidad de luz en el cual la tasa de fotosíntesis ya no aumenta, aunque la intensidad de la luz siga en aumento, denominado punto de saturación lumínica. Este depende de factores como la especie y las condiciones ambientales. En el caso de los cítricos, se han reportado diferencias entre autores

respecto al punto de saturación por luz en función de las especies estudiadas y del ambiente. Iglesias et al. (2003) observaron que en mandarina Satsuma (*Citrus unshiu* Marc.) ocurre saturación por luz a los 750 μmol fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en hojas jóvenes y resultados más elevados que el anterior en hojas de mayor edad. Estos resultados coinciden con Hu et al. (2007), quienes encontraron la mayor tasa fotosintética a 1000 μmol $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ también en mandarina Satsuma. Sin embargo, los mismos autores determinaron que en condiciones de invernadero, árboles de mandarina Satsuma sombreados alcanzaron el 80 % de su fotosíntesis neta máxima a 460 μmol $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Valores similares reportaron Medina et al. (2002) en árboles de naranjo "Pera", creciendo en condiciones de invernadero, los que requirieron entre 400-450 μmol fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz PAR para lograr su máximo de actividad fotosintética neta.

Hay una intensidad mínima de luz necesaria para que la tasa de fotosíntesis iguale la tasa de respiración, denominada punto de compensación. Los árboles cítricos, así como todos los vegetales, presentan valores mínimos de radiación para la fijación de CO_2 y valores de radiación en los cuales se produce el punto de compensación, donde las pérdidas y las ganancias de CO_2 están equilibradas. Autores como Iglesias et al. (2003) y Machado et al. (2005), han reportado tales valores para diferentes especies cítricas. Estos se encuentran dentro del rango que presentan otros árboles tropicales (Larcher, 1995, como se cita en Hernández Mazzini, 2017).

Hu et al. (2007) han reportado que al mediodía ocurre un aumento en el punto de compensación lumínica debido a que se incrementa la fotorrespiración del árbol. Esto indica que será necesario fijar más μmol de CO_2 para que la fotosíntesis neta sea cero. Al comparar hojas que están expuestas a plena luz solar con hojas que están sombreadas, aquellas que se encuentran expuestas logran un balance diario neto de fotosíntesis que es positivo. De todos modos, a las 12:00 h del mediodía se observa el único momento del día en el que se produce un balance de carbono negativo; es decir, la cantidad de CO_2 liberada por respiración supera a la que se fija mediante fotosíntesis, lo que reduce el balance general diario. Será, por tanto, en ese momento del día cuando las hojas sombreadas sean capaces de fijar una mayor cantidad de CO_2 en comparación con aquellas expuestas a radiación solar plena. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, es fundamental alcanzar una buena distribución de la luz al interior de la copa del árbol, para así lograr una adecuada actividad fotosintética, la cual se traducirá en un mejor desempeño productivo del árbol. De alguna manera la intensidad y la distribución de la luz podría afectar la producción de aceites esenciales en los frutos cítricos.

1.5 Aceites esenciales en cítricos

Considerando los cítricos en su totalidad a nivel mundial, el aceite esencial de limón ocupa el segundo lugar de importancia luego del aceite esencial de bergamota (*Citrus bergamia* Risso y Poit.). Anualmente se producen aproximadamente 3.600 toneladas de aceite esencial de limón en el mundo. Entre los mayores productores se encuentran Argentina, Estados Unidos e Italia (Cerutti & Neumayer, 2004).

De acuerdo con Cerutti y Neumayer (2004), el limón presenta en su piel 0,4 % de aceite. Este se deposita en el pericarpo del fruto dentro de sacos de forma ovalada, denominados glándulas de aceite. El aceite contenido en estas glándulas, ubicadas en el flavedo, oficia de barrera protectora contra patógenos e insectos.

Los aceites esenciales de los cítricos son mezclas complejas de componentes volátiles, principalmente hidrocarburos terpénicos y derivados oxigenados del aldehído, alcohol, cetona y éster. En el fruto, el enriquecimiento de genes implicados en la biosíntesis de terpenoides volátiles y fenilpropanoides no volátiles en células epidérmicas del mismo, indica una especialización metabólica por parte de este tipo de células para la síntesis de aceites esenciales. Además, el patrón de expresión de la mayoría de los genes biosintéticos de aceites esenciales es consistente con la acumulación de los principales aceites esenciales (monoterpenos, cumarinas preniladas y flavonoides polimetoxilados) en las glándulas de aceite de la piel de los cítricos (Voo et al., 2012).

El aroma de la fruta está influenciado por el contenido y la composición de compuestos volátiles (Tietel et al., 2012). Se ha identificado un total de 38 compuestos volátiles mediante el análisis aromático de once mandarinas comerciales, siendo la mayoría pertenecientes al grupo de los terpenos tipo monoterpenos. El principal compuesto volátil detectado fue el monoterpeno "limoneno" (95 % respecto del total de aromas detectados), seguido por el β -mirceno, α -pineno, decanal, *trans*-bi-ocimeno y linalol (Simón-Grao et al., 2014). También en mandarinas Satsuma ha sido demostrado que el limoneno es el compuesto volátil más abundante, siendo este el que representa la mayor proporción del aroma de los cítricos; otros compuestos relevantes en esta variedad también son el linalol, γ -terpineno, β -mirceno, α -pineno y octanal (Qiao et al., 2007). Durante la maduración de la fruta, se observan cambios cualitativos y cuantitativos importantes en el perfil aromático, presentando mayor abundancia y diversidad de compuestos durante las primeras etapas del desarrollo y durante el cambio de color (Ladaniya, 2008).

1.5.1 Influencia del material genético en la producción de aceite esencial

La concentración y la composición de aceites esenciales en los frutos varían según la especie, el cultivar y el portainjerto utilizado (Bitters & Scora, 1970). Estos autores constataron el efecto del portainjerto en la variación del contenido y tipo de aceite esencial volátil de la corteza de la naranja Valencia, mediante el estudio de 21 portainjertos. Los autores evidenciaron que el rendimiento total de aceite varió de 1,04 ml cada 100 g de tejido de piel en los frutos de árboles injertados sobre citrange Savage (*Citrus sinensis* × *Poncirus trifoliata*) a 0,44 ml en aquellos correspondientes a árboles injertados sobre Nanshodaidai (*Citrus tawanica*), con un rendimiento promedio de 0,72 ml para todos los portainjertos. A través del estudio determinaron que las muestras de frutos con piel más delgada tenían una proporción más alta de tejido que contenía aceite esencial, por lo tanto, un rendimiento más alto en el contenido total de aceite.

Según Bitters y Scora (1970), en relación con los distintos tipos de aceites esenciales determinados y su contenido en la piel de los frutos, se constató que la concentración más alta del monoterpeno d-limoneno (90 %) se obtuvo en el aceite producido en frutos de árboles injertados en el portainjerto citrange Savage y la concentración más baja de dicho aceite (88 %) fue obtenida en aquellos injertados en Shangyuan (*Citrus cavaleriei*). Estos también observaron otros componentes, como el β -mirceno, decanal y linalol, los cuales mostraron diferencias estadísticamente significativas como resultado de la influencia de los portainjertos, aunque las diferencias fueron pequeñas. Aunque estos autores determinaron diferencias significativas entre los portainjertos, estas no parecen tener una magnitud tal que su efecto sobre los componentes del aceite posea relevancia desde el punto de vista taxonómico

1.5.2 Efecto del tamaño y estado de desarrollo del fruto en la producción de aceite

Diferentes estudios han demostrado cómo el contenido de aceites esenciales varía según el momento en que se cosechan los frutos cítricos. Bourgou et al. (2012) determinaron que el contenido y la composición de aceites esenciales de cuatro especies cítricas, naranjo amargo (*Citrus aurantium* L.), limón, naranja y mandarina (*Citrus reticulata* Bl.), variaron según el momento de cosecha. En todos los casos, la mayor concentración se determinó en mandarina seguida de limón, naranja y naranja amarga.

Fronday Piazzoli (2022) trabajando con frutos de árboles adultos de limón tipo 'Lisbon', injertados sobre *Poncirus trifoliata* (L.) Raf., determinó que el tamaño de los frutos

repercute de forma negativa en la concentración de aceites esenciales, es decir, la concentración de aceites en los frutos de menor tamaño es mayor que en los frutos de mayor tamaño. Además, evidenció que el cambio de color que se produce en los frutos a medida que estos maduran, provoca un efecto negativo en la concentración de aceites esenciales. Comparando distintas fechas de cosecha, demostró que el contenido de aceites esenciales por árbol individual no presentó diferencias significativas desde el 23 de abril de 2019 hasta el 4 de septiembre de 2019. A medida que avanza la fecha de cosecha, el aumento en la proporción de frutos de mayor tamaño y coloración más amarilla, que presentan menor concentración de aceite, fue compensado por el rendimiento final obtenido por fruto.

Drescher et al. (1971, como se cita en Sinclair, 1984), evidenciaron que a medida que transcurrió el tiempo desde el verano hasta el invierno (agosto a diciembre en el hemisferio norte), la producción de aceites por tonelada de fruta de un cultivar de limón de una selección antigua, se redujo desde 6,5 kg en agosto hasta 5,6 kg en diciembre. También lo evidenciaron en una selección nucelar de limón, desde 6,0 a 5,3 kg en el mismo período de tiempo. A pesar de la disminución en el rendimiento de aceite por tonelada de fruta, el rendimiento de aceite por fruto mostró un aumento a medida que el fruto se desarrollaba y maduraba, incrementando la producción de aceite por fruto desde agosto a diciembre entre 38,4 y 47,8 % dependiendo del cultivar. A través del estudio se constata que el rendimiento de aceite por fruto es mayor en aquellos frutos de mayor tamaño, pero el rendimiento por tonelada es mayor cuando el lote está constituido por frutos pequeños, ya que se dispondrá de mayor superficie específica en el lote.

Sinclair (1984) observó en muestras de limones de California que el contenido de aceite esencial por área de piel evaluada es menor en la zona del cáliz del fruto y mayor en el extremo estilar del mismo. El autor determinó que el contenido de aceites se incrementa en las dos áreas anteriormente mencionadas desde que el fruto presenta color verde hasta que el mismo comienza el cambio de color para luego disminuir a medida que va adquiriendo su coloración completa. Los contenidos mayores de aceite esencial por área de piel evaluada ocurren en la etapa en la que los limones adquieren una tonalidad plateada clara.

1.5.3 Efecto de la irrigación y la nutrición mineral en el rendimiento de aceite

El régimen hídrico al cual se encuentran expuestos los árboles cítricos influye en su producción. Un régimen hídrico deficiente en forma severa puede provocar una caída de frutos en su primera etapa de desarrollo, además de conducir a los mismos a una

reducción de su tamaño final (Reitz & Embleton, 1986, como se cita en Lado et al., 2018). Se ha estudiado que los árboles regados, sin evidencia de estrés hídrico, producen frutos con mayor contenido de jugo, pero con menor concentración de TSS y acidez total que los provenientes de árboles sin riego (Lado et al., 2018). El estrés hídrico también se asocia con un aumento en el grosor de la piel y con el adelanto del cambio de color (Koo & Reese, 1977).

Koo et al. (1973) evaluaron el efecto de diferentes dosis de fertilizante y distintos niveles de irrigación en la producción de aceites esenciales. Los autores determinaron un aumento significativo en la producción de aceites por hectárea al incrementar el volumen de agua irrigada. Esto se explica por un incremento en el rendimiento total de fruta, pero no debido al incremento en el contenido de aceite esencial por fruto individual. También determinaron que el incremento en la fertilización nitrogenada acrecentó la producción de aceite tanto por fruto individual como en el rendimiento total y por tanto en la producción de aceites esenciales por hectárea.

Con respecto al efecto de la fertilización con nitrógeno y óxido de potasio estudiado en la variedad de limón Bearss durante tres años, Koo et al. (1973) reportan que la aplicación de nitrógeno aumenta el rendimiento de aceites esenciales, mientras que la de potasio no lo modifica. Los árboles que recibieron las mayores aplicaciones de nitrógeno produjeron significativamente mayores rendimientos de fruta y contenido de aceite en su piel. Por el contrario, en relación con las aplicaciones de potasio, no se observa un efecto significativo en la producción de fruta o en el contenido de aceite en la piel.

Kesterson et al. (1977) estudiaron el rendimiento de aceites en la piel de las naranjas en relación con la fertilización aplicada. Los autores reportaron que las menores aplicaciones de potasio permiten un mayor contenido de aceites en la piel, pero un menor rendimiento de fruta, mientras que las mayores aplicaciones reducen los rendimientos de aceite en la piel. Estos resultados están de acuerdo con Lücker et al. (2002), quienes reportaron que las enzimas monoterpene sintetasas son inhibidas por el ion K^+ , por lo que aplicaciones altas de potasio tenderían a disminuir la producción de aceites esenciales en el flavedo de los limones.

2 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

A partir de los antecedentes presentados, se plantean las siguientes hipótesis y objetivos:

2.1 Hipótesis

- 1) Los frutos localizados en el exterior de la copa del árbol logran color amarillo más intenso que los frutos localizados en el interior
- 2) Los frutos del exterior del árbol presentan menor concentración de aceites esenciales que los frutos del interior
- 3) La poda incrementa la incidencia de luz al interior del árbol, promueve la coloración de los frutos y disminuye la concentración de aceites esenciales respecto a los frutos del interior de árboles no podados
- 4) La concentración de aceites esenciales disminuye conforme avanza la maduración del fruto, independientemente de su localización en la canopia y de la práctica de poda

2.2 Objetivos

Objetivo general

Evaluar la concentración de aceites esenciales en frutos de limón situados en la zona interior y exterior de árboles podados y no podados

Objetivos específicos

1. Determinar el efecto de la poda y la zona de ubicación de los frutos en el árbol en su coloración y grosor de piel
2. Determinar el efecto de la poda y la zona de ubicación de los frutos en el árbol en la concentración de aceites esenciales conforme avanza la madurez

3 MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en el departamento de San José (34°38'47.6"S 56°43'48.6"W), en la zona de Kiyú, en la quinta 31 de la empresa San Miguel Global, desde noviembre del año 2020 hasta agosto del año 2021. El material vegetal utilizado fue un monte de limón Criollo o Lisbon (*Citrus limon* (L.) Burm. f.), injertado sobre *Poncirus trifoliata* (L.) Raf., con un marco de plantación de 6,5 m x 3 m. El monte se instaló en el año 2010 con una orientación de filas en dirección sureste a noroeste. El monte cuenta con riego realizado por goteo con un caudal de 4 l h⁻¹ y una distancia de 90 cm entre goteros. Durante el ciclo productivo estudiado (agosto del año 2020 a julio del año 2021) se registraron 934 mm de precipitaciones y se aplicaron 340 mm de agua de riego. La fertilización se realizó entre los meses de septiembre de 2020 y febrero de 2021. Se aplicaron 202 kg N ha⁻¹ (fertilizante líquido Genius), 182 kg K₂O ha⁻¹ (KCl cristalizado) y 61 kg P₂O₅ ha⁻¹ (ácido fosfórico). La producción obtenida en la cosecha de invierno del año 2021 fue de 76 Mg ha⁻¹.

3.1 Tratamientos

La instalación del experimento consistió en la selección de 16 árboles homogéneos en tamaño y estado sanitario. Se determinaron dos tratamientos: árboles podados y árboles control, sin podar. El 20 de noviembre del año 2020 se podaron 8 de los árboles seleccionados y para evitar el sombreado de los árboles linderos, también se podaron los dos árboles adyacentes para que la incidencia de luz no se viera afectada. Con el mismo objetivo, se dejaron sin podar los árboles adyacentes a los 8 árboles no podados (Figura 1). Se realizó una poda tradicional de intensidad media, que consistió en el raleo de ramas buscando iluminar el interior de la copa, controlar la altura y mantener la entrefila despejada. También se procedió a sacar ramas quebradas, mal ubicadas y ramas secas. Para cada tratamiento se establecieron dos zonas de evaluación: zona exterior, abarcando 1 m desde el exterior hacia el interior del árbol y zona interior, desde el tronco hasta el inicio de la zona exterior, abarcando aproximadamente 1 m.

Figura 1

Vista general de un árbol podado (A) y no podado (B)

**3.2 Evaluaciones**

Se cuantificó la incidencia de luz fotosintéticamente activa (PAR) con un ceptómetro (AccuPAR, modelo LP-80, Estados Unidos) que consta de 80 sensores distribuidos en una varilla de 0,86 m. Esta evaluación se realizó en los 8 árboles de cada tratamiento. Para efectuar las medidas se debió posicionar el ceptómetro paralelo al suelo, ubicándolo a la altura del pecho (1,5 m) (Figura 2). Las medidas obtenidas en $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ se realizaron en la entrefila (3 medidas) de los ocho árboles de cada tratamiento, en la zona exterior de los árboles (4 medidas) y en la zona interior (4 medidas), incluyendo en ambos casos dos mediciones en la orientación este y dos en la oeste. Las mediciones se realizaron entre las 10 y las 13 horas, en cinco fechas: 19/02, 10/03, 07/04, 28/04 y 27/08 del año 2021.

Figura 2

Medición de radiación en la entrefila utilizando un ceptómetro



Se determinó la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%) del aire con sensores HygrochronTM (iButton, modelo DS-1923G-F5, Estados Unidos), instalados en un árbol podado y en un árbol control, en el interior y exterior de la copa de cada árbol, quedando dos sensores en cada uno de los árboles (Figura 3). Se programaron para el registro horario desde el 20/12/2020 al 13/11/2021. Adicionalmente, se utilizaron los datos de temperatura mínima, media y máxima de la estación agrometeorológica INIA-GRAS, ubicada en Las Brujas (período 1/12/2020-1/08/2021) (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], s.f.).

Figura 3

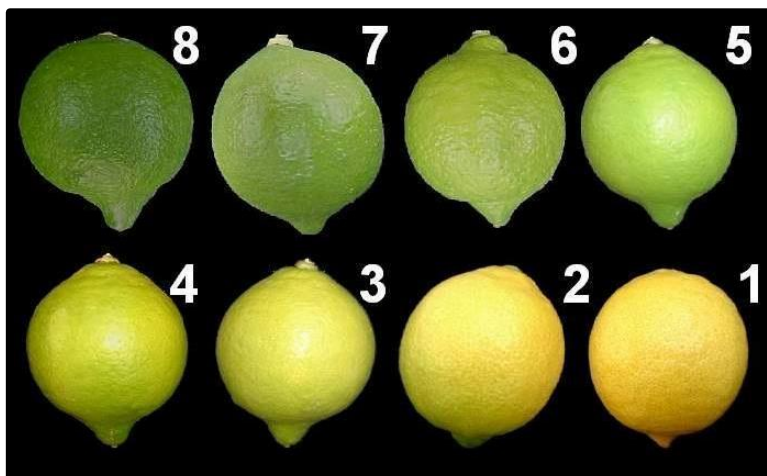
Sensor de temperatura y humedad relativa instalado en el interior de la copa del árbol



El efecto de los tratamientos y de la zona del árbol en los frutos se evaluó en 4 árboles por tratamiento. Se realizaron tres fechas de cosecha: 15/06/2021, 20/07/2021 y 19/08/2021. En cada fecha se extrajeron 80 frutos por árbol, 40 de la zona exterior y 40 de la zona interior, que presentaran un diámetro ecuatorial comprendido entre 65 mm y 75 mm.

La muestra de 40 frutos por zona del árbol se dividió en 10 frutos para la determinación de masa, diámetro ecuatorial, grosor de la cáscara y color, y 30 frutos para la evaluación del contenido de aceites esenciales. La masa se determinó usando una balanza digital (Radwag® WTB 2000). El diámetro ecuatorial de cada fruto y el grosor de cáscara se midieron con un calibre digital (Mitutoyo). El color se determinó mediante dos métodos: con un colorímetro digital (PCE-TCR 200), tomando dos mediciones en la zona ecuatorial de cada fruto, y clasificando los frutos por color utilizando una escala colorimétrica específica para limón (Figura 4). Para la colorimetría digital se utilizó la escala CIELab y se calculó el índice de color para cítricos $[ICC = (a \times 1000) / (L \times b)]$ propuesto por Jiménez-Cuesta et al. (1982). Dicha escala consiste en un modelo cromático tridimensional para describir los colores que puede percibir el ojo humano. Este tiene tres parámetros, donde L^* representa la luminosidad que varía de 0 (negro) a 100 (blanco), a^* que varía de negativo a positivo desde el color verde hasta el color rojo y b^* que varía de negativo a positivo desde el color azul hasta el color amarillo.

Figura 4
Escala de color de cosecha para limón



La cuantificación de aceites esenciales se realizó por medio del método Scott, el cual determina el compuesto d-limoneno, de acuerdo con la metodología descrita por Redd et al. (1986) y por Kimball (1999). Brevemente, cada muestra, compuesta por 30 frutas frescas, se licuó y se extrajeron 13 g, a lo que se le agregó 100 ml agua e isopropanol (1:1) para posteriormente realizar un destilado. Una vez obtenido el destilado, se recogió 50 ml del destilado, se le agregó 10 ml ácido clorhídrico (1:2) y 3 gotas de naranja de metilo como indicador. Para la titulación se usó bromuro-bromato de potasio (0,1 N) hasta que desapareciera el color. Se utilizó un blanco, colocando 50 ml de alcohol isopropílico (1:1) en un balón de destilación.

3.3 Diseño experimental y análisis estadísticos

El diseño experimental realizado fue completamente al azar, usando 8 repeticiones para la medición de la luz y 4 repeticiones para las variables analizadas en los frutos. El factor primario fue el tratamiento de poda, generando así dos tratamientos (árboles podados y no podados), considerando al árbol como unidad experimental. El factor secundario fue la zona del árbol (exterior e interior), cuya unidad de submuestreo fue el fruto para las variables masa, diámetro ecuatorial, grosor y color de cáscara. Además, se separó una muestra compuesta por 30 frutos para la determinación del contenido de aceites esenciales.

Para estudiar el efecto de los tratamientos (árbol podado y árbol no podado), zonas (interior y exterior), fechas de cosecha y sus interacciones, se ajustó un modelo lineal de medidas repetidas en el tiempo. Se realizaron análisis de varianza (ANAVA) contemplando los dos factores. Las medias de los efectos significativos se compararon

con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). La proporción de frutos correspondientes a cada categoría de color se analizó ajustando modelos lineales generalizados de medidas repetidas en el tiempo, donde el número de frutos con color de cartilla por encima de 2, 3 o 4 en relación al número total de frutos observados, se asumió que tenía distribución binomial, utilizando la función de enlace logit. En los modelos se incluyó el efecto tratamiento, fecha de cosecha y zona del árbol. El análisis estadístico se realizó utilizando el software "SAS OnDemand for academics".

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Microclima del árbol: luz

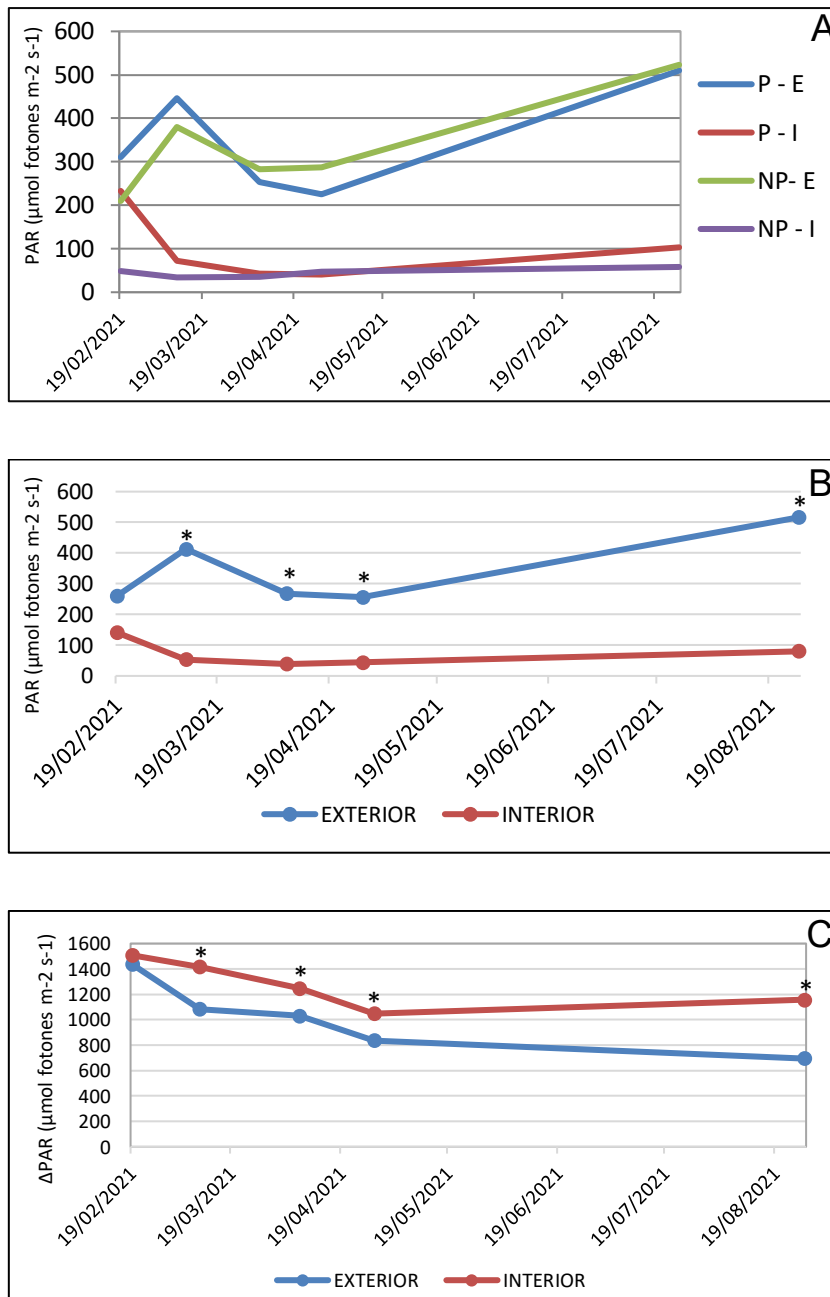
La radiación PAR incidente en el cuadro en estudio, medida entre los meses de febrero y agosto, en días soleados entre las 10:00 y las 13:00 horas, se encontró entre 900 y 1900 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, valores por encima del punto de saturación por luz citado para los cítricos (Iglesias et al., 2003). El punto de saturación por luz para la mayoría de las hojas de los cítricos se ubica entre los 750 y 800 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, de acuerdo con lo reportado por Iglesias et al. (2003). Por otro lado, Hu et al. (2007) determinaron la máxima fotosíntesis neta a los 1000 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, en condiciones de campo y a 460 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en árboles sombreados en invernadero. Resultado similar a lo reportado por Medina et al. (2002), quienes propusieron que la luz óptima para la fotosíntesis neta en árboles sombreados en invernadero se ubicaría entre 400 y 450 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En los árboles estudiados de ambos tratamientos (poda y control), la luz PAR transmitida a 1,5 m de altura, se mantuvo siempre por debajo del umbral indicado por Iglesias et al. (2003), y si se considera la zona interior del árbol, también por debajo del umbral citado por los demás autores (Figura 5 A). Para esta misma variable no existió interacción entre el tratamiento de poda y la zona del árbol en la que se encontraban los frutos, siendo la ubicación el único factor significativo. La luz PAR transmitida al interior de los árboles, fue significativamente inferior a la determinada en la zona exterior del árbol (Figura 5 B). Como consecuencia, la diferencia de luz PAR en esta situación con respecto a la PAR incidente en el cuadro (ΔPAR), fue significativamente mayor en el interior que en el exterior (Figura 5 C).

El tratamiento de poda realizado en el mes de noviembre permitió registrar, en el interior y exterior del árbol, mayor transmisión de radiación PAR a 1,5 m de altura en los meses de febrero y marzo. A partir de la medición efectuada en el mes de abril, en la zona exterior, esta situación se invierte entre los árboles podados y control, pero se mantienen niveles similares de transmisión de radiación PAR en ambos tratamientos durante el resto de la estación (Figura 5 A). Resultados similares fueron reportados en mandarina 'Clementina de Nules' (Arbiza et al., 2003) y 'Afourer' (Hernández Mazzini, 2017) en las condiciones del Uruguay. En dichos experimentos, también se observa una reducción en la diferencia de transmisión de radiación PAR entre árboles podados y no podados, a medida que avanzaba la temporada, como consecuencia del aumento de la brotación de primavera y verano en los árboles podados (Arbiza et al., 2003; Hernández Mazzini, 2017). En el presente trabajo, en el interior de los árboles podados se alcanzaron valores

por encima de los $100 \mu\text{mol fotonos m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en febrero y agosto y $58 \mu\text{mol fotonos m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en marzo, mientras que en el interior de los árboles control, los valores no superaron los $56 \mu\text{mol fotonos m}^{-2} \text{s}^{-1}$. En el interior de los árboles control, durante gran parte del ciclo, los valores estuvieron próximos al punto de compensación por luz reportado por Iglesias et al. (2003) para el mandarino 'Satsuma' ($25 \mu\text{mol fotonos m}^{-2} \text{s}^{-1}$), y en algunos casos, fueron inferiores a la radiación mínima necesaria para poder realizar fotosíntesis, mencionado por Machado et al. (2005) para naranja 'Valencia', mandarina 'Murcott' y lima 'Tahiti' (*Citrus x latifolia*) (14,6, 12 y $17,5 \mu\text{mol fotonos m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente). En este sentido, es claro el efecto de la ubicación de las hojas y de la poda en la capacidad de captar el recurso luz, y por tanto de afectar la fotosíntesis, como ha sido reportado para diferentes especies leñosas (Campbell et al., 1992; Looney, 1968; Lo Piccolo et al., 2023). Como resultado, la poda también puede afectar la calidad de los frutos (Mendonça et al., 2006).

Figura 5

Radiación fotosintéticamente activa (PAR), (A, B) y diferencia entre PAR incidente y PAR transmitida (C)



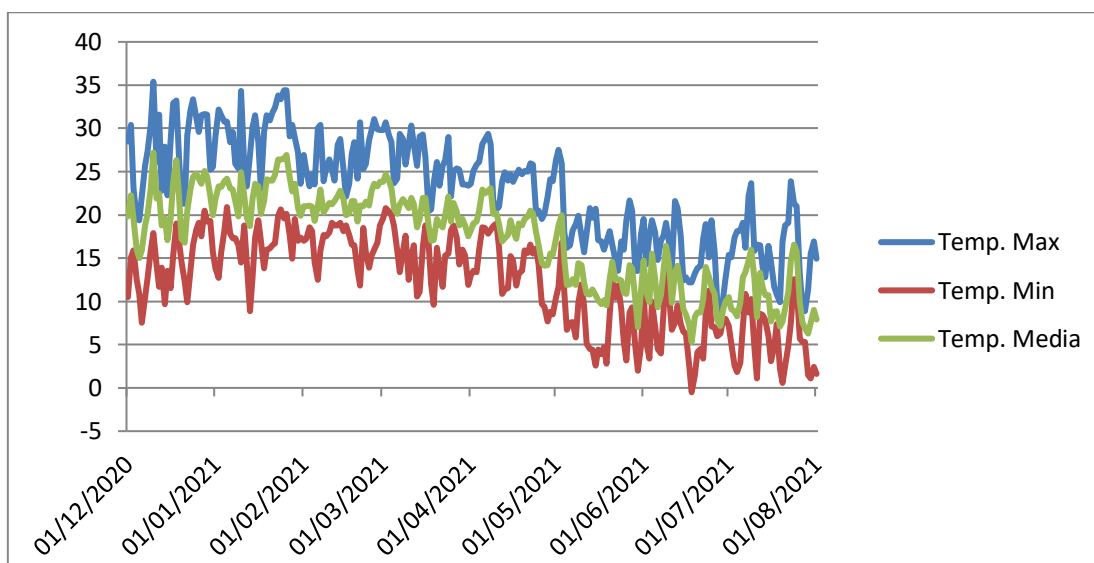
Nota. PAR transmitida a 1,5 m de altura en árboles de limón 'Criollo' (A, B) y diferencia entre PAR incidente y PAR transmitida a 1,5 m de altura (C), determinada en zona exterior (1 m desde el exterior hacia el interior de la copa) (E), e interior (desde el tronco hasta 1 m del exterior) (I), de árboles podados (P) y sin podar (NP). En B y C los asteriscos (*) indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre las zonas exterior e interior para cada fecha.

4.2 Microclima del árbol: temperatura y humedad relativa

En la Figura 6 se presenta la temperatura mínima, media y máxima durante la estación de crecimiento de los frutos. La temperatura media se ubicó entre 15 y 27 °C desde diciembre hasta marzo, posteriormente, entre 15 y 23 °C hasta fines de abril y entre 5 y 16 °C entre mayo y agosto.

Figura 6

Temperatura mínima, media y máxima durante la estación de crecimiento de los frutos



Nota. Los datos corresponden a la estación INIA Las Brujas, tomado de INIA (s.f.).

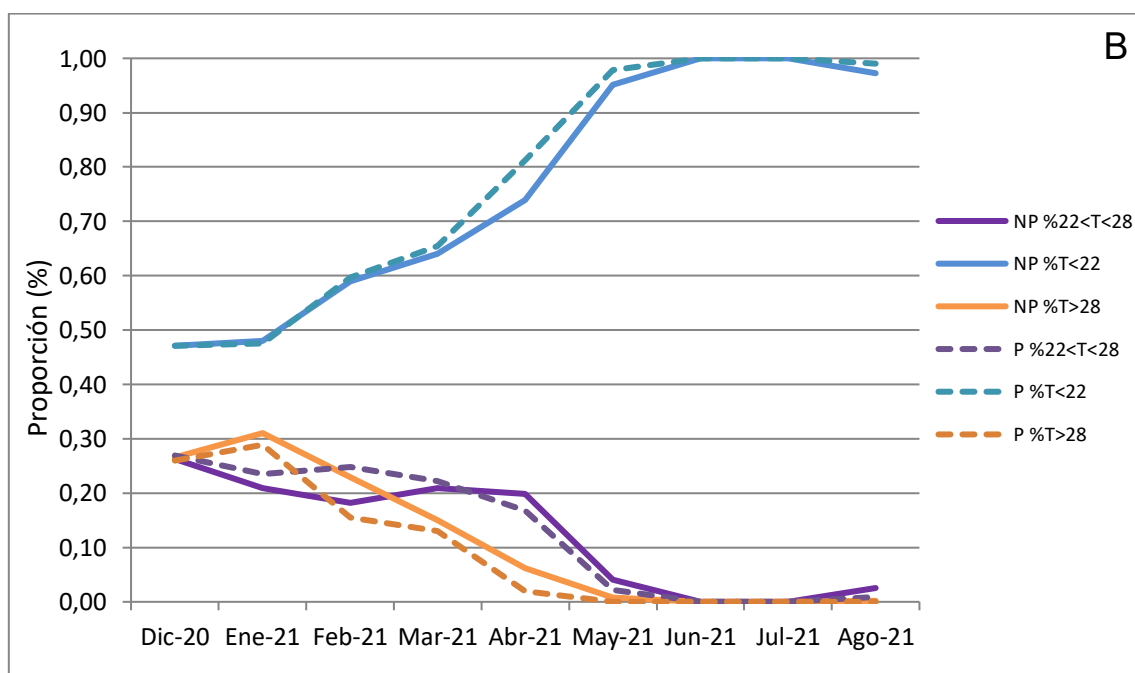
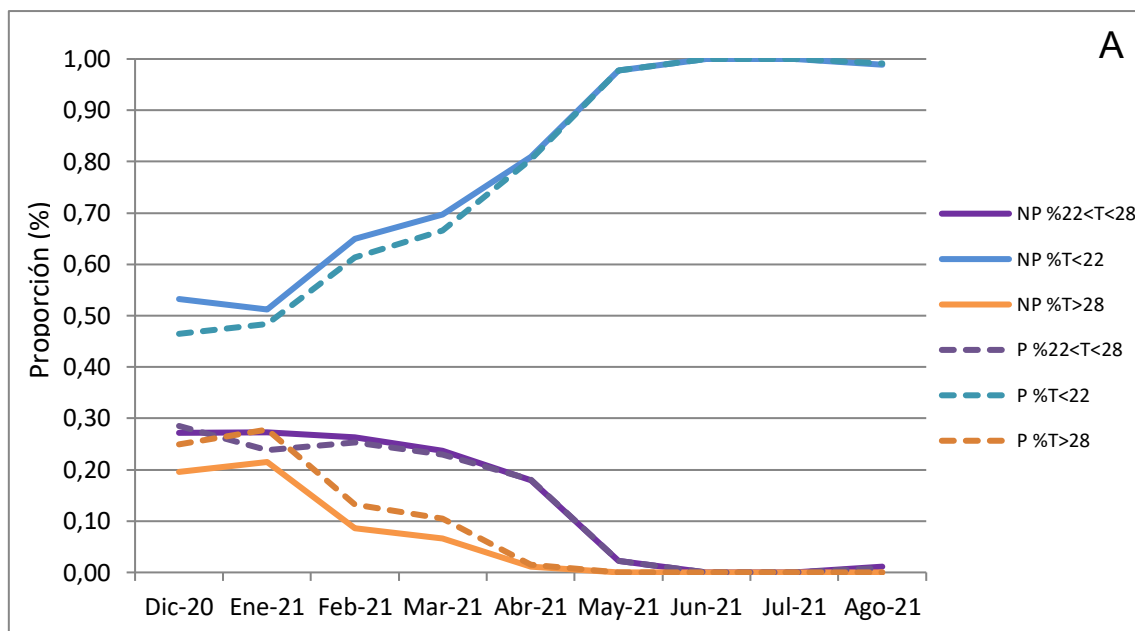
La temperatura, registrada con frecuencia horaria entre los meses de diciembre de 2020 y agosto de 2021, en el exterior y el interior de los árboles presentó tendencias diferentes entre los tratamientos de poda y control. En la Figura 7 se presenta la proporción de horas mensuales en las que cada zona del árbol se encontró por debajo de 22 °C, entre 22 y 28 °C y por encima de 28 °C. En los meses de diciembre y enero, la temperatura permaneció por debajo de 22 °C aproximadamente durante el 50 % del tiempo, tanto en el exterior como en el interior de los árboles de ambos tratamientos (Figura 7, A y B). Este porcentaje se fue incrementando a partir del otoño y llegó a su máximo durante el invierno. Con respecto a la proporción de horas medidas en los restantes rangos de temperatura, en el mes de diciembre se registraron muy pocas diferencias entre ellas (temperaturas entre 22 °C y 28 °C o mayores a 28 °C), pero a partir del mes de febrero, disminuyó notablemente la proporción de horas por encima de 28 °C.

Al analizar el efecto de la zona del árbol, se observa que, entre diciembre y marzo, la zona interior de los árboles podados presentó menor proporción de horas por debajo de

22 °C y mayor proporción de horas por encima de 28 °C que en los árboles no podados (Figura 7 A), diferencia que no se evidenció posteriormente a partir del mes de abril. Por el contrario, la zona exterior de los árboles podados, entre diciembre y marzo presentó menor proporción de horas a temperaturas más altas que los árboles control (Figura 7 B). Los árboles podados presentaron en el interior una menor variación entre la proporción de horas con temperaturas por debajo de 22 °C y por encima de 28 °C que los árboles control (Figura 7 A); lo opuesto ocurrió en la zona exterior (Figura 7 B). Esta situación, en conjunto con los registros de luz PAR, puede sugerir diferencias entre zonas en cuanto a la capacidad de fotosíntesis y respiración. Se ha reportado que la respiración de los frutos de cítricos se cuadruplica cuando la temperatura se incrementa de 15 °C a 35 °C (Espinosa et al., 2015). En términos generales, los procesos de síntesis de proteínas, pigmentos y compuestos aromáticos durante la maduración de los frutos necesitan de energía y esqueletos carbonados. La tasa de consumo de estos insumos que presenta el árbol está mediada en parte por la actividad respiratoria del fruto, siendo la temperatura un factor de gran importancia en la dinámica de tal proceso (Sozzi, 2007).

Figura 7

Proporción de horas mensuales en diferentes rangos de temperatura en la copa de los árboles



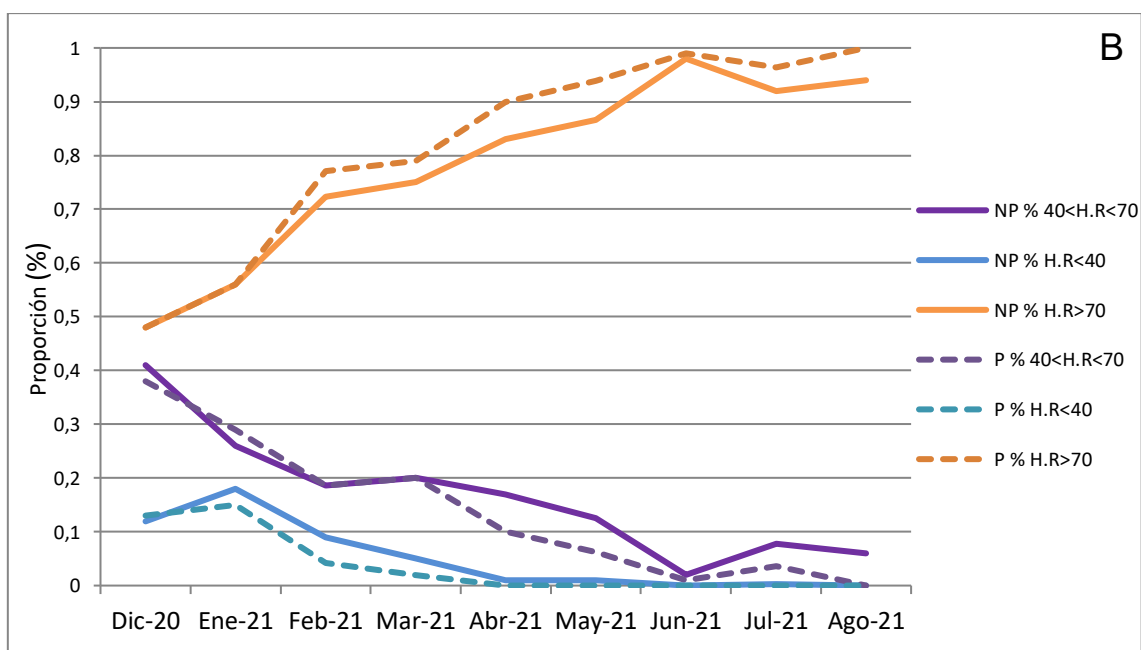
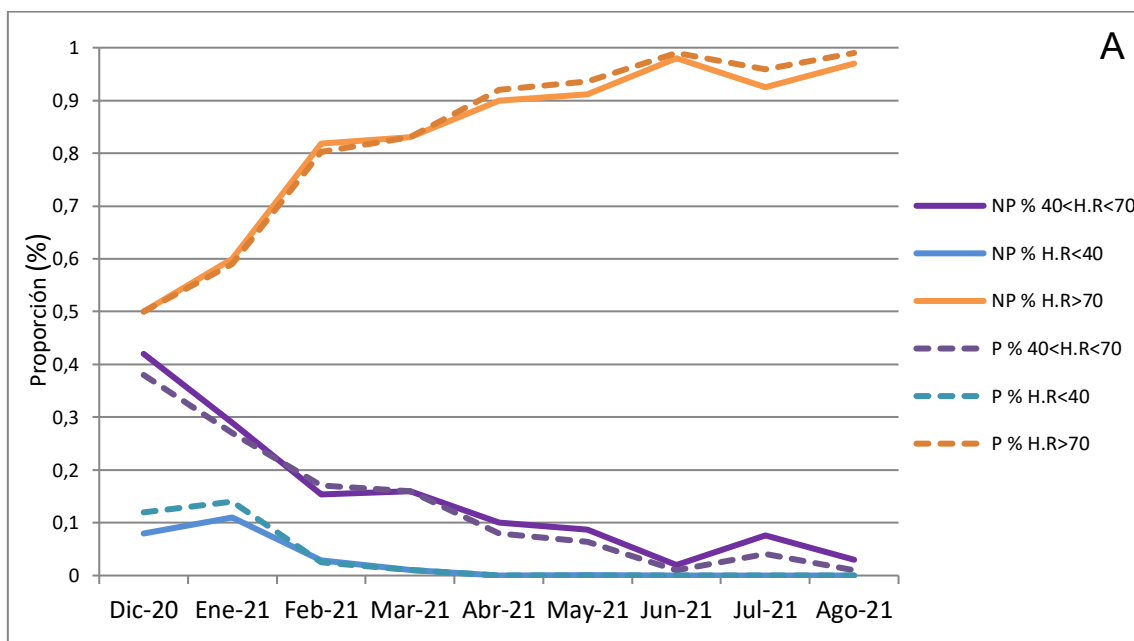
Nota. Temperatura por debajo de 22°C, entre 22 y 28°C y por encima de 28°C en la copa de árboles de limonero 'Criollo' podados (P) y sin podar (NP), determinada en la zona interior del árbol (desde el tronco hasta 1 m del exterior) (A) y en la zona exterior del árbol (1 m desde el exterior hacia el interior) (B).

La humedad relativa registrada entre el mes de diciembre de 2020 y el mes de agosto de 2021 estuvo mayoritariamente por encima del 70 % y muy residualmente por debajo

del 40 %. En la Figura 8 se presenta la proporción de horas mensuales con humedad relativa por debajo de 40 %, entre 40 y 70 % y por encima de 70 % en la zona interior (A) y exterior (B) de árboles de limonero 'Criollo' podados y control (sin podar). En el interior de los árboles, prácticamente no hubo diferencias entre los árboles podados y sin podar (Figura 8 A). Al analizar los registros de la zona exterior de los árboles, a partir del mes de febrero de 2021, en los árboles podados se observa una mayor proporción de horas con humedad relativa superior al 70 %, en relación con los árboles control (Figura 8 B).

Figura 8

Proporción de horas mensuales con diferente humedad relativa en la copa de los árboles



Nota. Humedad relativa por debajo de 40 %, entre 40 y 70 % y por encima de 70 % en la copa de árboles de limonero 'Criollo' podados (P) y sin podar (NP), determinada en la zona interior del árbol (desde el tronco hasta 1 m del exterior) (A) y en la zona exterior del árbol (1 m desde el exterior hacia el interior) (B).

4.3 Características de los frutos cosechados

4.3.1 Peso medio del fruto y grosor de la cáscara

Los frutos cosechados con un diámetro ecuatorial comprendido entre 65 mm y 75 mm, seleccionados en el interior y exterior de los árboles podados y control en las tres fechas de cosecha (15/06/2021, 20/07/2021 y 19/08/2021) no presentaron diferencias significativas en su peso medio, ni en el grosor de cáscara. Dado que para estas variables no se encontró interacción significativa entre el tratamiento, la zona del árbol y la fecha de cosecha, en la Tabla 1 se presenta el valor promedio del grosor de cáscara para los tres factores mencionados.

Tabla 1
Peso medio y grosor de cáscara de frutos de limón Criollo

Tratamiento	Peso medio de frutos (g)	Grosor de cáscara (mm)
Control	151 a ^z	5.97 a
Podado	157 a	7.51 a
Zona del árbol		
Interior	157 a	6.13 a
Exterior	151 a	7.35 a
Fecha de cosecha		
15/6/2021	153 a	6.06 a
20/7/2021	153 a	7.83 a
19/8/2021	157 a	6.33 a

Nota. Zona interior (desde el tronco hasta 1 m del exterior) y zona exterior (1 m desde el exterior hacia el interior). Sin diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

4.3.2 Color de los frutos

En este trabajo no se encontró un efecto significativo de la poda en el color de los frutos. Sin embargo, la zona del árbol en la que estos se encontraban afectó su coloración, tanto en las variables determinadas con el colorímetro digital, como en relación con el porcentaje de frutos que alcanzó cada categoría comercial de acuerdo con la cartilla de color. En ninguna de las fechas se encontró interacción entre la zona del árbol y el tratamiento. Dado que el único efecto significativo fue la zona del árbol, en la Tabla 2 se presenta el valor del croma o tinta (C), el tono, determinado a través del ángulo Hue y el índice de color para cítricos (ICC) de los frutos ubicados en la zona interior y exterior del árbol, para las tres fechas de cosecha. En todos los casos, los frutos del interior del árbol presentaron una coloración más verde que los frutos del exterior, que lograron la coloración amarilla.

Tabla 2
Color de frutos de limón Criollo en tres fechas de cosecha

	Zona	C	Hue	ICC
15/06/2021	Interior	35.84 b ^z	100.92 a	-2.99 b
	Exterior	39.14 a	90.35 b	-0.10 a
20/07/2021	Interior	32.83 b	93.22 a	-0.81 b
	Exterior	37.22 a	87.50 b	0.62 a
19/08/2021	Interior	31.89 b	90.09 a	-0.03 b
	Exterior	36.25 a	87.75 b	0.56 a

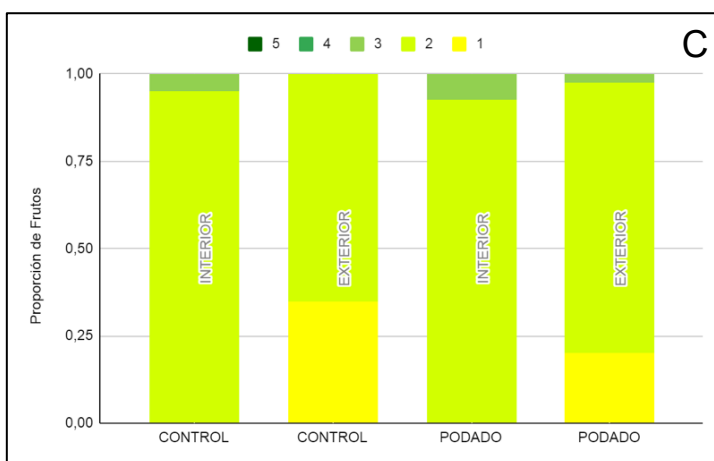
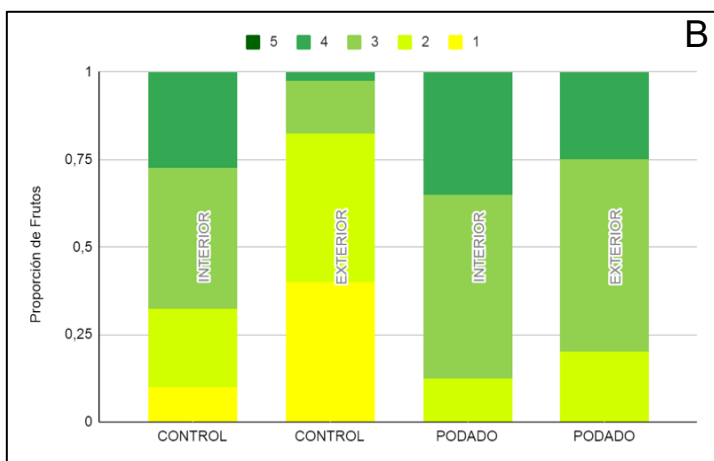
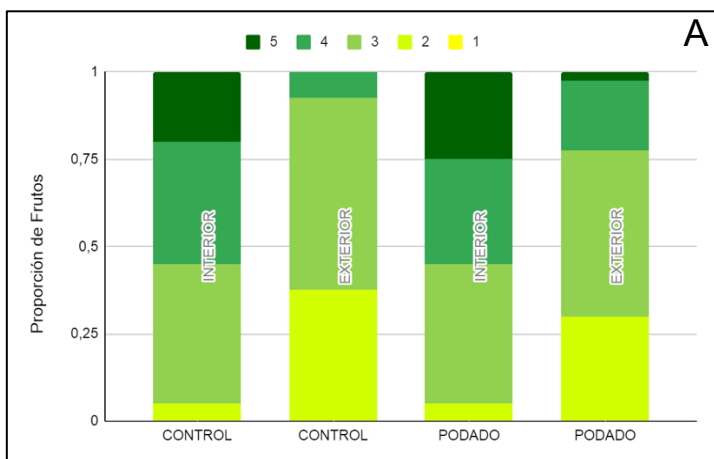
Nota. Se presenta el croma o tinta (C), el tono (ángulo Hue) y el índice de color para cítricos [$ICC = (a \times 1000) / (L \times b)$], determinados en frutos cosechados de la zona interior (desde el tronco hasta 1 m del exterior) y de la zona exterior (1 m desde el exterior hacia el interior) del árbol. Letras diferentes por columna y fecha de cosecha, indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los frutos del interior y del exterior del árbol.

Al analizar el porcentaje de frutos en cada categoría de color, se pudo constatar la evolución del cambio de color desde la primera fecha de cosecha hasta la última (Figura

9). En la primera fecha se encontró hasta un 25 % de los frutos de color verde (categoría 5), fundamentalmente en el interior de los árboles (Figura 9 A), mientras que, a partir de la segunda fecha, ya no hubo frutos verdes (Figura 9 B y C). Por otro lado, en la primera fecha de cosecha, aún no había frutos de color amarillo intenso (categoría 1) (Figura 9 A), que comenzaron a detectarse recién en la fecha 2 (Figura 9 B) y cuyo porcentaje se incrementó en la fecha 3, fundamentalmente en el exterior de los árboles (Figura 9 C). Resultados similares constató Frondoy Piazzoli (2022) estudiando la evolución del color de frutos de este mismo cultivar, también en la zona sur del país. Al analizar la proporción de frutos con color de cartilla por encima de 2, 3 y 4, que fueron los colores presentes en todas las fechas de cosecha, se encontró efecto significativo del tratamiento al considerar las dos primeras (tonos más amarillos), efecto de la fecha de cosecha al tener en cuenta frutos más verdes (3 y 4) y efecto de la zona del árbol en los tres casos. Este último resultado confirma el importante efecto de la zona en la que se ubican los frutos en el árbol sobre el color que estos logran, previamente determinado con las mediciones realizadas con el colorímetro digital.

Figura 9

Proporción de frutos en diferentes categorías comerciales de color



Nota. Frutos provenientes de la zona interior (desde el tronco hasta 1 m del exterior) y exterior (1 m desde el exterior hacia el interior) de árboles de limón Criollo podados y sin podar. A) Primera fecha de cosecha (15/06/2021). B) Segunda fecha de cosecha (20/07/2021). C) Tercera fecha de cosecha (19/08/2021).

El avance en la toma de color de los frutos se relaciona estrechamente con la disminución de la temperatura del aire y del suelo. En los cítricos, la degradación de las clorofilas y la síntesis de carotenoides se incrementa con el descenso de la temperatura. En naranjas, estos procesos se aceleran cuando la temperatura mínima desciende por debajo de 13 °C (Gambetta et al., 2014; Stearns & Young, 1942). Lo opuesto ocurre cuando aumenta la temperatura; los frutos de naranja 'Valencia' reverdecen como consecuencia del incremento de la temperatura (Coggins et al., 1981), y los valores negativos de la coordenada *a* de Hunter se mantienen con temperaturas promedio de 22-24 °C (Gambetta et al., 2014). Para el caso específico del limón, Manera et al. (2008) reportan que las coordenadas colorimétricas presentan mayor correlación con las temperaturas mínimas que con las temperaturas medias. Estos autores encontraron que la pérdida de color verde comienza cuando las temperaturas mínimas se ubican entorno a los 12 °C aproximadamente y el aumento de la coloración amarilla, con temperaturas cercanas a los 14 °C. En el mismo sentido, Mitalo et al. (2020) reportaron un cambio gradual en el color de los frutos de limón con el descenso de la temperatura mínima media desde 22 a 13 °C. En nuestro trabajo, entre los meses de marzo y junio hubo un incremento en la proporción de horas por debajo de 22 °C, lo que resultó en el desverdizado natural de los frutos. A partir de junio, más del 90 % de las horas se situaron por debajo de los 22 °C, lo que se reflejó en la cosecha de julio, con la aparición de frutos que lograron la categoría 1.

La carencia en la respuesta al tratamiento de poda en la toma de color de los frutos coincide con los resultados de Rosa et al. (2012) en mandarinas, pero difiere con lo reportado por Borges et al. (2005) y Martiz et al. (2014), quienes encontraron con el tratamiento de poda, un incremento en el tono anaranjado de la piel de mandarina 'Nova' y naranjo 'Parent Washington', respectivamente. Por otro lado, en nuestro trabajo tanto en los árboles control, como en los podados, los frutos situados en el interior presentaron una menor intensidad e incremento de color con respecto a los frutos situados en el exterior. Esto coincide con estudios realizados en mandarina 'Satsuma' y naranja 'Valencia', donde se pudo constatar que los frutos del exterior del árbol lograron mejor coloración que los frutos del interior del árbol (Iwagaki, 1981; Sites & Reitz, 1949).

Otra variable ambiental que se puede asociar al color de los frutos es la luz. En este sentido se ha reportado que una disminución de más del 40 % de la radiación máxima disminuye el cambio de color en la mandarina 'Satsuma' (Iwagaki, 1981). Es difícil disociar el efecto de la luz del de la temperatura; Iwagaki (1981) propone que el mayor contenido de clorofilas de los frutos en el interior del árbol, a pesar de estar expuestos

a menores temperaturas, podría explicarse por la menor iluminación a la que estos están sometidos. Por otro lado, existe una relación negativa entre el contenido de clorofila y los azúcares del epicarpio (Huff, 1984) y una relación positiva con la concentración de azúcares solubles y la toma de color del flavedo (Holland et al., 1999). En el interior del árbol se reduce la luz incidente, reduciendo la capacidad fotosintética, lo que podría provocar menor disponibilidad de carbohidratos en esa zona del árbol. Según Jacob-Wilk et al. (1999) los niveles de clorofila estarían determinados por un balance entre su síntesis y su degradación. Esto parece indicar que, en nuestro estudio, la relación entre la síntesis y la degradación sería mayor en los frutos del interior de los árboles, que en los frutos del exterior.

4.3.3 Contenido de aceites esenciales en los frutos

El tratamiento de poda, la zona del árbol y la fecha de cosecha, afectaron significativamente la concentración de aceites esenciales en los frutos. Sin embargo, las interacciones entre los factores no fueron significativas. Estos resultados se presentan en la Tabla 3, donde se puede constatar que, en términos generales, el tratamiento de poda redujo la concentración de aceites esenciales en los frutos, respecto a los provenientes de árboles no podados. Por otro lado, independientemente del tratamiento, la fruta situada en el exterior de la copa presentó menor concentración de aceites esenciales. En todos los casos, los frutos cosechados en el mes de agosto presentaron menor concentración de aceites esenciales que los frutos cosechados en las dos fechas anteriores (junio y julio).

Tabla 3

Concentración de aceites esenciales en frutos de limón determinado en tres fechas de cosecha

Aceites esenciales	
Tratamiento	(g kg⁻¹ PF fruto)
Control	6.5571 a ^z
Podado	6.2221 b
Zona	
Interior	6.5362 a
Exterior	6.2429 b
Fecha	
15/6/2021	6.8350 a
20/7/2021	6.6312 a
19/8/2021	5.7025 b

Nota. Determinación por el método de Scott en frutos del interior (desde el tronco hasta 1 m del exterior) y del exterior (1 m desde el exterior hacia el interior) de árboles de limón Criollo podados y control (sin podar). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos, zonas o fechas de cosecha ($p \leq 0,05$). No hay interacción entre factores.

En la mayoría de los vegetales, la concentración de aceites esenciales y su composición depende del genotipo, del órgano en cual se encuentren y del estado de desarrollo de este (Figueiredo et al., 2008). En cítricos, se ha reportado que, en la mayoría de las especies comerciales, la composición de aceites esenciales se relaciona con las especies ancestrales (Luro et al., 2020). Por otro lado, la concentración y composición varían en función de los cultivares, del órgano y de las condiciones ambientales donde se desarrollan las plantas (Crescimanno et al., 1989a, 1989b; Luro et al., 2020; Moufida & Marzouk, 2003; Palazzolo et al., 2013). En nuestro experimento, la reducción en la concentración de aceites esenciales evidenciada en la tercera fecha de cosecha, es

decir, a fines del invierno, coincide con lo determinado por Frondoy Piazzoli (2022) en limón Criollo en nuestras condiciones y con lo reportado para diferentes cultivares de limón en las condiciones de Palermo, Italia (Crescimanno et al., 1989b). En estos trabajos, a medida que el fruto madura, se reduce la concentración de aceites esenciales y cambia la composición de estos. En el mismo sentido, Luro et al. (2020), estudiando la producción de aceites esenciales en frutos de cítricos de diferentes especies en dos zonas contrastantes, evidenciaron la ocurrencia de una menor producción de aceites esenciales en los frutos provenientes de la zona más cálida (Bahía, Brasil), respecto de los provenientes de la zona más fresca (Córcega, Francia). Las mayores diferencias correspondieron al grupo relacionado genéticamente con *Citrus medica*, que incluye a los limones y limas, cuyos frutos produjeron 3,5 veces menos aceites esenciales en Bahía que en Córcega.

En el caso de los cítricos, la disminución de la temperatura también desencadena el cambio de color de los frutos y modifica las características de la piel. En base a los resultados presentados pudimos constatar que la poda influyó en la distribución de la luz PAR en los árboles de limón, manteniendo, los primeros meses, valores levemente superiores en el interior de árboles podados, en comparación con el interior de los árboles no podados. Además, se observó una relación entre la temperatura, con diferencias entre el tratamiento de poda y el control, lo que podría haber afectado tanto la capacidad fotosintética como la respiración en las diferentes zonas del árbol, para cada tratamiento. En este experimento, la coloración de los frutos varió significativamente según su ubicación en el árbol. Los frutos del interior del árbol permanecieron verdes por más tiempo y presentaron mayor concentración de aceites esenciales, en comparación con los frutos del exterior, que lograron una coloración más amarilla y menor concentración de aceites esenciales. Se constató que los frutos de los árboles podados presentaron menor contenido de aceites esenciales, lo que en las condiciones del experimento no se puede relacionar con el color de los frutos, que en términos generales no fue significativamente afectado por el tratamiento.

En síntesis, en este trabajo se confirmó la disminución del contenido de aceites esenciales a medida que avanza la maduración de los frutos de limón, que la poda realizada en las condiciones del experimento redujo su concentración de aceites y que los frutos ubicados en el interior del árbol presentaron mayor concentración de aceites esenciales que los del exterior. De acuerdo con Luro et al. (2020), no siempre es posible identificar los factores de variación comparando estudios realizados en diferentes materiales genéticos, utilizando diferentes métodos de extracción y determinación y con

escasa información sobre el cultivo y las condiciones ambientales en las que se desarrollaron los estudios (clima y suelo). Estos resultados resaltan la compleja interacción entre los factores ambientales y el desarrollo de las plantas, y evidencian la necesidad de realizar nuevos estudios para determinar aquellos factores asociados a la producción de aceites esenciales y con ello poder determinar medidas de manejo que contribuyan al aumento en el rendimiento de los aceites.

5 CONCLUSIONES

Los frutos de limón Criollo cosechados en plena estación (junio y julio) presentaron mayor concentración de aceites esenciales que aquellos frutos cosechados a fines del invierno (agosto).

La poda realizada a fines de noviembre provocó una reducción de la concentración de aceites esenciales en los frutos.

Los frutos ubicados en la zona interior de árboles podados y no podados lograron menor coloración que los del exterior y presentaron mayor concentración de aceites esenciales.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Agustí, M. (2003). *Citricultura* (2ª ed.). Mundi-Prensa.
- Alquézar, B., Rodrigo, M. J., & Zacarías, L. (2008). Carotenoid biosynthesis and their regulation in citrus fruits. *Tree and Forestry Science and Biotechnology*, 2(Special issue 1), 23-35.
- Arbiza, H., Ferenczi, A., Gambetta, G., Rivas, F., & Gravina, A. (2003). Physiological and yield responses to pruning in three citrus cultivars. En *Proceedings of the 9th International Citrus Congress* (pp. 475-478). ISC.
- Bain, J. M. (1958). Morphological, anatomical, and physiological changes in the developing fruit of the Valencia orange, *Citrus sinensis* (L) Osbeck. *Australian Journal of Botany*, 6(1), 1-23.
- Ballester, A. R., & Lafuente, M. T. (2017). LED blue light-induced changes in phenolics and ethylene in citrus fruit: Implication in elicited resistance against *Penicillium digitatum* infection. *Food Chemistry*, 218, 575-583.
- Bitters, W. P., & Scora, R. W. (1970). The influence of citrus rootstocks upon the volatile rind oil content of Valencia orange (*Citrus sinensis* Osbeck). *Botanical Gazette*, 131(2), 105-109.
- Borges, A., Espino, M., Severino, V., Arbiza, H., & Gravina, A. (2005). *Respuesta fisiológica y productiva de mandarina 'Nova' [Citrus reticulata Bl. × (C. paradisi Macf. × C. tangerina Hort. ex. Tan.)] a diferentes épocas e intensidades de poda* [Contribución]. 2º Simposio de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Citrus, Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay.
- Bourgou, S., Rahali, F. Z., Ourghemmi, I., & Tounsi, M. S. (2012). Changes of peel essential oil composition of four Tunisian citrus during fruit maturation. *The Scientific World Journal*, 2012(1), Artículo e528593. <https://doi.org/10.1100/2012/528593>
- Campbell, R. J., Marini, R. P., & Birch, J. B. (1992). Canopy position affects light response curves for gas exchange characteristics of apple spur leaves. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(3), 467-472.
- Cerutti, M., & Neumayer, F. (2004). Introducción a la obtención de aceite esencial de limón. *Invenio*, 7(12), 149-155.
- Coggins, C. W., Jr., Hall, A. E., & Jones, W. W. (1981). The influence of temperature on regreening and carotenoid content of the 'Valencia' orange rind. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106(2), 251-254.
- Crescimanno, F. G., De Pasquale, F., Germanà, M. A., Bazan, E., & Palazzolo, E. (1989a). Annual variation of essential oils in the leaves of four lemon (*C. limon* L. Burm. f.) cultivars. En R. Goren & K. Mendel (Eds.), *Citriculture: Proceedings of the Sixth International Citrus Congress* (pp. 583-588). Margraf Verlag.

- Crescimanno, F. G., De Pasquale, F., Germanà, M. A., Bazan, E., & Palazzolo, E. (1989b). Influence of the harvesting period on the yield of essential oil from the peel of four lemon cultivars (*C. limon* (L.) Burm. f.). En R. Goren & K. Mendel (Eds.), *Citriculture: Proceedings of the Sixth International Citrus Congress* (pp. 589-595). Margraf Verlag.
- Cronje, P. J. R., Barry, G. H., & Huysamer, M. (2013). Canopy position affects pigment expression and accumulation of flavonoid carbohydrates of 'Nules Clementine' mandarin fruit, thereby affecting rind condition. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 138(3), 217-224.
- Espinosa, M. F., Iglesias, D. J., Primo-Millo, E., Hernández, F., & Amorós, A. (2015). Efecto de la temperatura sobre la respiración de los órganos reproductivos y vegetativos del limón. *Actas de Horticultura*, (71), 283-285.
<http://hdl.handle.net/20.500.11939/7088>
- Figueiredo, A. C., Barroso, J. G., Pedro, L. G., & Scheffer, J. J. C. (2008). Factors affecting secondary metabolite production in plants: Volatile components and essential oils. *Flavour and Fragrance Journal*, 23(4), 213-226.
<https://doi.org/10.1002/ffj.1875>
- Fronzoy Piazzoli, C. Y. (2022). *Concentración de aceites esenciales durante la maduración de frutos de limón Lisbon* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/47045>
- Gambetta, G., Martínez-Fuentes, A., Bentancur, O., Mesejo, C., Reig, C., Gravina, A., & Agustí, M. (2012). Hormonal and nutritional changes in the flavonoid regulating rind color development in sweet orange (*Citrus sinensis* (L.) Osb.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 31(3), 273-282.
- Gambetta, G., Mesejo, C., Martínez-Fuentes, A., Reig, C., Gravina, A., & Agustí, M. (2014). Gibberellic acid and norflurazon affecting the time-course of flavonoid pigment and abscisic acid content in 'Valencia' sweet orange. *Scientia Horticulturae*, 180, 94-101.
- Gravina, A. (2014). *Fisiología de citrus*. Universidad de la República.
- Hernández Mazzini, F. (2017). *Respuesta vegetativa y productiva de la mandarina 'Afourer' a distintos tipos de poda y manejo de la brotación interior* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/18655>
- Holland, N., Sala, J. M., Menezes, H. C., & Lafuente, M. T. (1999). Carbohydrate content and metabolism as related to maturity and chilling sensitivity of cv. Fortune mandarins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(7), 2513-2518.
- Hu, L. M., Xia, R. X., Xiao, Z. Y., Huang, R. H., Tan, M. L., Wang, M. Y., & Wu, Q. S. (2007). Reduced leaf photosynthesis at midday in citrus leaves growing under field or greenhouse conditions. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 82(3), 387-392.
- Huff, A. (1984). Sugar regulation of plastid interconversions in epicarp of citrus fruit. *Plant Physiology*, 76(2), 307-312.

- Iglesias, D. J., Tadeo, F. R., Legaz, F., Primo-Millo, E., & Talon, M. (2001). In vivo sucrose stimulation of colour change in citrus fruit epicarps: Interactions between nutritional and hormonal signals. *Physiologia Plantarum*, 112(2), 244-250.
- Iglesias, D. J., Tadeo, F. R., Primo-Millo, E., & Talon, M. (2003). Fruit set dependence on carbohydrate availability in citrus trees. *Tree Physiology*, 23(3), 199-204.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Banco de datos agroclimático*. <https://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Iwagaki, I. (1981). Tree configuration and pruning of Satsuma mandarin in Japan. En K. Matsumoto (Ed.), *Proceedings of the International Society of Citriculture, 1981* (Vol. 1, pp. 169-171). ISC.
- Jacob-Wilk, D., Holland, D., Goldschmidt, E. E., Riov, J., & Eyal, Y. (1999). Chlorophyll breakdown by chlorophyllase: Isolation and functional analysis. *Plant Journal*, 20(6), 653-661.
- Jiménez-Cuesta, M., Cuquerella, J., & Martínez-Jávega, J. M. (1982). Determination of a color index for citrus fruit degreening. En *Proceedings of the International Society of Citriculture, 1981* (Vol. 2, pp. 750-753). ISC.
- Kesterson, J. W., Braddock, R. J., Koo, R. C. J., & Reese, R. L. (1977). Nitrogen and potassium fertilization as related to the yield of peel oil from 'pineapple' oranges. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 102(1), 3-4.
- Kimball, D. A. (1999). *Citrus processing: A complete guide* (2nd ed.). Aspen.
- Koo, R. C. J., & Reese, R. L. (1977). Influence of nitrogen, potassium and irrigation on citrus fruit quality. En W Grierson (Ed.), *Proceedings of the International Citrus Congress* (Vol. 1, pp. 34-38). ISC.
- Koo, R. C. J., Young, T. W., Reese, R. L., & Kesterson, J. W. (1973). Responses of 'Bears' lemon to nitrogen, potassium and irrigation applications. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 86, 9-12.
- Ladaniya, M. S. (2008). *Citrus fruit: Biology, technology and evaluation*. Elsevier.
- Lado, J., Gambetta, G., & Zacarías, L. (2018). Key determinants of citrus fruit quality: Metabolites and main changes during maturation. *Scientia Horticulturae*, 233, 238-248.
- Lado, J., Rodrigo, M. J., Cronje, P., & Zacarías, L. (2015). Involvement of lycopene in the induction of tolerance to chilling injury in grapefruit. *Postharvest Biology and Technology*, 100, 176-186.
- Looney, N. E. (1968). Light regimes within standard size apple trees as determined spectrophotometrically. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 93, 1-6.
- Lo Piccolo, E., Lauria, G., Bonghi, G., Guidi, L., Brestic, M., Remorini, D., Massai, R., & Landi, M. (2023). Differences in pigment circadian rhythmicity in green- and red-leaved trees species in the sun and shade. *Journal of Forestry Research*, 34, 693-704. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01528-8>

- Lücker, J., El Tamer, M. K., Schwab, W., Verstappen, F. W. A., Van der Plas, L. H. W., Bouwmeester, H. J., & Verhoeven, H. A. (2002). Monoterpene biosynthesis in lemon (*Citrus limon*): cDNA isolation and functional analysis of four monoterpene synthases. *European Journal of Biochemistry*, 269(13), 3160-3171. <https://doi.org/10.1046/j.1432-1033.2002.02985.x>
- Luro, F., Garcia Neves, C., Costantino, G., Gesteira, A., Paoli, M., Ollitrault, P., Tomi, F., Micheli, F., & Gibernau, M. (2020). Effect of environmental conditions on the yield of peel and composition of essential oils from citrus cultivated in Bahia (Brazil) and Corsica (France). *Agronomy*, 10(9), Artículo e1256. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091256>
- Machado, E. C., Schmidt, P. T., Medina, C. L., & Ribeiro, R. V. (2005). Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40(12), 1161-1170.
- Magwaza, L. S., Mditshwa, A., Tesfay, S. Z., & Opara, U. L. (2017). An overview of preharvest factors affecting vitamin C content of citrus fruit. *Scientia Horticulturae*, 216, 12-21.
- Magwaza, L. S., Opara, U. L., Cronje, P. J. R., Landahl, S., & Terry, L. A. (2013). Canopy position affects rind biochemical profile of 'Nules Clementine' mandarin fruit during postharvest storage. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 300-308.
- Manera, J., Ruiz, G., Fernández, J. C., Conesa, A., Robles, J. M., & Porrás, I. (2008). Influencia de la temperatura sobre las coordenadas colorimétricas L, a y b en la evolución del color externo en los frutos de limón. *Levante Agrícola*, 47(400), 65-70.
- Martiz, J., Ramirez, E., & Cornejo, J. (2014, 3-5 de noviembre). *Influencia de cuatro sistemas de poda sobre la calidad, productividad y uso de mano de obra en naranjo 'Parent Washington'* [Contribución]. IV Simposio Nacional, I Congreso Latinoamericano: Investigación y Desarrollo Tecnológico en Citrus, Salto, Uruguay.
- Medina, C. L., Souza, R. P., Machado, E. C., Ribeiro, R. V., & Silva, J. A. (2002). Photosynthetic response of citrus grown under reflective aluminized polypropylene shading nets. *Scientia Horticulturae*, 96(1-4), 115-125.
- Mendonça, V., Ramos, J. D., Rufini, J. C. M., Araújo Neto, S. E. D., & Rossi, E. P. (2006). Qualidade de frutos da tangerina 'Ponkan' após poda de recuperação. *Ciência e Agrotecnologia*, 30(2), 271-276.
- Mesejo, C., Gambetta, G., Gravina, A., Martínez-Fuentes, A., Reig, C., & Agustí, M. (2012). Relationship between soil temperature and fruit colour development of 'Clemenpons' clementine mandarin (*Citrus clementina* Hort. ex Tan.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(3), 520-525.
- Mitalo, O. W., Otsuki, T., Okada, R., Obitsu, S., Masuda, K., Hojo, Y., Matsuura, T., Mori, I. C., Abe, D., Asiche, W. O., Akagi, T., Kubo, Y., & Ushijima, K. (2020). Low temperature modulates natural peel degreening in lemon fruit independently of endogenous ethylene. *Journal of Experimental Botany*, 71(16), 4778-4796.

- Moufida, S., & Marzouk, B. (2003). Biochemical characterization of blood orange, sweet orange, lemon, bergamot and bitter orange. *Phytochemistry*, 62(8), 1283-1289.
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2024). *Encuesta citrícola: "Primavera 2023"*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2024-02/2023PUBLICACION%20CITRICOLA%20PRIM.pdf>
- Otero, Á., Grasso, R., Goñi, C., Pérez, E., Rubio, L., Maeso, D., Bertalmío, A., Buenahora, J., Giambiasi, M., Arruabarrena, A., Lado, J., Moltini, A. I., Fasiolo, C., Esoino, M., & Rivas, F. (2020). Desafíos de la citricultura en Uruguay y el aporte de INIA a su competitividad. *Revista INIA*, (61), 55-68.
- Palazzolo, B., Laudicina, V. A., & Germanà, M. A. (2013). Current and potential use of citrus essential oils. *Current Organic Chemistry*, 17, 3042-3049.
- Pilau, F. G., & Angelocci, L. R. (2015). Área foliar e interceptação de radiação solar pela copa de uma laranjeira. *Bragantia*, 74(4), 476-482.
- Qiao, Y., Xie, B. J., Zhang, Y., Zhou, H. Y., & Pan, S. Y. (2007). Study on aroma components in fruit from three different Satsuma mandarin varieties. *Agricultural Sciences in China*, 6(12), 1487-1493.
- Redd, J. B., Hendrix, C. M., & Hendrix, D. L. (1986). *Quality control manual for citrus processing plants: Book 1*. Intercit.
- Rodrigo, M. J., Alquézar, B., Alós, E., Lado, J., & Zacarías, L. (2013). Biochemical bases and molecular regulation of pigmentation in the peel of citrus fruit. *Scientia Horticulturae*, 163, 46-62.
- Rosa, R. D., Nava, G. A., Piva, L. P., Mezzalira, E. J., & Paulus, D. (2012). Poda e raleio de tangerineira (*Citrus deliciosa* Tenore) cv. Montenegrina no Sudoeste do Paraná. *Revista Ceres*, 59(2), 254-261.
- Simón-Grao, S., Gimeno, V., Simón, I., Lidón, V., Nieves, M., Balal, R. M., Carbonell-Barrachina, A. A., Manera, F. J., Hernández, F., & García-Sánchez, F. (2014). Fruit quality characterization of eleven commercial mandarin cultivars in Spain. *Scientia Horticulturae*, 165, 274-280. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.11.022>
- Sinclair, W. B. (1984). *The biochemistry and physiology of the lemon and other citrus fruits*. University of California.
- Sites, J. W., & Reitz, H. J. (1949). The variation in individual Valencia oranges from different locations of the tree as a guide to sampling methods and spot-picking for quality: I. Soluble solids in the juice. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 54, 1-10.
- Sozzi, G. O. (2007). Fisiología de la maduración de los frutos de especies leñosas. En G. O. Sozzi (Ed.), *Árboles frutales: Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento* (pp. 669-687). Universidad de Buenos Aires.
- Stearns, C. R., & Young, G. T. (1942). The relation of climatic conditions to color development in citrus fruit. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 55, 59-61.

- Tadeo, F. R., Cercós, M., Colmenero-Flores, J. M., Iglesias, D. J., Naranjo, M. A., Ríos, G., Carrera, E., Ruiz-Rivero, O., Lliso, I., Morillon, R., Ollitrault, P., & Talon, M. (2008). Molecular physiology of development and quality of citrus. *Advances in Botanical Research*, *47*, 147-223.
- Tietel, Z., Lewinsohn, E., Fallik, E., & Porat, R. (2012). Importance of storage temperatures in maintaining flavor and quality of mandarins. *Postharvest Biology and Technology*, *64*(1), 175-182.
- Voo, S. S., Grimes, H. D., & Lange, B. M. (2012). Assessing the biosynthetic capabilities of secretory glands in citrus peel. *Plant Physiology*, *159*(1), 81-94.