



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Variabilidad espacial y temporal en la emergencia de *Brassica carinata* y su impacto en el crecimiento y rendimiento en grano

Gastón Schenck Forlán

**Maestría en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias Vegetales**

Diciembre 2022

Variabilidad espacial y temporal en la emergencia de *Brassica carinata* y su impacto en el crecimiento y rendimiento en grano

Gastón Schenck Forlán

**Maestría en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias Vegetales**

Diciembre 2022

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Santiago Dogliotti, Oswaldo Ernst y Andres Berger el 22 de Diciembre de 2022. Autor: Gastón Schenck Forlán. Director: Sebastián Ramón Mazzilli Vanzini.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi tutor, Ing. Agr. (Dr.) Sebastián Mazzilli, por permitirme llevar adelante este trabajo, por hacerlo posible y por su gran ayuda durante este tiempo. Agradecer a su equipo de trabajo, funcionarios de la EEMAC, profesores y compañeros, los cuales me acompañaron y ayudaron.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	IX
1. <u>INTRODUCCIÓN GENERAL</u>.....	1
1.1 EL CULTIVO DE <i>BRASSICA CARINATA</i> PARA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.....	1
1.2 ESTABLECIMIENTO Y ARREGLO ESPACIO-TEMPORAL DE LOS CULTIVOS.....	5
1.3 MÉTODOS DE ESTUDIO DEL ARREGLO ESPACIAL Y TEMPORAL.....	11
1.4 OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y RESULTADOS ESPERADOS.....	16
2. <u>LA POBLACIÓN Y EL ARREGLO ESPACIAL DE PLANTAS EN LA LÍNEA A COSECHA NO AFECTA EL RENDIMIENTO EN GRANO EN BRASSICA CARINATA</u>.....	17
2.1 RESUMEN.....	17
2.2 INTRODUCCIÓN.....	18
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
2.3.1 <u>Ubicación, tratamientos y manejo del experimento</u>	22
2.3.2 <u>Población y dinámica poblacional</u>	23
2.3.2.1 Dinámica poblacional.....	24
2.3.2.2 Toma de imágenes.....	25
2.3.2.3 Calibración, etiquetado y conteo de plantas.....	26
2.3.3 <u>Distribución espacial de plantas</u>	27
2.3.3.1 Polígonos de Thiessen.....	27
2.3.3.2 Excentricidad.....	28

2.3.3.3 Excentricidad/área.....	30
2.3.3.4 Índice de Morisita.....	30
2.3.3.5 Distancia entre plantas y rectangularidad.....	31
2.3.4 <u>Análisis estadístico</u>	31
2.4 RESULTADOS.....	33
2.4.1 <u>Caracterización climática del período experimental</u>	33
2.4.2 <u>Población y dinámica poblacional</u>	34
2.4.3 <u>Efecto de la densidad y la distancia entre hileras en el rendimiento en grano</u>	36
2.4.4 <u>Arreglo espacial</u>	36
2.4.5 <u>Efecto del arreglo espacial sobre el rendimiento en grano</u>	39
2.4.6 <u>Rendimiento por planta</u>	40
2.5 DISCUSIÓN.....	42
2.6 CONCLUSIONES.....	45
2.7 BIBLIOGRAFÍA.....	46
 3. <u>COMENTARIOS Y EVALUACIÓN FINAL</u>	 50
3.1 RENDIMIENTO LOGRADO.....	50
3.2 LOGROS ALCANZADOS.....	51
3.3 DIFICULTADES Y TAREAS PENDIENTES.....	54
3.4 RESUMEN FINAL.....	57
 4. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	 59

RESUMEN

La expansión e interés en el desarrollo del cultivo de *Brassica carinata* se ha incrementado a nivel global, explicado por la creciente demanda por biocombustibles y las características favorables del cultivo. En Uruguay, el cultivo está presente a nivel comercial desde el año 2016. No obstante, no existen trabajos que estudien aspectos asociados a la uniformidad espacial y temporal del cultivo sobre la dinámica de la población de plantas y el rendimiento en grano. Las hipótesis de este trabajo fueron: i) La densidad de siembra y el espaciamiento determinan el arreglo espacial del cultivo, donde menores poblaciones objetivo y mayor distancia entre hileras se traducen en un arreglo menos uniforme; ii) poblaciones densas y distancias entre hileras mayores aumentan la mortalidad de plantas y disminuyen la uniformidad de emergencia del cultivo, iii) el rendimiento en grano del cultivo de carinata no se verá afectado por la población a cosecha dentro de un amplio rango, pero se verá afectado por la distancia entre hileras (a mayor distancia, menor rendimiento) y por distribuciones no uniformes de la población a cosecha y iv) El rendimiento del cultivo se verá afectado por la variabilidad de emergencias. Parcelas con emergencias más uniformes logran un rendimiento más elevado. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto del arreglo espacial y dinámica temporal de plantas de un cultivo de *Brassica carinata*, en el crecimiento y rendimiento en grano. Para ello, se realizó un ensayo a campo, con arreglos espaciales contrastantes, 4 poblaciones objetivo (30, 50, 70 y 90 pl m⁻²) y dos espaciamientos entre hileras (0,17-0,34 m) y se evaluó el rendimiento por planta y por unidad de superficie. La población se incrementó desde los 20 días post-siembra hasta los 30 días, donde ocurrió el pico poblacional, para luego decaer a cosecha. El rendimiento medio fue de 516 +/- 24 g m⁻² y no estuvo afectado de manera significativa por la población, el espaciamiento entre hileras y la interacción. No se detectó un efecto significativo de los tratamientos en el arreglo adquirido por el cultivo y el arreglo espacial resultante no se relacionó significativamente con el rendimiento. El estudio del efecto de la dinámica de emergencias y muertes de plantas en el rendimiento no fue conclusivo, pero se lograron avances en la metodología para el estudio de la dinámica temporal.

En trabajos futuros es necesario contar con una identificación exacta de cada planta en el tiempo lo que posibilitará hacer el seguimiento de la población para luego estudiar la significancia de la dinámica temporal en el rendimiento final.

Palabras clave: carinata, biocombustible, uniformidad, arreglo espacial, dinámica poblacional, emergencia, muerte de plantas, rendimiento.

SUMMARY

The expansion and interest in the development of *Brassica carinata* (carinata) has increased in the world, explained by the rising demand for biofuels and the favorable characteristics of the crop. In Uruguay, the crop has been commercially present since 2016. However, there are no existing studies on aspects associated with spatial and temporal uniformity of the crop on plant population dynamics and grain yield. The hypotheses of this work were: i) planting density and row distance determine the spatial arrangement of the crop, where lower target populations and lower row distances result in a less uniform arrangement; ii) dense populations and larger row distances increase plant mortality and decrease crop emergence uniformity, iii) carinata grain yield will not be affected by harvest population within a wide range, but will be affected by row distance (larger the distance, lower grain yield) and by non-uniform harvest plant population distributions and iv) crop yield will be affected by the variability of plant emergences. Plots with more uniform emergences achieve a higher yield. The objective of the work was to evaluate the effect of the spatial arrangement and temporal dynamics of plants of a *Brassica carinata* crop, on growth and grain yield. For this, a field trial was conducted with contrasting spatial arrangements, 4 target plant populations (30, 50, 70 and 90 pl m⁻²) and two row distances (0.17-0.34 m) and yield per plant and per unit area were evaluated. Plant population increased from 20 days post-sowing to 30 days, where the peak population occurred, and then decline at harvest. Average yield was 516 +/- 24 g m⁻² and was not significantly affected by population, row distance, and interaction. No significant effect of treatments on the arrangement acquired by the crop was detected and the resulting spatial arrangement was not significantly related to yield. The study of the effect of the dynamics of emergence and death of plants on yield was not conclusive, but advances were made in the methodology for the study of temporal dynamics. In future studies, it is necessary to have an exact identification of each plant over time, which will make it possible to monitor the population and then study the significance of the temporal dynamics in the final yield.

Keywords: carinata, biofuel, uniformity, spatial arrangement, population dynamics, emergence, plant death, yield.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 EL CULTIVO DE *BRASSICA CARINATA* PARA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Brassica carinata (carinata) es un anfidiplóide (BBCC, $2n = 34$) (Taylor et al., 2010) que surge como resultado de la duplicación de cromosomas ($n = 17$, BBCC) después de un cruce híbrido entre *Brassica nigra* (L.) W.D.J. Koch ($n = 8$, BB) y *Brassica oleracea* L. ($n = 9$, CC) (Mulvaney et al., 2019). Es originaria del norte de África, en particular de las tierras altas de Etiopía (Cardone et al., 2003), donde se cultiva desde al menos 3000 a. C., y de donde adquiere el nombre mostaza de Etiopía (Mulvaney et al., 2019). Es ampliamente utilizada como alimento por los etíopes y se le ha encontrado una cantidad de usos además de la extracción de aceite de sus semillas (Cardone et al., 2003). Las hojas tiernas y las puntas de los tallos se comen crudas en ensaladas, mientras que las hojas más viejas y las porciones de tallos más gruesos se cocinan y comen como coles. Sus semillas, molidas, se emplean como condimento y también se utilizan para ablandar el cuero, con fines terapéuticos y para fabricar escobas con sus ramas (Fernández, 1991).

Las *Brassicas* son el segundo cultivo de semillas oleaginosas más sembrado después de la soja (*Glycine max* L.), superando recientemente al maní (*Arachis hypogaea* L.), al girasol (*Helianthus annuus* L.) y al algodón (*Gossypium hirsutum*) (Scarth y Tang, 2006). En diferentes partes del mundo se cultivan diferentes especies de *Brassicas*, las cuales poseen diferente adaptación según sus centros de origen. *Brassica juncea* predomina en regiones semitropicales más cálidas, mientras que *Brassica napus* (canola) predomina en regiones templadas más frías; *Brassica rapa* se cultiva a nivel mundial y *Brassica carinata* hasta hace algunos años se cultivaba principalmente en Etiopía y el noreste de África (Seepaul et al., 2021, McVetty y Duncan, 2016). El aceite de carinata está compuesto por diferentes ácidos grasos, donde predomina el ácido erúico (22:1; número de carbono: cantidad dobles enlace), en torno al 40 % y 46 %, sumado a 5,1-11,6 % de oleico (18:1), 13,7–18,9 % de ácido linoleico (18:2), 10,2–16,0 % α linolénico (18:3), 7 % ácido eicosenoico (20:1) y 4-5 % de ácidos de cadena muy larga (VLCFA) como ácido docosadienoico

(22:2) y ácido nervónico (24:1) (Taylor et al., 2010). Aunque algunos de estos compuestos son indeseables desde el punto de vista nutricional, los aceites con alto contenido de C22:1 y sus derivados tienen un valor significativo en aplicaciones industriales (McVetty y Duncan, 2016).

Gran parte de los programas de mejoramiento genético no alimenticios tienen como objetivo estratégico aumentar el nivel de C22:1, así como la proporción de VLCFA, para mejorar la competitividad económica del aceite (Scarth y Tang, 2006, Taylor et al., 2010), ya que permite la producción de biocombustibles de alta energía, como combustible para aviones (Mulvaney et al., 2019). Sin embargo, a nivel productivo, la concentración y composición del aceite tienden a ser rasgos más estables que el rendimiento y no se ve afectado por prácticas agronómicas como la densidad o el espaciamiento utilizado (Pan et al., 2012, Mulvaney et al., 2019). Esto simplifica el manejo del cultivo de forma que los productores deben solo hacer foco en obtener el mayor rendimiento posible, mientras no se espera que se afecte la calidad del grano (Mulvaney et al., 2019).

A través del desarrollo de fuentes alternativas de energía renovable se abordan diversos temas como la seguridad energética, la volatilidad del mercado petrolero, la mitigación del cambio climático y la salud humana (Hossain et al., 2018, Seepaul et al., 2016). El interés reciente en diversificar los sistemas de producción y desarrollar nuevos cultivos (Pan et al., 2012), sumado a la creciente demanda de materias primas renovables como sustituto de los productos derivados del petróleo, ofrece una oportunidad única para las semillas oleaginosas (Zanetti et al., 2013). Los biocombustibles son un componente importante para la transición a sistemas basados en energías renovables (Mulvaney et al., 2019). En particular, el biodiésel es un prometedor sustituto del combustible fósil, que se puede extraer de cualquier cultivo de semillas oleaginosas, soja, canola, girasol, etc. (Cardone et al., 2003). Actualmente, la mayoría de los aceites derivados de plantas se utilizan para productos alimenticios; sin embargo, en los últimos años, también se emplean para la producción de ciertos productos industriales como surfactantes, plastificantes, emulsionantes, detergentes, lubricantes, adhesivos, cosméticos, oleoquímicos y biocombustibles (Zanetti et al., 2013, Mulvaney et al., 2019).

En Europa, las aplicaciones industriales no alimentarias de derivados de plantas representan el 11 % del uso total (Zanetti et al., 2013), pero cada vez existe más preocupación sobre el uso de cultivos alimentarios para la producción de bioenergía (Mulvaney et al., 2019), ya que se utilizan recursos naturales de manera competitiva con la producción de alimentos (Seepaul et al., 2019). Los cultivos de *Brassica* son materias primas prometedoras y competitivas para las industrias de combustibles de base biológica (Seepaul et al., 2016). Los biocombustibles de segunda generación como los que se producen a partir de carinata se diferencian en dos aspectos: se obtienen de vegetales que no tienen un fin alimentario (a diferencia de los de primera generación, cuya materia prima compite con el alimento) y se producen con otras tecnologías (refinación simple) que los harían más ecológicos y avanzados (Moller y Meikle, 2018). En particular, el cultivo de carinata cumple con los requisitos de no ser apto para consumo, pero sí muy adecuado para su uso en otras aplicaciones tales como biodiésel (principal uso; se emplean como materia prima para combustibles de transporte y de aviación), biopolímeros, lubricantes, jabones y surfactantes (Pan et al., 2012, Seepaul et al., 2019) y posee más de 200 aplicaciones industriales potenciales (Scarth y Tang, 2006).

Cuando se usan cultivos oleaginosos como la soja o canola para producir biocombustibles, se generan cadenas cortas de hidrocarburos, lo cual requiere de procesos energéticamente costosos para generar cadenas de hidrocarburos largas, necesarias para producir biocombustibles de alto valor energético (Mulvaney et al., 2019). El proceso de refinación de carinata en biodiésel y biocombustible es simple y económico porque los ácidos grasos como el erúico y linoleico producen cadenas de hidrocarburos largas, lo que reduce la necesidad de reacciones químicas sintéticas adicionales (Leon et al., 2017) y a nivel industrial requiere menor refinamiento, lo que implica menores costos energéticos (Taylor et al., 2010).

Posterior al prensado y refinado en la industria, se obtiene un subproducto proteico, el cual contiene, aproximadamente, 40 % de proteína y 8 % de fibra cruda. No obstante, contiene un elevado nivel de glucosinolatos (Alemaw, 2003), por lo que solo puede ser suministrada en cantidades controladas al ganado vacuno como suplemento (relación 10:1). Los glucosinolatos son compuestos naturales, no tóxicos,

relacionados a la defensa de las plantas, pero al ser hidrolizados producen compuestos que pueden causar lesiones, como suprimir secreciones de la tiroide o necrosis hepática (Scarth y Tang, 2006). Sin embargo, se la puede someter a un lavado con solvente para eliminar los glucosinolatos y así puede ser utilizada como alimento para peces (Mulvaney et al., 2019, Taylor et al., 2010).

Dada la reciente incorporación del cultivo de carinata en los sistemas agrícolas del mundo, existe escasa información agronómica básica, incluidas las estrategias de siembra, fertilización y manejo de plagas, lo cual limita la producción de este cultivo (Mulvaney et al., 2019). Sin embargo, su adaptabilidad y productividad hace que sea un cultivo con potencial de crecimiento (Cardone et al., 2003). Se ha propuesto a este cultivo de invierno en regiones subtropicales, ya que parece ser más tolerante que la canola a ambientes más cálidos (Mulvaney et al., 2019), en siembras más tardías y en condiciones de suelo salino (Setia et al., 1995). En particular, ha obtenido mayores rendimientos en grano en condiciones ambientales desfavorables para el género, como son las precipitaciones escasas y las temperaturas altas durante el período de llenado del grano (Cardone et al., 2003, Taylor et al., 2010, Seepaul et al., 2016).

La productividad encontrada en el cultivo de carinata se basa en sus características morfológicas y fisiológicas. Como las especies del género *Brassica*, su raíz es pivotante con una tendencia natural a profundizar y extraer agua de zonas profundas, pero, además, es capaz de ramificar de gran manera en caso de encontrarse con impedancias (Fernández, 1991, Seepaul et al., 2021). No tiene una etapa prolongada en estado de roseta como la canola, su desarrollo es rápido y exuberante (elonga antes de la floración), derivado de *B. oleracea*, lo cual le permite una interceptación de la radiación solar muy eficiente (Fernández, 1991, Seepaul et al., 2016). Su producción de biomasa aérea supera a las demás especies de *Brassica* (Fernández, 1991), donde la acumulación temprana del área foliar no solo mejora la interceptación de radiación y la capacidad fotosintética, sino que también minimiza la pérdida de agua del suelo por evaporación y suprime el crecimiento de malezas (Seepaul et al., 2016). Su mayor rendimiento puede deberse al número de silicuas por unidad de superficie. Luego de la elongación, sus yemas axilares producen

ramificaciones secundarias, terciarias y cuaternarias, mientras que solo se forman ramas primarias en la canola (Seepaul et al., 2016).

En general, el cultivo de carinata posee un ciclo considerablemente más largo que la canola, con períodos de floración y fructificación más amplios, mantiene su superficie verde por más tiempo y su lento proceso de maduración actúa como amortiguador de las diferencias que se pueden producir por las condiciones climáticas (Sierts et al, 1987, Fernández, 1991). En general, tiene un índice de cosecha menor que el de canola (0.35 vs. 0.41), aunque un mayor rendimiento consecuencia de su mayor producción de biomasa (Seepaul et al., 2016). Otra de las ventajas es su resistencia a la mayoría de las enfermedades que afectan comúnmente a otras especies de *Brassica* como la enfermedad de cancro de la colza (*Leptosphaeria camulans-Phoma lingam*), la mancha negra (*Alternaria brassicae*), mildiu (*Peronospora parasítica*) y la podredumbre blanca (*Albugo candida*). A su vez, poseen silicuas no dehiscentes, por lo que sufren considerablemente menor desgrane que otras especies de *Brassica* (Seepaul et al., 2016, Leon et al., 2017).

1.2 ESTABLECIMIENTO Y ARREGLO ESPACIO - TEMPORAL DE LOS CULTIVOS

La distribución espacial de un cultivo es la expresión poblacional del comportamiento a nivel individual. Se le puede definir como el producto de la heterogeneidad ambiental y el crecimiento de la población, actuando sobre procesos aleatorios y dirigidos de crecimiento y mortalidad (Badii et al., 2011). Para el caso de cultivos agrícolas, la uniformidad se refiere «... a la variabilidad de la distancia entre plantas en cultivos sembrados en hileras» (Satorre et al., 2003). El establecimiento de plántulas es una etapa crítica (Bybordi y Tabatabaei, 2009) y lograr una implantación homogénea es, en general, importante para maximizar los rendimientos en muchos cultivos (Rutto et al., 2014). Sin embargo, resulta muy complejo obtener un cultivo perfectamente uniforme (Andrade y Abbate, 2005). La variabilidad espacial y temporal es común, lo que inevitablemente conduce a cultivos heterogéneos (Rutto et

al., 2014), por lo cual resulta interesante comprender el comportamiento de los individuos y su relación con la dinámica de la población (Amaral et al., 2015).

La densidad de plantas por unidad de superficie y su distribución representa una medida de producción básica en la formación del rendimiento (Geisler y Stoy, 1987). Sin embargo, existe escasa información sobre el efecto de la densidad de siembra y el arreglo espacial en el rendimiento y calidad del cultivo de carinata (Pan et al., 2012, Hossain et al., 2018). Existe una gama relativamente amplia de diferentes densidades de plantas que maximiza el uso de los recursos y el rendimiento (Geisler y Stoy, 1987). Debido a su alta capacidad de compensación, el rendimiento máximo de carinata se puede alcanzar en el rango de 34 a 200 plantas m⁻² (Coll, 2010, Pan et al., 2012, Mulvaney et al., 2019). Existe un efecto de la distancia entre hileras: el menor espaciado mejora la distribución de plantas en el área y el rendimiento (Mulvaney et al., 2019). Las hileras estrechas aumentan la interceptación total de luz, hacen un uso más eficiente de esta y permiten una cobertura más rápida del suelo, lo que mejora así el control de malezas (Sincik et al., 2010, Kuai et al., 2015, Mulvaney et al., 2019). Las plantas que crecen en hileras demasiado anchas pueden no utilizar eficientemente los recursos, mientras que el crecimiento en hileras demasiado estrechas puede resultar en una severa competencia entre hileras (Kuai et al., 2015).

El grado de uniformidad espacial está determinado por la distancia entre hileras y la distribución de plantas dentro de las hileras (Griepentrog et al., 2009). La densidad modifica al arreglo en la medida en que la distancia entre hilera no cambia, ya que a medida que se emplean mayores densidades, aumenta la población dentro de cada hilera y se reduce la distancia promedio entre plantas (Griepentrog, 2009). En el caso de canola, las condiciones ambientales desempeñan un papel importante en la expresión de la plasticidad del cultivo (Angadi et al., 2013), ya que repercute en la tasa de crecimiento por planta durante el período crítico (Coll, 2010). Bajo condiciones de cultivo desfavorables, es importante ajustar la densidad y, si es posible, usar densidades relativamente altas. Sin embargo, en condiciones ambientales favorables, se pueden tener en cuenta diferentes densidades con aproximadamente los mismos potenciales de rendimiento debido a la capacidad

considerable de las plantas individuales para compensar (Geisler y Stoy, 1987). Por ejemplo, un buen nivel de precipitaciones promueve una mayor ramificación, que, consecuentemente, se traduce en mayor cantidad de silicuas por planta, lo que reduce la brecha de rendimiento entre las distintas poblaciones (Hossain et al., 2018). Los diferentes arreglos espaciales producidos por los cambios en el espaciamiento de las hileras pueden afectar dichas relaciones y afectar la competencia por recursos tanto en los niveles intraespecíficos como en los interespecíficos (Griepentrog et al., 2009).

Luego que cada individuo germina y se establece, se genera un círculo en expansión que simboliza la zona de explotación de los recursos, donde cada planta obtiene acceso a los recursos necesarios para su crecimiento y desarrollo (Ross y Harper, 1972). El rendimiento por área depende no solo del número de plantas por área, sino también de su distribución espacial (Hühn, 1998, Fischer y Miles, 1973) y el grado de uniformidad espacial está determinado por la distancia entre hileras (ancho de fila) y la distribución de plantas dentro de las hileras (Griepentrog, 2009). La densidad de siembra, el espaciado entre hileras y la calidad de la distribución longitudinal de las semillas al momento de la siembra determinan el espacio disponible para cada planta (Griepentrog, 1999, Hühn, 1987, Hühn, 1998). La optimización del espaciamiento de las plantas minimiza los efectos de competencia y, en sentido inverso, las distribuciones irregulares pueden restringir el rendimiento del cultivo porque: (i) los recursos como los nutrientes y el agua no están disponibles para todas las plantas de manera óptima, (ii) la competencia intraespecífica comienza muy temprano en el desarrollo del cultivo y (iii) la capacidad de suprimir las malezas está limitada por la estructura espacial del cultivo (Griepentrog, 1999, Liu S et al., 2017).

Existe evidencia empírica de que la emergencia y el rendimiento aumentan con la uniformidad creciente de la distribución espacial de las plantas individuales sobre el área (Hühn, 1998, Griepentrog, 1999). En particular, se asume que el rendimiento por planta es directamente proporcional al área de su dominio (Fischer y Miles, 1973, Hühn, 1998) y el crecimiento de un individuo puede verse reducido en la medida en que sus recursos disponibles deben ser compartidos con aquellos

individuos localizados en su entorno inmediato (Bonan, 2011). Este tipo de análisis espaciales son bidimensionales y no consideran la altura relativa del cultivo, donde se supone que todas las plantas utilizan los recursos de la misma manera y tienen los mismos tamaños iniciales y tasas de crecimiento (Kristensen et al., 2006). Sin embargo, a medida que van creciendo las plantas y avanza el ciclo del cultivo, existen pequeñas diferencias en el tamaño de las plantas durante el desarrollo temprano, que generalmente se amplifican y se intensifica la competencia por los recursos (Andrade y Abbate, 2005). En este sentido, la emergencia y el establecimiento de plantas son indicadores clave en el desarrollo temprano de un cultivo, siendo variables comúnmente evaluadas en investigaciones enfocadas en el mejoramiento genético de los cultivos (Sankaran et al., 2017).

El momento de emergencia es importante para determinar el rendimiento de las plantas porque los individuos que emergen primero tienden a capturar una parte importante de los recursos (Watkinson et al., 1983). La uniformidad de la distribución de las plantas en el momento de la emergencia puede tener un impacto significativo en la competencia entre plantas y también con las malezas (Liu S et al., 2017). Las primeras plantas establecidas sombrean al resto, lo que reduce la penetración de luz (Nafziger et al., 1991), tienen sistemas de raíces más establecidos y poseen una elevada eficacia para absorber agua y nutrientes. Este tipo de competencia que se da en las primeras etapas de vida de las plantas permite a cada una de ellas detectar la presencia de vecinos y responder a ellos, por ejemplo, cambiando el patrón de asignación de materia seca (Andrade y Abbate, 2005).

Las diferencias de tamaño que existen antes del inicio de la competencia directa tienen influencia en las interacciones competitivas posteriores (Kristensen et al., 2006). La supervivencia de un individuo depende, en gran medida, de su posición (Ross y Harper, 1972), donde la divergencia en las tasas de crecimiento entre los individuos emergidos temprano y tardíamente sugiere que los primeros aumentan continuamente su capacidad para capturar recursos a expensas de los segundos y, al hacerlo, aumentan su zona física de influencia, lo que eventualmente conduce a eventos de auto-raleo (Ross y Harper, 1972). El potencial de un individuo para capturar recursos está en parte dictado por el número y la proximidad de los vecinos

que ya están capturando recursos (Ross y Harper, 1972). Por lo que, aquellas plantas con vecinos cercanos (que ocupan áreas más pequeñas) tienen más probabilidades de morir y sus áreas de quedar disponibles para los sobrevivientes (Mithen et al., 1984).

A medida que crecen las plantas y aumenta la competencia, se desarrolla una jerarquía de tamaños dentro de la población y uno de los factores que determinan el tamaño y la posición de un individuo es la proximidad de sus vecinos (Mithen et al., 1984). Dicha jerarquía tiene lugar desde etapas muy tempranas e influye severamente en el desarrollo futuro de cada individuo, donde la densidad de plantas ya emergidas es un factor clave que influye en la tasa de crecimiento de cada planta (Ross y Harper, 1972). En casos donde la competencia se agudiza (sobrepoblaciones o hileras demasiado anchas), el desarrollo de las plantas se ve afectado y por más que luego una proporción de estas mueren, no logran mantener el rendimiento. El efecto se traduce principalmente en menores ramificaciones laterales, fertilidad reducida y menor número de silicuas por planta (Mulvaney et al., 2019).

Existe una pérdida de plantas desde el comienzo hasta la madurez (Hühn 1987). Las plántulas emergidas no necesariamente sobreviven hasta el final de la temporada, por lo que las densidades iniciales no son representativas de la población efectiva en la cosecha (White y Harper, 1970, Mulvaney et al., 2019). Las pérdidas son mayores cuando la densidad de las plantas y/o los espacios entre hileras se incrementan, lo que indica que la competencia entre las plantas se volvió más efectiva (Sierts et al., 1987). La causa del fenómeno de auto-raleo no está clara, pero parecería que si se considera a la población como una jerarquía de explotación de recursos, que resulta en tasas de crecimiento diferenciales entre sus miembros y a medida que mueren los individuos más pequeños, las diferencias en las tasas de crecimiento exageran las diferencias de tamaño entre los sobrevivientes (White y Harper, 1970). Parte de la reducción en el crecimiento de los sobrevivientes debido a la interferencia en una etapa anterior tiene un efecto que persiste después de la muerte de esos vecinos (Andrade y Abbate, 2005) y la planta retrasada es incapaz de competir y las pequeñas diferencias en el tamaño durante el desarrollo temprano de las plantas se amplifican a medida que avanza el ciclo y se intensifica la competencia por los recursos (Nafziger et al., 1991, Andrade y Abbate, 2005, Rutto et al., 2014).

Para la mayoría de los cultivos con distancias pequeñas entre plantas en la hilera, como puede ser trigo, cebada o canola, las semillas se distribuyen de manera desigual a lo largo de la hilera (Liu T et al., 2017). Carinata se caracteriza por un tamaño de semilla pequeño (dentro del género *Brassicas* presenta el mayor tamaño) (3-4 mg), lo que puede reducir drásticamente las posibilidades de un establecimiento exitoso (Zanetti et al., 2013, Moller y Meikle, 2018). Las tasas de siembra más bajas son un desafío con la mayoría de los equipos de siembra utilizados en la producción comercial (Mulvaney et al., 2019), ya que comúnmente no se emplean sembradoras de precisión (diseño subóptimo de la rueda dosificadora), lo que determina una mayor variabilidad del espacio entre plantas, siendo común observar faltantes de plantas (Griepentrog et al., 2009). La variación en la profundidad de siembra y el vigor de las semillas son otros factores importantes (Andrade y Abbate, 2005, Rutto et al., 2014).

El establecimiento del cultivo también depende considerablemente de las estructuras bioquímicas y fisiológicas de las semillas. Un establecimiento rápido y bueno de las plántulas necesita de una semilla de alto vigor para proporcionar nutrientes esenciales hasta que se establezca y pueda fotosintetizar de forma independiente (Bybordi y Tabatabaei, 2009). Sin embargo y afortunadamente, en general esta especie se caracteriza por un alto índice de germinación, por lo que el establecimiento no suele ser afectado por este factor (Zanetti et al., 2013).

Existen otros factores que pueden causar una emergencia desigual. La temperatura del suelo como resultado de la siembra directa y presencia de rastrojo en superficie afecta la germinación y la velocidad de elongación del coleóptilo (Rutto et al., 2014). El residuo influye en la temperatura del suelo de tres maneras: actúa como una capa aislante sobre la superficie del suelo, refleja más radiación solar que el suelo desnudo y reduce la tasa de evaporación, lo que provoca que el suelo se caliente más lentamente (Morris et al., 2009). Existen muchos beneficios de esta práctica, incluida la reducción de la erosión del suelo (García Préchac, 2004). Sin embargo, los residuos de cultivos a menudo se asocian no solo con obstrucciones, sino que también los residuos en superficie ocasionan un pobre contacto suelo-semilla (Andrade y Abbate, 2005, Morris et al., 2009), lo cual es crucial para

transferir la humedad necesaria a la semilla (Morris et al., 2009), por lo que el manejo de residuos puede ser la mayor preocupación en sistemas de siembra directa como los locales.

1.3 MÉTODOS DE ESTUDIO DEL ARREGLO ESPACIAL Y TEMPORAL

Existen diversas opciones metodológicas para estudiar el arreglo espacial de los cultivos. El área explotada por planta puede ser representada por un conjunto de zonas de influencia, que puede estar unida a una medida cuantitativa, su espacio. La idea básica es la suposición de que el rendimiento de una planta individual puede considerarse como una función del espacio por planta (Hühn, 1998). Estos espacios individuales pueden determinarse cuantitativamente, por ejemplo, mediante la construcción de los polígonos de Thiessen (Hühn, 1999). Los polígonos de Thiessen pueden ser una forma útil de describir el arreglo espacial en este tipo de cultivos (Mithen et al., 1984). Para una colección dada de puntos (plantas) en un plano, los polígonos delimitan todos los puntos que están más cerca de cada una de las plantas. Luego se realiza una triangulación que se basa en las bisectrices perpendiculares de las líneas rectas que conectan cada planta con el total de las vecinas, conformando así los polígonos (Mithen et al., 1984, Kristensen et al., 2006). Estos son mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos del área total (Hühn, 1998). El área del polígono se calcula a partir de las coordenadas de los vértices del polígono. Esta área de polígono es el área potencialmente disponible para el crecimiento de cada planta (Hühn, 1999).

Se espera que exista un impacto del tamaño y distribución de los polígonos en el desarrollo y rendimiento de cada planta (Griepentrog, 1999). Es una experiencia empírica comúnmente observada que el rendimiento aumenta al incrementar la uniformidad de la distribución espacial de las plantas individuales sobre el área (Mulle y Heege citados por Hühn, 1999). Aquellos polígonos más grandes, con un área por planta mayor y más recursos disponibles deberían rendir más (Griepentrog, 1999). Las propiedades de interés potencial para el análisis espacial de las poblaciones de plantas incluyen (i) el área del polígono y su variación, (ii) la forma general del polígono (de relativamente redondo a muy alargado) y (iii)

la excentricidad (la ubicación de la planta dentro del polígono, relativo al centro) (Griepentrog, 1999, Hühn, 1998, Mead, 1966). La suposición implícita es que un espaciado más uniforme dentro de la hilera dará como resultado un patrón espacial bidimensional más uniforme (Kristensen et al., 2006). De esta manera se obtiene el resultado obvio: con el aumento de la variabilidad de las distancias de las plantas dentro de las hileras, la variabilidad de las áreas individuales resultantes de los polígonos de Thiessen correspondientes también aumenta (Hühn, 1999).

Existen ciertas desventajas del enfoque poligonal. Para construir el polígono de cierta planta, es necesario conocer todos sus vecinos próximos. Las plantas fronterizas muestran configuraciones de vecindario incompletas; por lo tanto, todas las plantas en los bordes deben ser eliminadas de los análisis (Hühn, 1998). En segundo lugar, si bien los polígonos son una forma intuitiva y simple de describir patrones poblacionales, su análisis no es sencillo. El análisis de polígonos no nos proporciona una medida única conveniente de uniformidad/agregación de la población. La no uniformidad puede manifestarse de varias maneras, como la variación en el área de los polígonos, la media y la variación en la forma de los polígonos, o la media y la variación en la excentricidad, sin saber cuál es más útil, ni de ninguna medida que combine varios de estos aspectos (Kristensen et al., 2006).

Otra forma de evaluar el arreglo espacial es el estudio de patrones espaciales utilizando índices de agregación o dispersión (Amaral et al., 2015). El índice de Morisita clásico (ec. 1) mide cuántas veces es más probable que se seleccionen aleatoriamente dos puntos muestreados en el mismo cuadrante (Golay et al., 2014). Proporciona una descripción cuantitativa simple del patrón de ordenación espacial (Kristensen et al., 2006), donde varía de 0 (completamente uniforme) a 1 (aleatorio) a Q (la disposición más agrupada cuando todas las plantas se producen en un cuadrante y el índice es igual al número de cuadrantes) (Kristensen et al., 2006).

$$I = Q \frac{\sum_{i=1}^Q n_i (n_i - 1)}{N(N-1)} \quad [1]$$

Donde:

I : índice de Morisita

Q = número de cuadrantes en el área de muestreo

n_i = número de plantas en el cuadrante i

N = número total de plantas en el área de muestreo

La distribución de una población determinada puede ser, (I) aleatoria, (II) regular o uniforme, (III) agregada o agrupada. Se puede imaginar como un universo bidimensional cuya superficie está compuesta de muchos puntos, donde la distribución de estos puede ser: aleatoria (I) cuando a) cada individuo tiene la misma probabilidad de ocupar cualquier punto o unidad muestral (UM), b) cada UM tiene la misma probabilidad de contener cualquier individuo y c) la presencia de un individuo en una UM es independiente de otros individuos; regular (II): al encontrar un individuo en un punto (UM) se reduce la probabilidad de encontrar otro individuo en el mismo, o agrupada (III): al encontrar un individuo en un punto (UM) incrementa la probabilidad de encontrar otro individuo en el mismo UM.

A pesar de su utilidad, este índice tiene varias limitaciones. Está influenciado por la cantidad de cuadrantes y para el uso adecuado, el número de cuadrantes debe ser igual en todas las áreas a comparar. Además, sufre las influencias del tamaño y distribución de las unidades de muestra; por ejemplo, una población puede presentar una distribución agregada en una escala y una distribución aleatoria o uniforme en otra escala (Amaral et al., 2015). Es una medida de población basada en unidades de muestreo que son independientes de los puntos individuales, por lo que no es posible evaluar el patrón a nivel de planta individual, como en el análisis de polígonos (Kristensen et al., 2006). No obstante, está poco influenciado por el tamaño de las parcelas, es independiente de la densidad de población, el efecto borde no es un problema y tiene la ventaja de la simplicidad como una medida única de uniformidad/agregación; por lo tanto, es un excelente indicador del grado de dispersión (Kristensen et al., 2006, Amaral et al., 2015).

Por otra parte, existe menor cantidad de trabajos que estudien el patrón de distribución espacial y temporal de las plantas en las hileras, lo que se explica, en parte, por la falta de un dispositivo dedicado a medir con precisión el momento y la posición de cada planta (Liu T et al., 2017). Tradicionalmente, el método utilizado para evaluar las emergencias es el recuento y marcado de plantas en el campo (Liu T

et al., 2017, Zhao et al., 2018), pero dicha labor es tediosa, costosa de tiempo y sujeta a errores humanos. Además, las condiciones del suelo pueden limitar los intervalos de tiempo en los cuales es posible caminar por el campo sin dañar el cultivo (Jin et al., 2016, Sankaran et al., 2017). Por lo que es necesario desarrollar métodos alternativos para proporcionar una cuantificación oportuna y precisa de la población de plantas (Jin et al., 2016).

Una técnica de detección de alto rendimiento puede mejorar la eficiencia en la evaluación de emergencias (Sankaran et al., 2017). En los últimos años, la disponibilidad de diferentes tipos de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y cámaras multiespectrales simples han estimulado varias aplicaciones nuevas en la agricultura (Sankaran et al., 2017). El procesamiento digital de imágenes (PDI) puede definirse como el conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la búsqueda de información (Puente, 2015). La visualización de imágenes de detección remota y la obtención de algoritmos de procesamiento ofrece una tecnología alternativa, no invasiva y efectiva para evaluar la emergencia temprana de las plantas y obtener rasgos de crecimiento, como la cobertura, densidad y altura de estas (Sankaran et al., 2017, Zhao et al., 2018). Debido a la forma relativamente fácil y automática de recolectar y procesar las imágenes, la estimación de la densidad de plantas podría aplicarse sobre grandes extensiones o grandes experimentos de fenotipado con una cantidad importante de microparcels (Jin et al., 2016, Sankaran et al., 2017).

Los índices de color se emplean para la separación de cultivos (Zhao et al., 2018). En la segmentación por umbralización se desea resaltar regiones con características similares, mediante la clasificación de píxeles o grupos de píxeles, con el objetivo de separar adecuadamente el fondo y el objeto a separar (Puente, 2015). El correcto manejo del barbecho, sin restos vegetales y sin malezas, posibilita la utilización del método de umbralización de Otsu, el cual permite la identificación y segmentación de las plantas del resto del fondo (Zhao et al., 2018). En primer lugar, se obtiene la imagen en escala de grises (Rodríguez Herranz, 2016). Luego, para el correcto procesamiento de las imágenes, es crucial seleccionar un umbral adecuado para extraer los objetos de su fondo (Otsu, 1979). Este método calcula el valor

umbral de forma que la dispersión (distancia entre los valores de intensidad respecto a un valor medio) dentro de cada clase sea lo más pequeña posible, pero que, al mismo tiempo, la dispersión entre diferentes clases sea lo más alta posible. Para ello, se calcula el cociente entre ambas varianzas y se busca un valor umbral tal que este cociente sea máximo (Puente, 2015). La segmentación se logra agrupando, por un lado, todos los píxeles cuyo valor de intensidad es menor que el umbral y, por otro, los píxeles con valores de intensidad mayor que el umbral (Puente, 2015). De esta manera se obtiene una imagen en la que, en los píxeles, el 0 se corresponde a las plantas y el 1 corresponde al fondo (Rodríguez Herranz, 2016).

La dinámica del método hace que el proceso de umbralización sea muy rápido computacionalmente, pues se trata, simplemente, de recorrer secuencialmente todos los píxeles de la imagen y seleccionar aquellos que son mayores en intensidad (o menores) que un umbral de intensidad prefijado. El punto clave y más difícil en esta técnica sea, quizás, la elección del valor umbral apropiado (Puente, 2015). Una de las desventajas del método es que a medida que el número de clases en la imagen aumenta, se requerirá más tiempo para escoger los umbrales adecuados (Puente, 2015). Existen otras limitaciones de la técnica de teledetección para evaluar la emergencia y el establecimiento de las plantas. En las últimas etapas del establecimiento, cuando las plantas comienzan a superponerse, la resolución disminuye, por lo que es necesario tener en cuenta el estado fenológico a partir del cual se superponen (Jin et al., 2016, Liu T et al., 2017, Sankaran et al., 2017). Al mismo tiempo, el impacto de la luz solar es inevitable, por lo que las imágenes deben ser tomadas en condiciones de clima claro, soleados y con escasa influencia del viento para minimizar el impacto en la calidad (Jin et al., 2016, Zhao et al., 2018). Se deben tomar desde el centro, ya que las vistas demasiado inclinadas pueden resultar en una gran superposición de plantas de hileras adyacentes, lo que planteará problemas para la identificación de hileras y plantas (Liu T et al 2017).

1.4 OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y RESULTADOS ESPERADOS

El objetivo general del trabajo fue evaluar el efecto del arreglo espacial y la dinámica temporal de plantas de un cultivo de *Brassica carinata* en el crecimiento y rendimiento del cultivo. El trabajo aporta información sobre algunos aspectos menos estudiados de la relación población/rendimiento en un cultivo de reciente introducción a los sistemas agrícolas de la región y el mundo. Los objetivos específicos de este trabajo fueron: i) conocer el efecto de la población objetivo y la distancia entre hileras en la uniformidad de plantas en la hilera; ii) conocer la dinámica de emergencias y muertes de plantas en función de cambios en la población objetivo y la distancia entre hileras; iii) evaluar la respuesta en rendimiento de un cultivo de carinata a cambios en la población a cosecha, la distancia entre hileras y los niveles de uniformidad de distribución de plantas en la línea y iv) desarrollar una metodología para el estudio de la dinámica temporal de emergencias y muerte de plantas del cultivo que sea aplicable a otro tipo de ensayos y/o cultivos utilizando fotografías de alta calidad. Las hipótesis de trabajo fueron: i) la densidad objetivo y el espaciamiento determinan el arreglo espacial final del cultivo, donde menores poblaciones objetivo y mayor distancia entre hileras se traducen en un arreglo menos uniforme; ii) poblaciones densas y distancias entre hileras mayores aumentan la mortalidad de plantas y disminuyen la uniformidad de emergencia del cultivo iii) el rendimiento en grano del cultivo de carinata no se verá afectado por la población a cosecha dentro de un amplio rango de poblaciones, pero se verá afectado por la distancia entre hileras (a mayor distancia, menor rendimiento) y por distribuciones no uniformes de la población a cosecha y iv) el rendimiento del cultivo se verá afectado por la variabilidad de emergencias. Parcelas con emergencias más uniformes aumentan el rendimiento del cultivo. Para poder cumplir con los objetivos se realizó un ensayo a campo, con arreglos espaciales contrastantes, y se evaluó el rendimiento por planta y por unidad de superficie.

2. LA POBLACIÓN Y EL ARREGLO ESPACIAL DE LAS PLANTAS EN LA HILERA A COSECHA NO AFECTA EL RENDIMIENTO EN GRANO DE *BRASSICA CARINATA*

2.1 RESUMEN

La expansión e interés en el desarrollo del cultivo de *Brassica carinata* se ha incrementado a nivel global, explicado por la creciente demanda por biocombustibles y las características favorables del cultivo con relación a *Brassica napus* L. (Colza). En Uruguay, el cultivo está presente a nivel comercial desde el año 2016 y ha venido aumentando su área (8.000 ha en el año 2019), lo cual ha potenciado la investigación y el desarrollo del cultivo. Existe un amplio rango de poblaciones que maximizan el rendimiento, pero se ha observado respuesta positiva a espaciamientos menores. No obstante, no existen trabajos que estudien aspectos asociados a la uniformidad espacial y temporal del cultivo sobre la dinámica de la población de plantas y el rendimiento en grano. El objetivo de este trabajo fue: i) evaluar el impacto de las distintas combinaciones de densidad objetivo de plantas y espaciamiento entre filas sobre el arreglo espacial de plantas y 2) conocer el impacto de cambios en la densidad objetivo de plantas, el espaciamiento entre hileras y la uniformidad espacial sobre la dinámica poblacional y el rendimiento en grano. Para ello, se llevó a cabo un ensayo parcelario, en bloques, con tratamientos al azar con tres repeticiones, en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni, ubicada en el departamento de Paysandú, Uruguay (31°22'S 58°02'O). Se utilizó la única variedad comercial disponible en ese momento, Avanza 641. Se sembraron en 4 poblaciones objetivo (30, 50, 70 y 90 pl m⁻²) y dos espaciamientos entre hileras (0,17-0,34 m). La población resultante en cada parcela fue el resultado natural de la interacción entre las semillas sembradas, el proceso de siembra, la condición del suelo y el ambiente. La población se incrementó desde los 20 días postsiembra hasta los 30 días, donde ocurrió el pico poblacional, para luego decaer a cosecha. El rendimiento medio fue de 516 +/- 24 g m⁻² y no estuvo afectado de manera significativa por la población a cosecha, el espaciamiento entre hileras y la interacción. No se detectó un efecto significativo de los tratamientos en el arreglo adquirido por el cultivo. Dicho arreglo, evaluado a través del coeficiente de variación del área de los polígonos, su excentricidad, índice de

Morisita, rectangularidad y distancia entre plantas, no se relacionó con el rendimiento. El arreglo espacial del cultivo al momento de la cosecha no parece ser una variable determinante del rendimiento. No obstante, resultaría necesario, en el futuro, relacionar la dinámica de las emergencias con el arreglo espacial final y el rendimiento en grano de cada planta y por unidad de superficie.

2.2 INTRODUCCIÓN

La «mostaza de Etiopía» o carinata (*Brassica carinata*) es nativa de las tierras altas de Etiopía, donde se la cultiva en pequeña escala como hortaliza y como oleaginosa (Fernández, 1991). Recientemente, ha empezado a sembrarse en varias partes del mundo para la producción de aceite (Mulvaney et al., 2019). Tiene rasgos agronómicos y fisiológicos superiores a *B. napus* L. (Colza) (Cardone et al., 2003), que incluyen tolerancia a la sequía y a altas temperaturas y resistencia a ciertas enfermedades como *Alternaria* spp. (Hossain et al., 2018). Posee un desarrollo rápido y exuberante en estado de roseta y ciclos a floración y maduración más largos, lo que determina una mayor producción de silicuas por unidad de superficie (Falasca y Ulberich, 2010). Si bien tiene un contenido elevado de aceite en grano (Alemaw, 2003), este no es apto para consumo humano (Pan et al., 2012) y su subproducto se emplea como harina proteica para alimentación animal (Zanetti et al., 2009). Consecuencia de una alta concentración de ácidos grasos de cadena larga, principalmente ácido erúico y porcentajes menores y variables de ácido oleico, ácido linoleico y ácido linolénico, posibilita la producción de biocombustibles de alta energía, por ejemplo combustible para aviones, con menos energía requerida durante el proceso de refinamiento (Falasca y Ulberich, 2010, Seepaul et al., 2016, Mulvaney et al., 2019).

A diferencia del cultivo de colza, existe limitada información agronómica del cultivo, ya que la producción comercial es reciente (Agrisoma Biosciences Inc., 2017). Dentro de las prácticas de manejo relevantes y para la cual existe muy poca información, está la optimización de la población y el espaciamiento entre hileras, aspectos fundamentales para maximizar el rendimiento en grano (Kuai et al., 2015, Mulvaney et al., 2019). La distribución espacial es importante para el rendimiento en

grano, así como para definir las interacciones entre cultivo y malezas (Hühn, 1998, Kristensen et al., 2006). Para cultivos agrícolas, el concepto de uniformidad refiere a la variabilidad de la distancia entre plantas en cultivos sembrados en hileras (Satorre et al., 2003). El grado de uniformidad espacial está determinado por la distancia entre hileras y la distribución de plantas dentro de las hileras (Griepentrog et al., 2009) y representa la medida de producción técnica básica, que interviene en los procesos de formación del rendimiento (Geisler y Stoy 1987).

Existe evidencia empírica de que el rendimiento aumenta con la uniformidad creciente de la distribución espacial de las plantas individuales sobre el área (Hühn, 1998). El crecimiento de un individuo se reduce en la medida en que sus recursos disponibles deben ser compartidos con los vecinos (Bonan, 2011). El área explotada por planta puede ser representada por un conjunto de zonas de influencia que puede estar unida a una medida cuantitativa, su espacio (Hühn, 1998). Estos espacios individuales pueden determinarse cuantitativamente, por ejemplo, mediante la construcción de los polígonos de Thiessen (Hühn, 1999). Esta área de polígono es el área potencialmente disponible para el crecimiento de la planta y divide los recursos y superficie disponibles para cada planta individual (Hühn, 1998). Para caracterizar un polígono, se definen tres parámetros: su tamaño, su forma y la posición de la planta dentro del polígono, lo que se denomina excentricidad (Mead, 1966, Griepentrog et al., 2009).

Otra forma de evaluar la distribución de plantas en una superficie es a través de la estimación del índice de dispersión de Morisita. Este índice ha sido utilizado ampliamente para evaluar el grado de dispersión/agregación de patrones de puntos espaciales (plantas, insectos, árboles) en unidades de muestreo (Kristensen et al., 2006). Se basa en recuentos de cuadrantes y está estrechamente relacionado con las medidas más simples y antiguas del patrón espacial, la relación varianza-media (Griepentrog et al., 2009). La escala puede variar, por lo que algunos patrones espaciales pueden ser uniformes en una escala, pero agrupados o aleatorios en otras (Kristensen et al., 2006, Amaral et al., 2015). Hay tres categorías generales de patrones bidimensionales: (a) uniforme (hiperdisperso), (b) aleatorio y (c) agrupado (agregado). Este varía de 0 (completamente uniforme) a 1 (aleatorio) y pudiendo ser

mayor a 1, hasta un valor máximo donde todas las plantas se encuentran en un solo cuadrante, y el valor del índice es igual al número de cuadrantes posibles (Kristensen et al., 2006, Amaral et al., 2015). Otra de las variables para medir la distribución espacial de plantas es la rectangularidad, que se define como la relación entre la distancia de hileras y la distancia entre plantas dentro de ella (Mattera, 2004). Un valor de rectangularidad igual a uno indica un arreglo espacial cuadrado, donde la distancia entre hileras es igual a la distancia entre plantas de la misma hilera. A medida que el índice se aleja de la unidad, el arreglo espacial se hace más rectangular (Mattera et al., 2009).

El cultivo de carinata exhibe una fuerte respuesta a la disponibilidad de luz y tiene plasticidad fenotípica para modular su arquitectura de planta de manera de optimizar la intercepción de radiación (Mulvaney et al., 2019). El rendimiento máximo de grano puede ser alcanzado con un amplio rango de poblaciones (34 a 114 plantas m⁻²) (Pan et al., 2012). No obstante, existe un límite en el aumento de la densidad de siembra, debido a la competencia que puede ocurrir dentro del cultivo (Mulvaney et al., 2019). En colza se ha encontrado que la plasticidad de una planta para compensar las poblaciones subóptimas depende de la disponibilidad de recursos como luz, agua y nutrientes: es decir, cuanto mayor sea la disponibilidad de recursos, mayor será la expresión de la plasticidad (Angadi et al., 2013). A su vez, los diferentes arreglos espaciales producidos por los cambios en el espaciamiento de las hileras pueden afectar las relaciones de competencia de recursos tanto en los niveles intraespecíficos como en los interespecíficos (Griepentrog et al., 2009). Las plantas que crecen en hileras demasiado anchas pueden no utilizar eficientemente los recursos naturales como la luz, el agua y los nutrientes, mientras que el crecimiento en hileras demasiado estrechas puede resultar en una severa competencia entre hileras (Kuai et al., 2015). Las hileras estrechas aumentan la intercepción total de luz, hacen un uso más eficiente de esta y permiten una cobertura más rápida del suelo, lo que mejora el control de malezas (Sincik et al., 2010, Kuai et al., 2015, Mulvaney et al., 2019).

Además de la población de plantas y la distancia entre filas, la uniformidad temporal de las plantas se reconoce como rasgo clave para caracterizar la etapa de

emergencia (Liu S et al., 2017). A menudo, ocurren faltantes e imperfecciones en las siembras, que llevan a una emergencia despareja y a una ocupación de las hileras menor a la esperada (Griepentrog, 1999). La emergencia y el establecimiento de plantas son indicadores clave en el desarrollo temprano de un cultivo, siendo variables comúnmente evaluadas en los programas de mejoramiento genético (Sankaran et al., 2017), por lo que es importante producir cultivos uniformes y, en consecuencia, los factores que causan esta variación dentro de la población son de considerable interés (Mead, 1966). La condición ideal bajo la cual el rendimiento es maximizado es aquella donde todas las plantas rinden lo mismo debido a la falta de interferencia entre ellas, con un reparto equitativo de los recursos disponibles (Hühn, 2000), lo que implica el mismo espacio, pero también el mismo momento de emergencia.

Este trabajo aporta información sobre uno de los aspectos menos estudiados de la relación población/rendimiento en un cultivo de reciente introducción a los sistemas agrícolas de la región y el mundo. Los objetivos de este trabajo fueron: i) conocer cómo la población objetivo y la distancia entre hileras afecta la uniformidad de plantas logradas en la hilera, ii) cuantificar el efecto de cambios en la población objetivo y la distancia entre hileras sobre la dinámica de emergencias y muerte de plantas en un cultivo de carinata y iii) evaluar la respuesta en rendimiento de un cultivo de carinata a cambios en la población a cosecha, la distancia entre hileras y los niveles de uniformidad de distribución de plantas en la línea. Las hipótesis de trabajo fueron: i) una densidad objetivo baja y una mayor distancia entre hileras generan un arreglo espacial menos uniforme; ii) poblaciones densas y distancias entre hileras mayores aumentan la mortalidad de plantas y disminuyen la uniformidad de emergencia del cultivo y iii) el rendimiento del cultivo de carinata no se verá afectado por la población a cosecha dentro de un amplio rango de poblaciones, pero se verá afectado por la distancia entre hileras (a mayor distancia, menor rendimiento) y por distribuciones no uniformes de la población a cosecha.

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1 Ubicación, tratamientos y manejo del experimento

El experimento se llevó a cabo durante la zafra 2018, en la Estación Experimental Mario A Cassinoni (EEMAC), ubicada en el noroeste de Uruguay, 10 km al sur de la ciudad de Paysandú ($31^{\circ} 21'S$ y $58^{\circ} 02'W$; 61 m sobre el nivel del mar) (Figura 1). El suelo corresponde a un argiudol típico y los datos climáticos fueron obtenidos de una estación automática (Vantage Pro - 6510 - Davis Instrument Hayward) ubicada en el sitio experimental. El ensayo fue sembrado el 20 de junio con una sembradora experimental de siembra directa (Semeato SHP 249), con un diseño de 3 bloques completos al azar, con 8 tratamientos, constituidos por 4 poblaciones objetivo (30, 50, 70 y 90 pl m^{-2}) y dos distancias entre hileras (0,17 y 0,34 m), todos sembrados con el único cultivar disponible a nivel local, Avanza 641. Las parcelas tenían un tamaño de 7 m x 9 surcos cuando la distancia era 0,17 m y 7 m x 5 surcos cuando la distancia era 0,34 m.

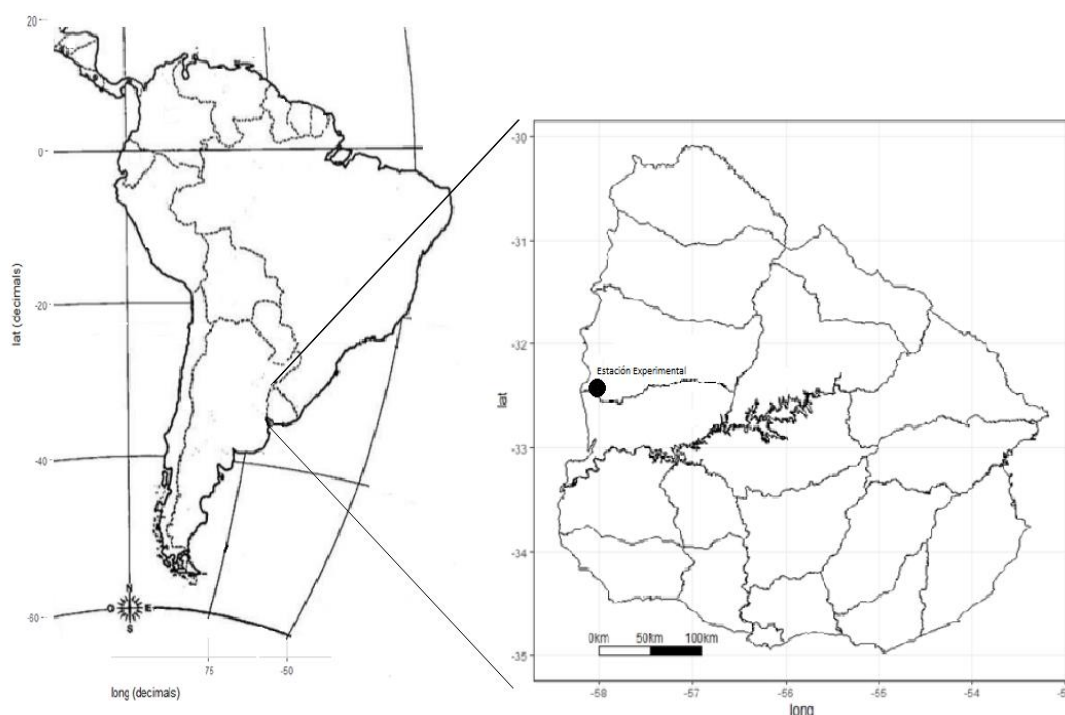


Figura 1. Mapa de Uruguay en su ubicación continental. En el marco con *zoom*: ubicación del sitio experimental.

El sitio experimental durante el verano previo tuvo un cultivo de moha (*Setaria itálica*) del cual se realizaron fardos, por lo que la cobertura de rastrojo al momento de la siembra fue muy baja (Figura 2a, 2b). El cultivo se manejó de forma que los nutrientes no limitaran el rendimiento, para lo cual se agregaron 80 kg P_2O_5 ha^{-1} y 80 kg K_2O ha^{-1} al momento de la siembra y 140 kg N ha^{-1} y 18 kg S ha^{-1} fraccionado 60 % al estadio de 2 hojas (B2) (Figura 2c) y el restante 40 % a inicio de elongación (C1) (Figura 2d). Las malezas fueron controladas aplicando previo a la siembra en dos oportunidades (30 y 1 día previo a la siembra) 3 kg ha^{-1} de i.a ha^{-1} de glifosato y luego de la emergencia del cultivo fueron manualmente controladas. No existieron problemas de plagas ni de enfermedades, por lo cual no fue necesario intervenir en el cultivo con insecticidas y/o fungicidas.

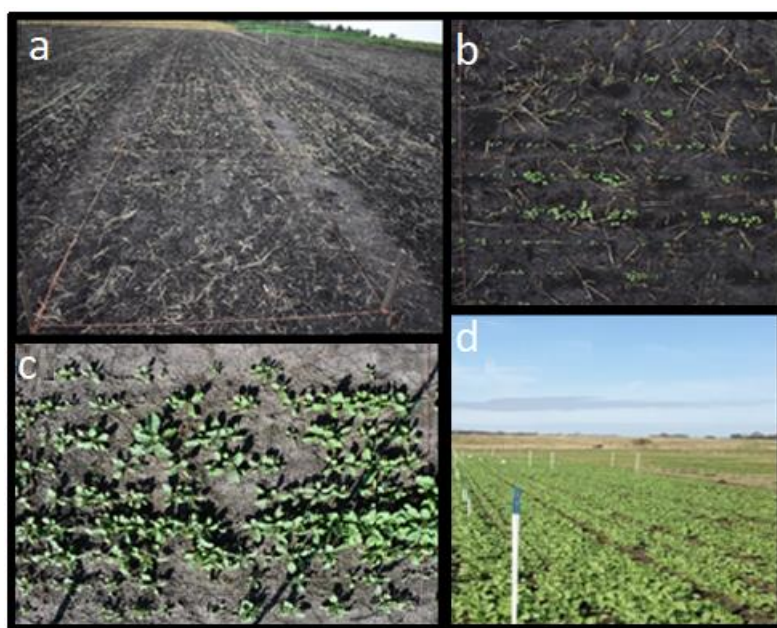


Figura 2. Vista de los ensayos: a) parcela en el momento de implantación; b) estado de plántula; c) estado de roseta (B1-B2); d) inicio de elongación (C1).

2.3.2 Población y dinámica poblacional

Para lograr las poblaciones propuestas (30, 50, 70 y 90 pl m^{-2}), se estimó previo a la siembra un porcentaje de implantación del 45 % y era conocido el porcentaje de germinación del lote de semilla utilizado (95 %). De esta manera se sembraron 68, 114, 159 y 204 semillas m^{-2} , que corresponden a 2,7, 4,6, 6,4 y 8,2 kg ha^{-1} (peso grano = 4 mg). Previo a la siembra, se delimitó el área de trabajo con

estacas y piolas (Figura 3a), abarcando el total de las hileras y 4 metros del largo de la parcela. Sobre dicha área se contabilizaron las plantas presentes en diferentes momentos a partir de imágenes fotográficas (ver sección 2.3.2.1 y 2.3.2.2). Tiempo 0 (T0) hace referencia a las semillas sembradas, las plantas emergidas a los 20 días de la siembra se denominaron T20 y lo mismo para 22 y 30 días post siembra. En T30 fue considerado el momento de implantación del cultivo. Para la cosecha (T149), se contaron las plantas directamente a campo, previo a la cosecha. Esto permitió evaluar la población en diferentes momentos (semillas sembradas, plantas previas a implantación, plantas implantadas y plantas cosechadas) y cuantificar la dinámica de la población. Con esta información fue posible estimar la proporción de plantas logradas en cada momento, con relación a las semillas sembradas.

Al alcanzar la madurez, las plantas presentes en 2 de los surcos centrales fueron cosechadas individualmente. También se contabilizó para cada planta el número de silicuas. Una vez cosechada cada parcela y contadas las silicuas, se secaron las muestras en estufa a 60 °C hasta peso constante. La trilla se realizó manualmente, inmediatamente luego de sacar las muestras de la estufa y se llevó a cabo una limpieza de residuos de cosecha de los granos previo a la obtención del peso de grano de cada planta. Sumando el peso individual de cada planta fue estimado el rendimiento por unidad de superficie.

2.3.2.1. Dinámica poblacional

Para contabilizar las plantas en las distintas etapas, se tomaron imágenes de la zona delimitada (Figura 3a). Para su obtención, fue necesario diseñar un soporte (Figura 3b) sobre el cual se colocó una cámara fotográfica. Dicho soporte posee una altura de 2 metros, altura con la cual se obtuvo el foco correcto de la zona delimitada y la calidad de la imagen adecuada. Las imágenes se dividieron en dos subregiones de 2 metros cada una, por lo que fue necesario tomar 2 imágenes por parcela (Figura 3c). El diseño del soporte con un «brazo» permitió tomar las imágenes desde el centro de la parcela, lo cual resulta relevante, ya que las vistas demasiado inclinadas pueden resultar en superposición de plantas de hileras adyacentes y plantear problemas para la identificación tanto de hileras como de plantas (Liu S et al., 2017).

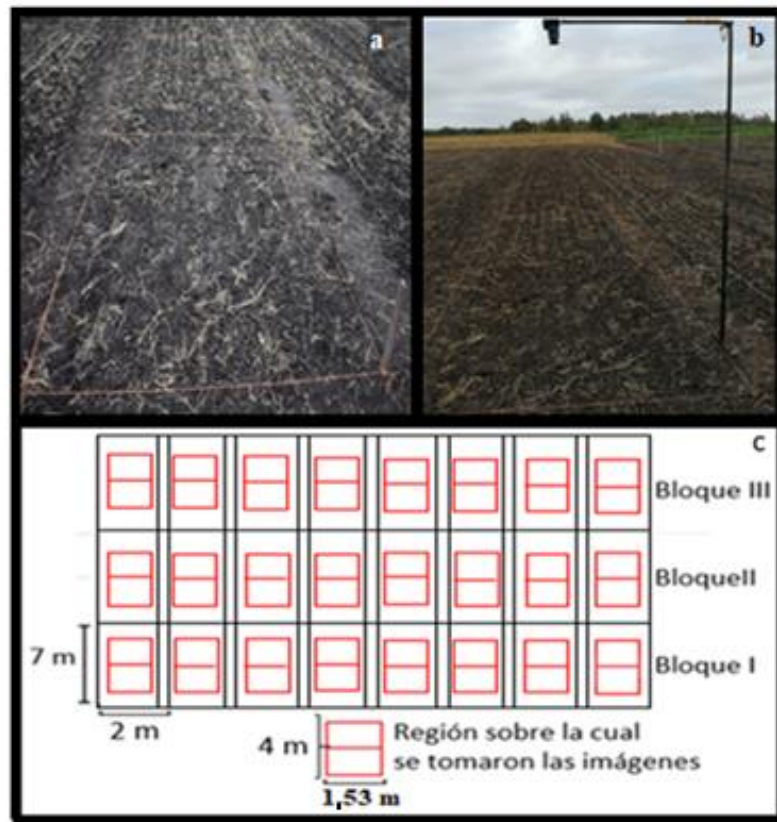


Figura 3. a) Área de trabajo efectiva a nivel de campo; b) soporte con la cámara colocada a 180° del suelo; c) esquema del área efectiva de trabajo. Imagen de las 24 parcelas (48 fotos), sobre las cuales se obtuvo cada imagen.

2.3.2.2 Toma de imágenes

En una primera instancia se realizó un proceso de prueba y calibración de las imágenes a tomar. Para esto se tomaron imágenes del suelo desnudo, previo a la siembra, evaluando distintas alturas y variando la cobertura del área y calidad de las imágenes. Al mismo tiempo se colocaron algunos objetos de tamaño conocido y se tomaron imágenes de estos como prueba para el calibrado de las imágenes. Además, se observó el grado de repetitividad, ya que es necesario que las imágenes sean lo más parecidas posible en las distintas tomas. Las imágenes fueron tomadas entre las 11 y 14 h, buscando una baja influencia de la luz solar y siempre desde el mismo punto, ya que cada parcela tenía una marca correspondiente para colocar el soporte.

Las imágenes fueron tomadas con una cámara Nikon (D3400), empleando un control remoto. Se utilizó un ángulo de cámara de 18° para lograr enfocar la cámara con el brazo (dispuesto a 90° de la base) en línea recta con el suelo.

Se comenzaron a tomar imágenes a los 20 días luego de la siembra (10-07-2018) y se tomaron cada 5 días, hasta el día 43 post siembra (02-08-2018). En ese período se tomaron un total de 5 fechas de evaluación y se seleccionaron 3 fechas representativas para el estudio. Las imágenes se tomaron hasta que las plantas alcanzaron un tamaño tal que no permitía diferenciarlas entre sí y por ende no se podía hacer un seguimiento individual de cada una de ellas, lo cual ocurrió cuando el cultivo tenía tres hojas desplegadas (B3 en la escala de CETIOM).

2.3.2.3 Calibración, etiquetado y conteo de plantas

Luego de tomadas las imágenes, se procedió a su lectura para obtener los valores reales y poder determinar correctamente el número de plantas y su ubicación. Para el calibrado, se utilizaron objetos guía de tamaño conocido que permiten comparar los píxeles de la imagen con los centímetros reales que posee cada objeto. Los objetos utilizados fueron 4 tapas plásticas de colores (3 cm diámetro), los cuales se colocaron dentro de algunas parcelas. Esto permitió extrapolar las imágenes a escala real y pasar de píxeles a centímetros (datos virtuales a datos reales). Una vez calibradas las imágenes, se realizó un etiquetado manual sobre las fotos, de todas las plantas en las fechas determinadas (T20, T22 y T30) (Figura 4a, 4b). Empleando el programa Labeling (<https://github.com/tzutalin/labelImg>), se etiquetaron 14.000 plantas para el total de parcelas estudiadas.

Luego de etiquetar la totalidad de las plantas, se generó un documento XML utilizando el mismo programa, el cual se usó para contabilizar las plantas presentes en cada imagen, usando un código escrito en el lenguaje de programación Python (<http://www.python.org>). Este código permitió contabilizar las etiquetas y, por tanto, cuantificar las plantas etiquetadas en los distintos momentos. Así se logró comparar la población de cada momento con la población a cosecha.

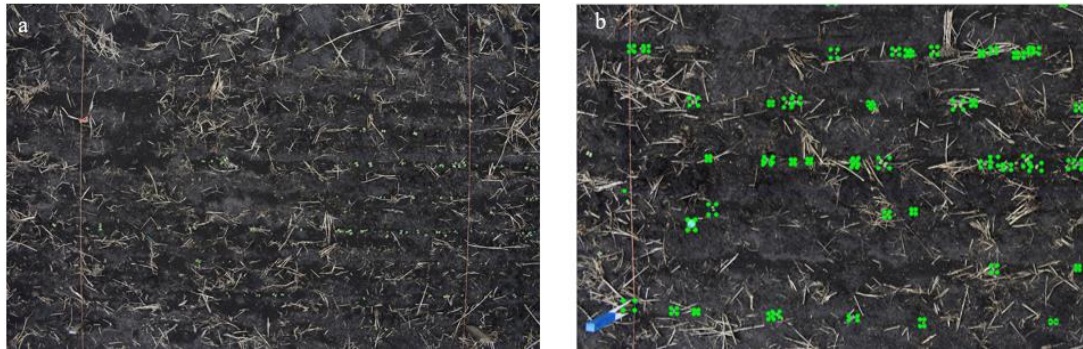


Figura 4. Procedimiento de evaluación de plantas mediante imágenes, con un etiquetado manual y la segmentación correspondiente. a) Imagen de una de las parcelas en T20; b) imagen con el total de plantas etiquetadas manualmente (color verde). Se observan 5 surcos etiquetados, de los cuales los dos centrales fueron los surcos cosechados.

2.3.3 Distribución espacial de plantas

El arreglo espacial de las plantas en cada parcela se evaluó a cosecha. Para conocer dicho arreglo, se elaboró una grilla con la ubicación de cada planta al momento de la cosecha mediante la obtención de las coordenadas X e Y de cada una de las plantas de las distintas hileras de cada parcela. Los valores 0/0 hacen referencia al vértice de la parcela. Los valores de X fueron medidos en sentido horizontal y hacen referencia a la ubicación entre hileras. Los valores de Y hacen referencia a las plantas en sentido vertical, es decir, dentro de las hileras. Este procedimiento se realizó sobre el área previamente mencionada (6 o 5 hileras según distancia entre filas en los 4 metros centrales). En total, se armaron 24 grillas, una para cada parcela, con un total de 4849 plantas ubicadas y 1658 plantas cosechadas, dado que solo fueron cosechadas las dos hileras centrales de cada parcela.

2.3.3.1 Polígonos de Thiessen

A partir de la ubicación de las plantas cosechadas y de su entorno, empleando el Software QGIS (versión 3.10.8), se estimaron polígonos de Thiessen, denominados polígonos de Voronoi (Figura 5a). Una vez obtenidos los polígonos, se calculó el área de cada polígono empleando las herramientas «polígonos de Voronoi»

y «área». A su vez, fue estimada su variabilidad, para lo cual se utilizó el coeficiente de variación (CV) del área de los polígonos. A mayor valor en este coeficiente, menor es la uniformidad en la distribución entre plantas.

2.3.3.2 Excentricidad

En este trabajo, la excentricidad fue estimada como la distancia que hay entre la planta y el centro del polígono. Se calculó el punto medio (Figura 6), con la herramienta «centroides» del software QGIS (versión 3.10.8), y se comparó la ubicación para cada polígono de las plantas y el centro. Para obtener las coordenadas de los centroides, fue necesario abrir su tabla de atributos y hallar mediante las herramientas «x» e «y» el valor de las coordenadas X e Y de cada centroide, análogo al valor obtenido de cada planta.

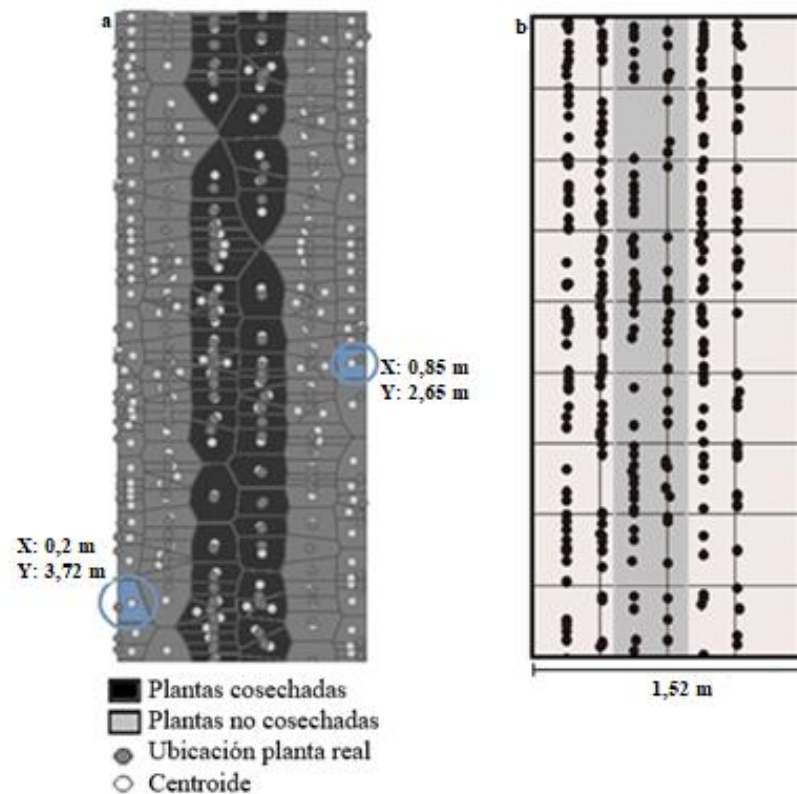


Figura 5. Métodos de evaluación de la uniformidad espacial. a) Fragmento de una parcela, donde se pueden observar las plantas (puntos grises) para las 6 hileras medidas. También se pueden ver sus respectivos polígonos de Thiessen, con sus centroides (puntos blancos), y se puede observar las diferentes distancias que hay

entre plantas y centroides de cada polígono. La zona central, de color más oscuro, hace referencia al área de plantas cosechadas. Conjuntamente, se observan algunos ejemplos, con la ubicación de cada planta (valores X e Y); b) fragmento de cuadrícula parcelaria obtenida con el software QGIS, utilizada para el cálculo de I . Cada punto simboliza a una planta; además, se observan las 6 hileras medidas y en la zona más oscura se encuentran las dos hileras centrales, las cuales fueron cosechadas.

Para calcular la diferencia entre ambos puntos (centroide vs. planta) (Figura 6), se restaron sus ubicaciones y, con la diferencia entre ambos puntos, se conforma un triángulo rectángulo, donde los catetos simbolizan dicha diferencia, en los dos planos medidos, X e Y . Luego, mediante la fórmula de Pitágoras (ec. 1), se obtiene la hipotenusa, la cual indica la distancia efectiva que hay entre el centroide y la planta. A medida que la distancia (hipotenusa) es mayor, más alejada está la planta del centro de su polígono.

$$h = \sqrt{a^2 + b^2} \quad [1]$$

Donde:

h = hipotenusa

a y b = catetos

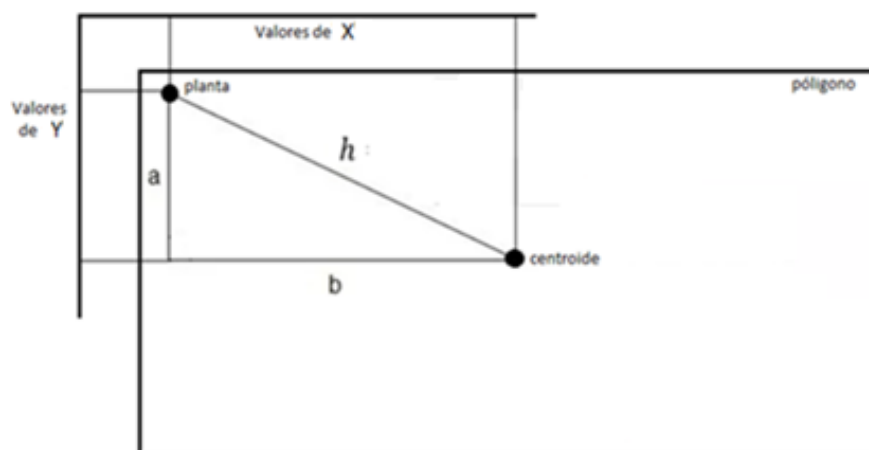


Figura 6. Esquema de un polígono, con su planta y su centroide. El cateto a simboliza la diferencia que hay en el valor de Y y el cateto b , la diferencia en X para

la planta y el centroide. Mediante estos valores de distancia se conforma un triángulo rectángulo, sobre el cual se aplicó la fórmula de Pitágoras para la obtención de la hipotenusa (h), que simboliza la distancia efectiva que hay entre la planta y el punto medio.

2.3.3.3 Excentricidad/Área

Se determinó la relación entre la excentricidad y el área de los polígonos como una forma de visualizar el arreglo del cultivo (ec. 2). De esta manera se obtiene un índice que permite relacionar un conjunto de variables significativas del arreglo espacial, que relaciona la población, el área de influencia de cada planta, la uniformidad y la ubicación de cada planta dentro de su área.

$$E/A: \frac{\text{Excentricidad (m)}}{\text{Área del polígono (m}^{-2}\text{)}} \quad [2]$$

2.3.3.4 Índice de Morisita

Para estimar el índice de Morisita, se cargaron las planillas con las coordenadas de cada planta en el software QGIS. Se realizó una cuadrícula de 0,34 metros de lado, que se corresponde con uno de los espaciamientos que se utilizó en el ensayo. Esto permitió ver la distribución de las plantas en el área, ya que se realizaron pruebas con cuadrículas de 0,17 m, pero eran cuadrantes chicos, muchos de los cuales no poseían plantas, especialmente en las parcelas sembradas a 0,34 m. Una vez contrapuestas las plantas con la cuadrícula (Figura 5b), se calculó el número de plantas en cada cuadrante. Con dicho valor, el número de plantas que posee cada parcela (previamente calculado) y el total de cuadrantes se aplicó la siguiente fórmula de cálculo para estimar el índice de Morisita (ec. 3).

$$I = Q \frac{\sum_{i=1}^Q ni (ni-1)}{N(N-1)} \quad [3]$$

Donde:

I : índice de Morisita

Q = número de cuadrantes en el área de muestreo

n_i = número de plantas en el cuadrante i

N = número total de plantas en el área de muestreo

2.3.3.5 Distancia entre plantas y rectangularidad

Para el cálculo de la distancia entre plantas, se midió directamente la diferencia en la ubicación entre cada una de estas. Por su parte, la rectangularidad hace referencia al cociente entre la distancia que hay entre dos hileras consecutivas y la distancia que hay dentro de la hilera de dos plantas contiguas (ec. 4). Para el cálculo, se utilizaron las distancias entre plantas previamente calculadas y las distancias entre filas (0,17 y 0,34 m).

$$\frac{X_0 - X_1}{Y_0 - Y_1} \quad [4]$$

Donde:

X_0 e Y_0 : ubicación de la hilera y planta “0”

X_i e Y_i : ubicación de la hilera y planta “1”

2.3.4 Análisis estadístico

El experimento fue sembrado en un diseño de bloques completos con tres repeticiones y con un arreglo factorial de tratamientos. En primera instancia, para evaluar el efecto de los tratamientos sobre la población resultante y la proporción de plantas presentes (pérdida de plantas) en los distintos momentos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando R 6.4 (R Core Team, 2018). Los efectos de la población objetivo, la distancia entre hileras, el tiempo y sus respectivas interacciones fueron analizados por el siguiente modelo lineal mixto de medidas repetidas en el tiempo:

$$Y_{ijkl} = \mu + P_i + D_j + B_k + T_l + PD_{ij} + PT_{il} + DT_{jl} + PDT_{ijl} + e_{ijk}$$

donde, Y_{ijkl} es la variable respuesta, μ es la media general, P_i es el efecto de la población objetivo (fijo), D_j es el efecto de la distancia entre hileras (fijo), B_k es el efecto del bloque (fijo), T_l es el efecto del tiempo de medición (aleatorio), PD_{ij} es el efecto de la interacción entre población objetivo y distancia entre hileras (fijo), PT_{il} es el efecto de la interacción entre población objetivo y tiempo (aleatorio), DT_{jl} es el efecto de la interacción entre distancia entre hileras y tiempo (aleatorio), PDT_{ijl} es el efecto de la interacción triple y e_{ijk} es el error residual.

Para evaluar el efecto de la población, la distancia entre hileras y el arreglo espacial en el comportamiento productivo del cultivo se realizó un análisis de varianza de la regresión entre las variables consideradas empleando el programa INFOSTAT. Para estas evaluaciones, se analizó cada parcela como una unidad independiente. Se entiende como un muestreo aleatorizado de un conjunto de plantas, ya que no se realizó ninguna tarea con la población luego de la siembra. Este mismo método se utilizó para analizar a los tratamientos con relación al arreglo del cultivo y también para evaluar el efecto de dicho arreglo espacial en el rendimiento de las parcelas.

Por último, se estudió el comportamiento individual de las plantas. Se realizó el análisis de varianza de la regresión entre las distintas variables del arreglo (área, excentricidad, rectangularidad y distancia entre plantas) con el rendimiento por planta. Al mismo tiempo, se elaboró un árbol de clasificación y regresión (CART), utilizando como variables de clasificación, el área por planta, la distancia entre hileras, la población objetivo de la parcela, la excentricidad, la relación excentricidad/área, la distancia media a las plantas vecinas, su ubicación espacial en la parcela y la rectangularidad, utilizando el paquete Rpart (Therneau et al., 2013) implementado en el programa R 6.4 (R Core Team, 2018).

2.4 RESULTADOS

2.4.1 Caracterización climática del período experimental

Las precipitaciones en el período en el que se desarrolló el cultivo fueron menores que el promedio (463 vs. 607 mm) (Figura 7), aunque es probable que no se registraran condiciones de déficit hídrico. En el mes de junio, cuando se llevó a cabo la siembra, llovieron apenas 11 mm; sin embargo, las lluvias del mes de mayo fueron abundantes (impidieron la siembra durante ese mes) y el contenido de agua en el suelo fue adecuado para el momento de la siembra en junio. Para los siguientes meses, las lluvias fueron aceptables, bien distribuidas dentro del mes, y no hubo prolongados períodos sin precipitaciones. La temperatura se comportó de manera muy similar a la serie de referencia, durante todo el ciclo del cultivo. Desde floración hasta la finalización de la maduración, la temperatura, aunque se incrementó, se mantuvo muy similar a la media histórica (Figura 7).

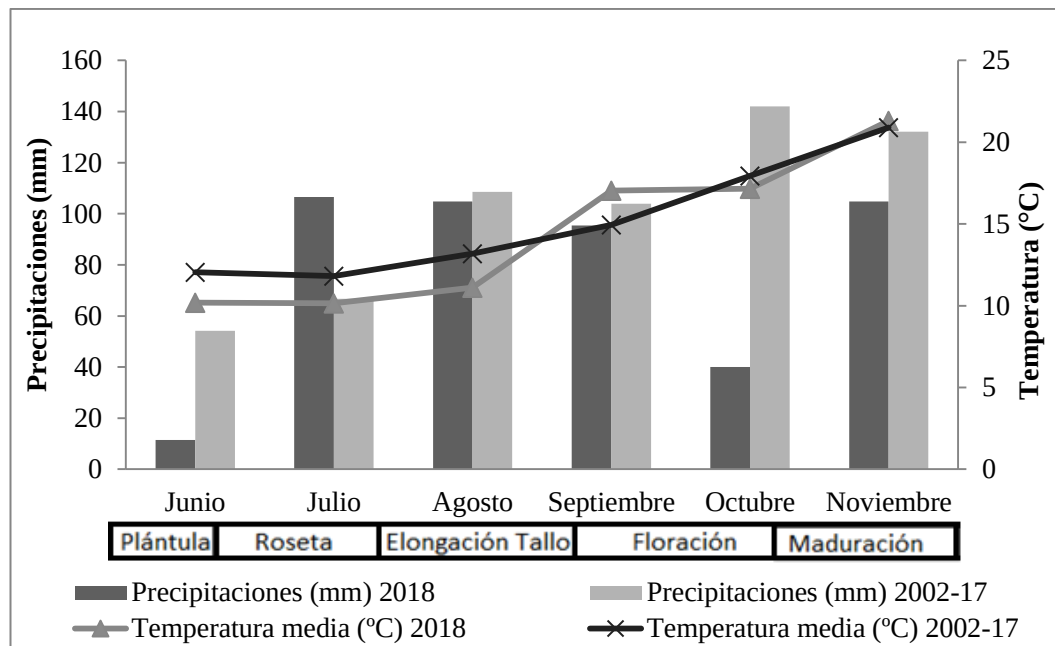


Figura 7. Precipitaciones mensuales y temperatura media (°C) mensual para el período experimental del año 2018 con relación a la serie 2002-2017 para el sitio experimental.

2.4.2 Población y dinámica poblacional

El rango de población al momento de la cosecha fue de 10 a 151 plantas m^{-2} ($\bar{x}$: 75 y CV: 54 %) y esta variación en el número de plantas fue constante desde la emergencia hasta la cosecha. El número de plantas estuvo afectado significativamente por la población objetivo ($P < 0,0001$), la distancia entre hileras ($P < 0,0001$) y el tiempo ($P < 0,0001$). La mayor población se observó a los 30 días post siembra (T30) y luego descendió hasta la cosecha (T149). Las interacciones entre los tratamientos entre sí y la interacción de los tratamientos y el tiempo (población objetivo*distancia entre hileras*tiempo) no fueron significativas ($P < 0,6748$, $P < 0,4559$ respectivamente), mientras que la interacciones entre la población objetivo y el tiempo y distancia entre filas y el tiempo sí lo fueron ($P < 0,0135$, $P < 0,0002$ respectivamente). A mayor población objetivo y menor distancia entre hileras, la población fue mayor en todos los momentos evaluados (Figura 8 a y b). Las parcelas con la menor distancia entre hileras (0,17 m) presentaron un mayor número promedio de plantas en todos los momentos evaluados, incluso a cosecha (112 plantas m^{-2}), donde la población mínima fue de 45 plantas m^{-2} . Por el contrario, la distancia entre hileras mayor (0,34 m) estuvo asociada a un menor número promedio de plantas (65 plantas m^{-2}) y la mínima población del experimento (10 plantas m^{-2}) a la cosecha.

La implantación (T30) media fue de 64 % y no se vio afectada significativamente por la población objetivo ($P < 0,3851$) ni por la interacción distancia entre hileras*población objetivo ($P < 0,2894$), pero existió efecto individual de la distancia entre hileras ($P < 0,0004$) (Figura 8c). Se observó que las implantaciones fueron mayores en las parcelas con menor distancia entre hileras (84 % vs. 45 %). Dicha superioridad se observó desde el primer momento de evaluación (T20). Las pérdidas de plantas fueron diferentes según la población objetivo ($P < 0,0433$), la distancia entre hileras ($P < 0,0023$) y la interacción población objetivo*distancia entre hileras ($P < 0,0008$). En parcelas con mayor distancia entre filas, donde la competencia dentro de la hilera se agudiza, las pérdidas fueron mayores. No obstante, para los cambios relativos de población (respecto a las semillas sembradas) la relación del tiempo con los tratamientos (población objetivo y

distancia entre hileras) no fue significativa ($P < 0,9959$; $P < 0,4233$, respectivamente) ni tampoco la interacción tiempo*población objetivo*distancia entre hileras ($P < 0,9414$) por lo que los cambios de población relativa fueron afectados por el tiempo individualmente ($P < 0,0001$) (Figura 8d). Si se analiza la caída en la población entre T30 y T149, se observó una pérdida de 16 % de las plantas, sin diferencias entre tratamientos, lo que significa que, a pesar de las diferencias en el número de plantas en las distintas parcelas, las pérdidas no fueron de diferente magnitud relativa.

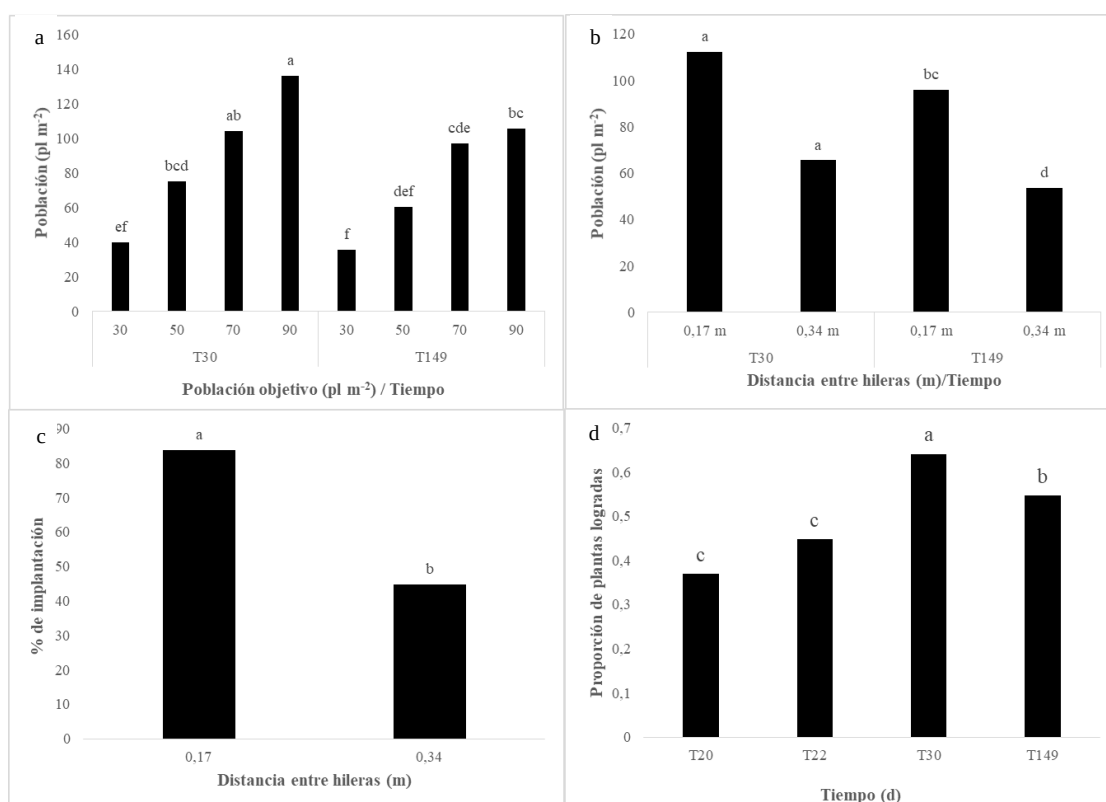


Figura 8. Comportamiento de la población en los distintos momentos evaluados. a) Población lograda T0, T30 y T149 según población objetivo; b) población a T0, T30 y T149 según distancia entre hileras; c) población implantada según distancia entre hileras; d) proporción promedio de plantas logradas con relación al tiempo; d) T0 = semillas sembradas, T30 = plantas implantadas, T149 = cosecha con la población. Implantación evaluada en el estado fenológico B1-B2 (T30). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$).

2.4.3 Efecto de la densidad y la distancia entre hileras en el rendimiento en grano

A pesar de que el rendimiento en grano del cultivo fue variable ($516 \pm 25 \text{ g m}^{-2}$), ni la población objetivo ($P < 0,5062$), ni el espaciamiento entre hileras ($P < 0,5833$), ni su interacción ($P < 0,5065$) afectaron el rendimiento. Tampoco pudo encontrarse una asociación entre la población a cosecha y el rendimiento en grano ($P < 0,1122$; $R^2: 0,11$) (Figura 9a).

El rendimiento estuvo asociado al número de silicuas por unidad de superficie ($P < 0,001$; $R^2: 0,93$) (Figura 9b), pero no al peso por silicua ($P < 0,8855$; $R^2: 0,001$) (datos no mostrados). Independientemente del espaciamiento, aquellas parcelas con mayor cantidad de silicuas lograron los mayores rendimientos. Al mismo tiempo, no hubo relación entre el número de silicuas y peso de silicuas ($P < 0,1879$; $R^2: 0,08$) (datos no mostrados).

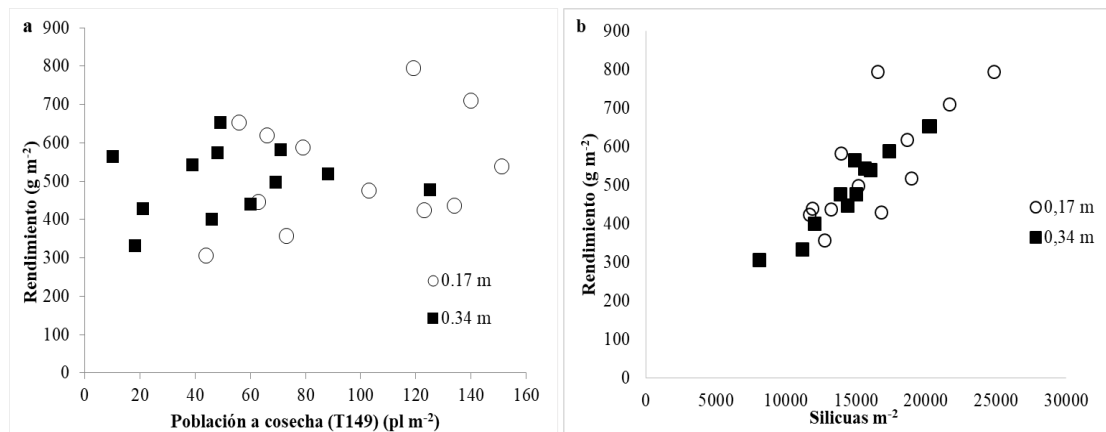


Figura 9. a) Relación entre la población a cosecha y el rendimiento en grano según espaciamiento entre hileras; b) relación entre el número de silicuas y el rendimiento en grano según espaciamiento entre hileras.

2.4.4 Arreglo espacial

La población lograda no se relacionó con el coeficiente de variación (CV) del área de los polígonos ($P < 0,1120$; $R^2: 0,11$) (Figura 10a) ni tampoco con I ($P < 0,0914$; $R^2: 0,12$) (Figura 10b), lo que indica que la población lograda no afectó la

uniformidad en la distribución general de plantas. Solo se observa un comportamiento diferencial de la relación entre la población y el CV de las áreas (polígonos) cuando el número de plantas superó las 80 plantas m^{-2} (Figura 10a), ya que, independientemente de la distancia entre hileras, el coeficiente de variación del área se estabilizó en torno a un 70 %. La relación entre I y la población no se modificó, ya que, prácticamente, los valores obtenidos en este indicador son constantes, independientemente de la población (Figura 10b).

Los valores de excentricidad variaron entre 0,10 y 0,02 m y se relacionaron de forma significativa con el número de plantas de cada parcela (Figura 10c), donde la excentricidad se incrementó a medida que la población bajó. El tamaño medio de los polígonos influyó directamente en la excentricidad medida, donde las plantas con mayor área se corresponden con las mayores distancias al centro de los polígonos (Figura 10d). Los valores más altos de la relación excentricidad/área del polígono (E/A) se relacionaron significativamente con las parcelas de mayor población (menor área por planta) y cuando el valor tiende a 0, con las parcelas que presentan menos plantas, mayor variabilidad en la uniformidad, mayores áreas por planta y más lejos se encontraban del centro de los polígonos (Figura 10e). La rectangularidad estuvo afectada por el espaciamiento de hileras (Figura 10f), los valores más elevados de rectangularidad de las parcelas a 0,34 m se debieron a una mayor cercanía de las plantas dentro de la hilera y a un mayor espaciamiento con relación a la hilera vecina.

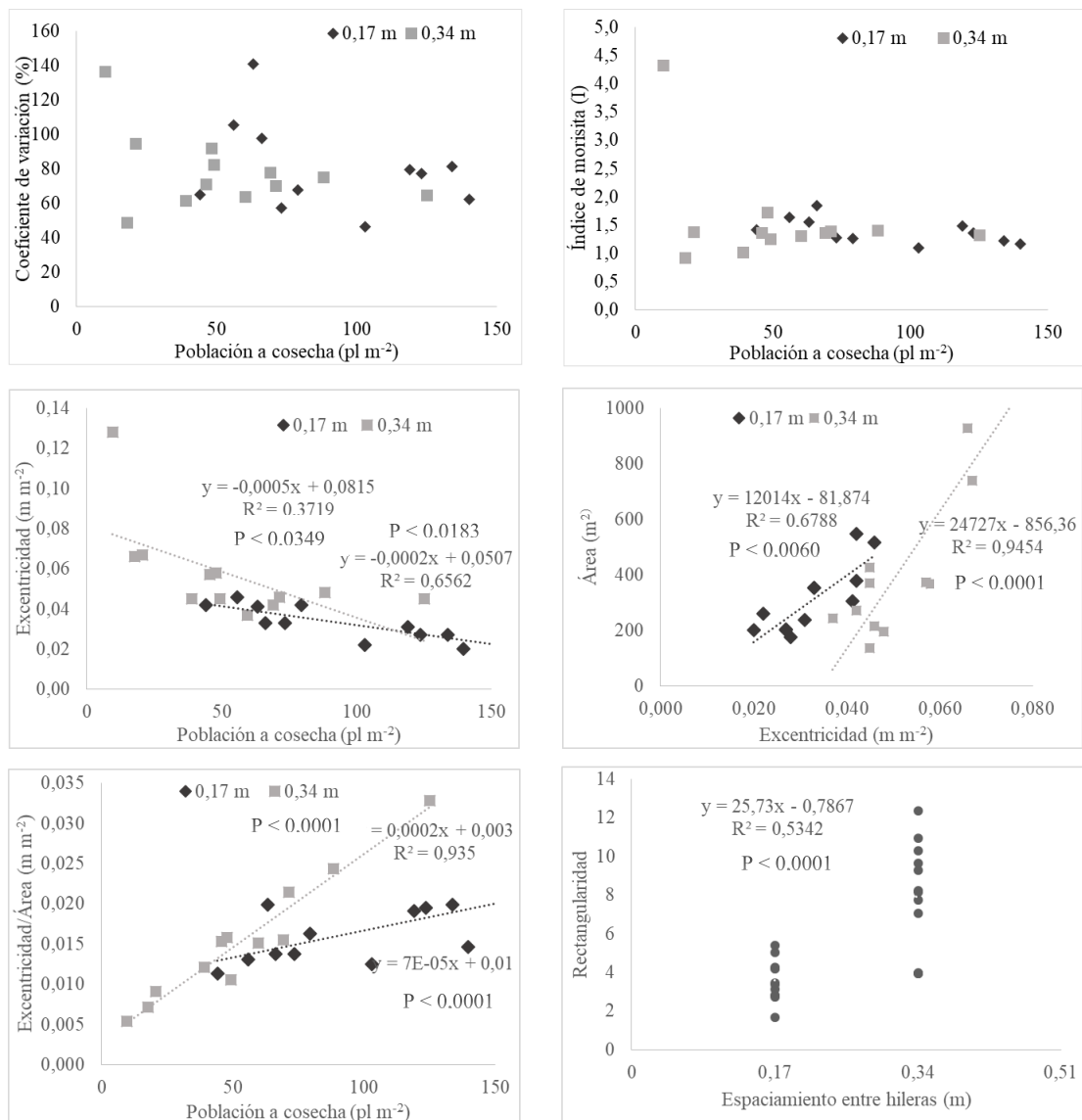


Figura 10. Efecto de los tratamientos en el arreglo espacial. a) Relación entre el coeficiente de variación del área por planta (CV) y la población a cosecha según espaciamiento entre hileras; b) relación entre la excentricidad y la población a cosecha según espaciamiento entre hileras; c) relación entre I y la población a cosecha según espaciamiento entre hileras; d) relación entre área y excentricidad con la población a cosecha según espaciamiento entre hileras; e) relación entre E/A y la población a cosecha según espaciamiento entre hileras; f) relación entre rectangularidad y la población a cosecha según espaciamiento de hileras.

2.4.5 Efecto del arreglo espacial sobre el rendimiento en grano

El rendimiento medio y su variación no se relacionaron de manera significativa con ninguna de las estrategias utilizadas para evaluar el arreglo espacial del cultivo. A pesar de la variabilidad encontrada en las distintas variables asociadas al arreglo espacial, el CV de los polígonos ($P < 0,3099$; $R^2:0,05$) (Figura 11a), su excentricidad ($P < 0,7006$; $R^2:0,01$) (Figura 11b), I ($P < 0,3995$; $R^2:0,03$) (Figura 11c), y la rectangularidad ($P < 0,7128$; $R^2:0,01$) (Figura 11d) calculados para cada parcela, en ningún caso fue posible encontrar una asociación significativa con el rendimiento.

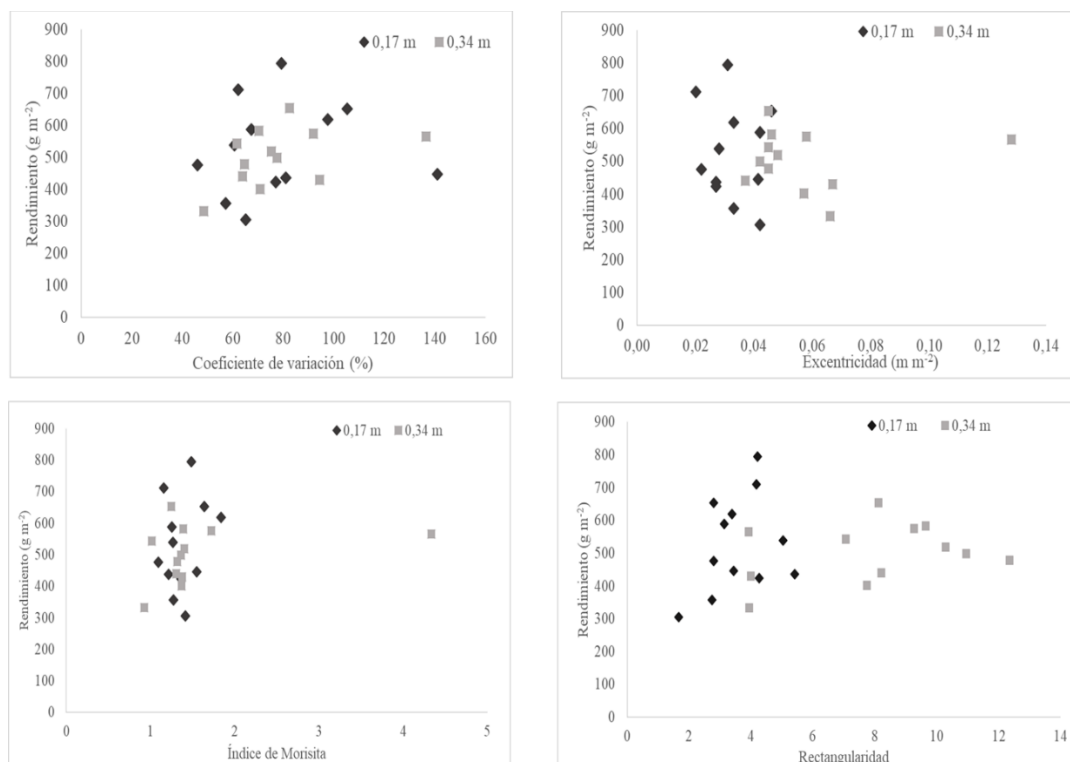


Figura 11. Efecto del arreglo en el rendimiento de las parcelas. a) Relación entre el rendimiento y el coeficiente de variación del área de los polígonos (CV) según espaciamiento entre hileras; b) relación entre el rendimiento y excentricidad según espaciamiento entre hileras; c) relación entre el rendimiento y I según espaciamiento entre hileras; d) relación entre el rendimiento y rectangularidad según espaciamiento entre hileras.

2.4.6 Rendimiento por planta

Se detectó una importante variabilidad en el área de los polígonos, acompañada de una gran variación en las variables asociadas al arreglo espacial de las plantas. No obstante, existió una asociación débil, aunque significativa, entre el rendimiento por planta y su área ($P < 0,0001$; $R^2: 0,23$) (Figura 12a), al igual que con la excentricidad ($P < 0,0001$ $R^2: 0,04$) (Figura 12b), la rectangularidad ($P < 0,0001$; $R^2: 0,02$) (Figura 12c) y la distancia entre plantas vecinas ($P < 0,0001$; $R^2: 0,07$) (Figura 12d). A pesar de que fueron estadísticamente significativas, no hubo un efecto claro en el rendimiento.

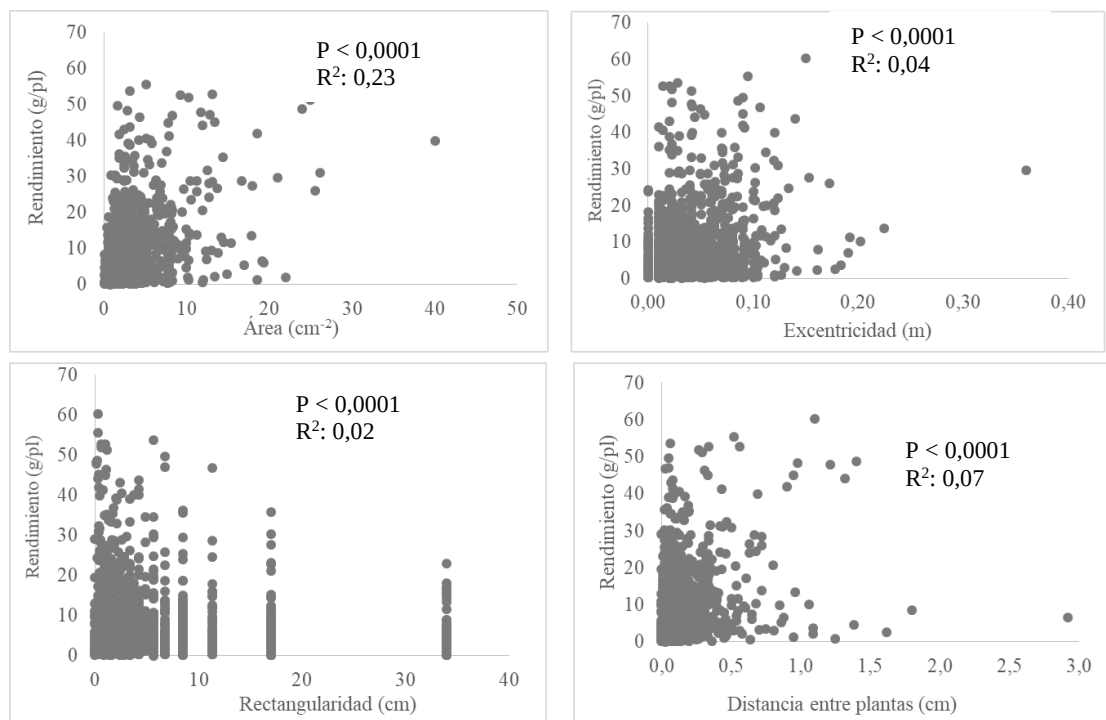


Figura 12. Efecto del arreglo espacial en el rendimiento por planta. a) Relación entre el rendimiento por planta y el área disponible por planta; b) relación entre el rendimiento por planta y su excentricidad; c) relación entre el rendimiento por planta y la rectangularidad; d) relación entre el rendimiento por planta y la distancia entre plantas.

Los resultados del árbol de clasificación-regresión (Figura 13) determinaron que la variable principal por la cual se diferenció el rendimiento de cada planta fue el área por planta estimada a partir de los polígonos de Thiessen. El 84 % de las plantas

tenían un área menor a $4,1 \text{ cm}^2$ con un rendimiento promedio de 9 gr/pl y el restante 16 % tenía un área mayor a $4,1 \text{ cm}^2$ con un rendimiento promedio de 22 gr/pl . Dentro de las plantas con menor área, la excentricidad influyó, pero con una muy baja cantidad de plantas con esa condición, es decir que su influencia si bien fue significativa, fue menor en términos de cantidad de plantas afectadas. En las plantas con mayor área se repitió el patrón de influencia del área por planta y hubo influencia de la distancia entre plantas y la relación excentricidad/área, pero también con una muy baja significancia, ya que la cantidad de plantas en esa condición fue de solo el 1 %. El área de las plantas es un parámetro estandarizado y solo una pequeña parte de las plantas estuvo por fuera de los rangos promedios, lo que, a su vez, aumentó el rendimiento por planta en dichos casos. Los demás parámetros parecen no haber tenido influencia en el rendimiento, y, a nivel de parcela, ninguno de estos parámetros afectó el rendimiento de forma significativa.

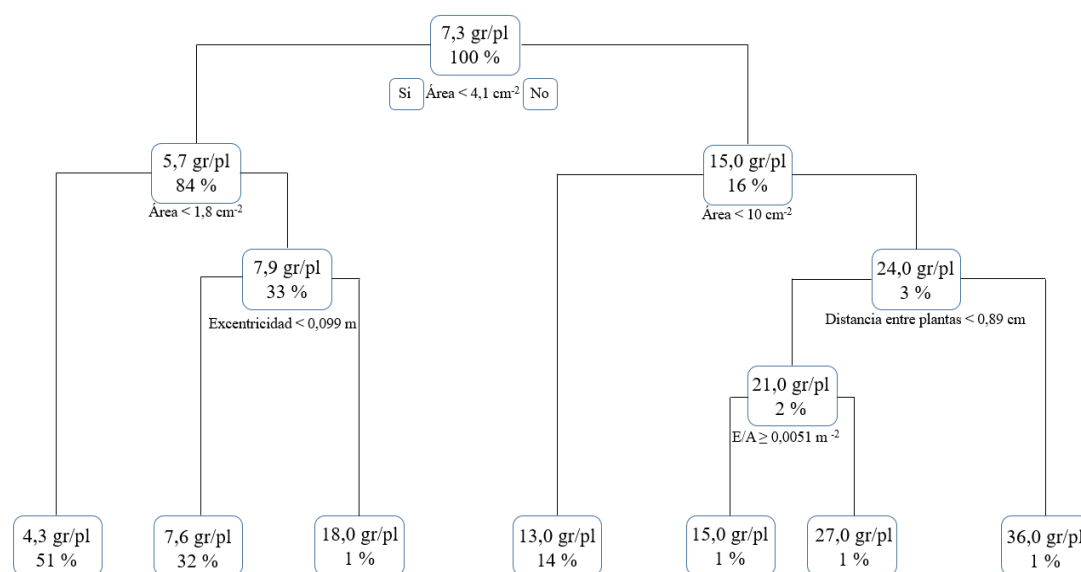


Figura 13. Árbol de clasificación y regresión para la variable rendimiento por planta. La mayor segregación tuvo lugar a través del área, donde del 100 % inicial (con un rendimiento de $7,3 \text{ gr/pl}$), el 84 % poseía un área menor a $4,1 \text{ cm}^2$ y el restante 16 %, un área mayor a este valor. Además del área, hubo clasificación por excentricidad, distancia entre plantas y E/A, que determinaron el porcentaje de cada grupo de plantas y su rendimiento.

2.5 DISCUSIÓN

El cultivo de carinata, de reciente incorporación a los sistemas de producción regionales y mundiales (Johnson et al., 2013; Seepaul et al., 2019) es capaz de lograr una muy buena adaptación y producción bajo diversas condiciones y ambientes, lo que lo posiciona como un prometedor cultivo oleaginoso con fines energéticos. El potencial de rendimiento del cultivo aún no ha sido claramente reportado, pero en nuestro experimento obtuvo un rendimiento medio de 516 g m^{-2} con valores máximos de 794 g m^{-2} , valores muy por encima de los obtenidos en varios de los trabajos en este cultivo (180 a 340 g m^{-2}) (Zanetti et al., 2009, Pan et al., 2012, Mulvaney et al., 2019, Seepaul et al., 2019). Este rendimiento excepcional resultó de una cosecha manual con nulas pérdidas de granos, en una estación de crecimiento con buena oferta hídrica y temperatura (Falasca y Ulberich 2010), sin daños en el cultivo por heladas y manejo (preparación del suelo, siembra, fertilizaciones, control de sanidad) dentro de rangos óptimos.

La población objetivo y el espaciamiento han sido reportados como la medida de producción básica en la formación del rendimiento (Geisler y Stoy, 1987, Mulvaney et al., 2019). Para este cultivo en particular, se ha reportado una mejora en la distribución de plantas en el área y el rendimiento a medida que el espacio entre hilera es menor (Mulvaney et al., 2019), situación que no ocurrió en las condiciones de este experimento, donde la uniformidad en la distribución de plantas no se vio afectada mayormente por los tratamientos (población objetivo y espaciamiento entre hileras). El espaciamiento entre hileras determinó diferencias en la implantación (84% y 45% para $0,17$ y $0,34 \text{ m}$). Dichos valores, en las hileras más próximas, son elevados en relación tanto a la implantación esperada en este ensayo como en reportes previos para el cultivo (40%) (Hossain et al., 2018), situación que no se da con distanciamiento de $0,34 \text{ m}$. En colza, Mazzilli et al. (2021), evaluando el comportamiento de la población en distintos años, obtuvieron promedios de implantación del 32% con distintas densidades de siembra y distancias entre hileras.

Las diferencias en las poblaciones permanecieron a lo largo de todo el desarrollo del cultivo, incluso hasta la cosecha. Investigaciones previas muestran ausencia de respuesta a la población en un amplio rango de poblaciones (34 a 200

plantas m^{-2}) (Coll, 2010, Pan et al., 2012, Mulvaney et al., 2019). En nuestro caso, la población a cosecha varió en el rango de 10 a 151 plantas m^{-2} sin efecto significativo en el rendimiento. Acorde con lo esperado, se manifestó la alta capacidad de compensación del cultivo (Angadi et al., 2013) bajo manejo nutricional óptimo y una oferta hídrica considerada favorable. Es probable que la mayor competencia entre plantas se haya dado por radiación en aquellas parcelas más densas. Sin embargo, al ser un cultivo con una alta capacidad de compensación vegetativa (mediante ramificaciones), las variantes en la densidad bajo buenas condiciones producen efectos menos marcados y esto puede explicar la falta de respuesta a la población. El comportamiento resulta similar al del cultivo de colza, donde la compensación depende de las condiciones y la disponibilidad de recursos. A medida que los recursos son mayores, la plasticidad del cultivo se incrementa, independiente de la uniformidad (Angadi et al., 2013).

La relación entre la población, el espaciamiento y el arreglo espacial puede resumirse con el índice E/A. La situación ideal sería que las plantas dentro de las hileras se encuentren a una distancia equidistante para un mejor aprovechamiento de los recursos, pero esto generalmente no ocurre. Con una menor cantidad de plantas aumenta el área promedio y los valores de excentricidad, lo que empeora la posición de la planta en el polígono (mayor efecto en las parcelas con 0,34 m de espaciamiento). Sin embargo, no hubo efecto significativo en el rendimiento por parcela. A nivel de planta, hubo efecto significativo (Figura 12 y 13), principalmente del área y, en menor medida, de los demás parámetros espaciales, en relación con el rendimiento. Si bien existe significancia a nivel de planta, la asociación es débil, ya que la cantidad de plantas en esa condición es muy bajo (16 % para el promedio de todas las parcelas); es decir, si las condiciones de siembra o implantación hubieran determinado una mayor proporción de plantas en esa condición de baja población o estas plantas se concentraran en un tratamiento, hubiera sido razonable encontrar diferencias en rendimiento por unidad de superficie.

El CV del área de los polígonos, como una de las formas en la que fue medida la uniformidad, tampoco se relacionó significativamente con el rendimiento. Según Griepentrog (1999), valores de CV en torno al 40 % son considerados buenos

en el cultivo de colza. En nuestro caso, el 83 % de las parcelas superaron un CV de 60 %, considerados valores muy elevados y asociados a un mal arreglo espacial. Sin embargo, luego de que la población superó las 80 plantas m^{-2} , la variación se estabilizó en alrededor de 70 %. Ni I ni la rectangularidad se asociaron con el rendimiento. Se obtuvieron valores por encima de 1 en I y un arreglo rectangular, lo cual se corresponde a un arreglo agregado (Kristensen et al., 2006, Mattera et al., 2009). Sin embargo, I no fue una herramienta para discriminar una situación de otra, debido a que el valor obtenido fue relativamente constante entre los tratamientos evaluados.

En general, la uniformidad medida por distintos indicadores fue baja, pero la falta de respuesta del cultivo a la baja uniformidad puede estar relacionado con otros factores de mayor importancia, como la uniformidad temporal. La bibliografía es concluyente respecto a que a medida que crecen las plantas, la competencia por recursos desarrolla una jerarquía de tamaños dentro de la población. Estos procesos pueden agudizarse cuando la distancia entre hileras es mayor, ya que aumentan las plantas dentro de la hilera y la competencia se incrementa (Mithen et al., 1984, Mulvaney et al., 2019). Existen eventos de auto-raleo, siendo mayores en cultivos más densos, aquellos con pocas plantas pueden no auto-ralear en absoluto (White y Harper, 1970), por lo que las densidades iniciales no siempre son representativas de la población efectiva en la cosecha (Mulvaney et al., 2019). En nuestro caso, la proporción de plantas que murieron a través del tiempo no fue diferente significativamente entre parcelas y fueron del entorno del 16 % desde T30 a T149. En valores absolutos, ya que las parcelas estrechas tenían mayor número de plantas desde el comienzo de las mediciones, las pérdidas fueron mayores. Lo que significa que las diferencias en la implantación fueron constantes y las pérdidas (en proporción) fueron independientes del número de plantas y su espaciamiento. En este ensayo, a pesar de los distintos tratamientos, no hay un número de plantas que minimice las pérdidas ni tampoco un valor estabilizado de plantas por m^{-2} .

No fue posible determinar el momento en el cual se dieron las pérdidas. Pueden ocurrir en las últimas etapas de desarrollo, particularmente para las altas tasas de siembra (Sincik et al., 2010). Es necesario, en futuros trabajos, estudiar la

dinámica temporal de la población a lo largo de todo el cultivo, para determinar los momentos exactos de emergencia y en los que se producen las pérdidas de plantas. Será importante hacer una correlación temporal de cada planta que permita estudiar el momento y el ambiente en el cual emergieron y su efecto en el rendimiento a cosecha.

2.6 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio sugieren que el cultivo de *Brassica carinata*, bajo buenas condiciones climáticas y alto rendimiento alcanzado, no responde al espaciamiento y el arreglo espacial que adquieren sus plantas ni a la población a cosecha dentro de un amplio rango. La población fue máxima en los 30 días post siembra y luego decayó 16 % en promedio a cosecha, independientemente de los tratamientos. Las distintas poblaciones logradas y espaciamientos utilizados determinaron diferentes arreglos espaciales, donde la uniformidad medida como CV de los polígonos fue variable, pero no se asoció significativamente con ninguno de los tratamientos (población objetivo y distancia entre filas). Aquellas parcelas con la uniformidad más baja y menor cantidad de plantas lograron compensar, lo cual pudo verse favorecido por las óptimas condiciones ambientales durante el desarrollo del cultivo. Teniendo en cuenta que la variabilidad en la distribución de plantas no se asoció al arreglo espacial definido a siembra, y a pesar de lograr avances en el tema, resulta crucial estudiar otros aspectos en el desarrollo del cultivo, como la uniformidad de emergencia o la dinámica temporal de las plantas, para mejorar el entendimiento de este proceso y definir mejor las prácticas de manejo asociadas.

2.7 BIBLIOGRAFÍA

- Agrisoma Biosciences Inc. 2017. Carinata management handbook, southeastern US 2017-18. USA, Tifton, GA. En línea. Octubre 2020. <https://agrisoma.com/>.
- Amaral MK, Netto P, Figueiredo F. 2015. Evaluation of the Morisita Index for determination of the spatial distribution of species in a fragment of *Araucaria forest*. Applied ecology and environmental research. Vol. 13(2): 361-372.
- Angadi SV, Cutforth, HW, McConkey BG, Gan Y. 2013. Yield adjustment by canola grown at different plant populations under semiarid conditions. Crop Science. Vol. 43: 1358-1366.
- Bonan GB. 2011. The Size Structure of Theoretical Plant Populations : Spatial Patterns and Neighborhood Effects. Ecological Society of America Stable. Ecology, Vol. 69(6): 1721-30. En línea. Marzo 2020. <http://www.jstor.org/stable/1941150>.
- Cardone M, Mazzoncini M, Menini S, Rocco V, Senatore A, Seggiani M, Vitolo S. 2003. Brassica carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy : agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization. Biomass and Bioenergy, Vol. 25: 623-36.
- Falasca S, Ulberich A. (2010). La mostaza etíope (*Brassica carinata*) como cultivo energético en Argentina: para producir biodiesel o cultivo para biomasa. Revista Geográfica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia. 148: 7-22. En línea. Marzo 2020. <https://www.jstor.org/stable/40996825>.
- Fernández SO. 1991. Transferencia genética entre las especies cultivadas de Brassica. Sevilla, España. Universidad de Sevilla. pp. 28-33
- Geisler G, Stoy A. 1987. Untersuchungen zum Einfluß der Bestandesdichte auf das Ertragspotential von Rapspflanzen (*Brassica napus* L. var. *napus*). Journal of Agronomy and Crop Science. Vol. 159(4): 232-40.
- Griepentrog HW. 1999. Zur Bewertung der Flächenverteilung von Saatgut. The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen. Agrartechnische Forschung 5 H. 2, S. 117-124.
- _____, Olsen JM, Weiner J. 2009. The Influence of Row Width and Seed

- Spacing on Uniformity of Plant Spatial Distributions. KU-LIFE, Copenhagen, Denmark. VDI-Berichte Nr. 2060.
- Hossain G, Johnson EN, Blackshaw RE, Liu K, Kapiniak A, Gampe G, Molnar L, Luan L, Poppy L, Gan Y. 2018. Agronomic Responses of *Brassica carinata* to Herbicide, Seeding Rate, and Nitrogen on the Northern Great Plains. *Crop Science*. Vol. 58: 2633-2643.
- Hühn M. 1987. Stability Analysis of Winter-rape (*Brassica napus* L.) by Using Plant Density and Mean Yield per Plant. Institute of Crop Science and Plant Breeding. Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- _____. 1998. Theoretical results on the effects of nonregular spatial patterns of plants on yield per area. *Journal of Agronomy and Crop Science*. Vol. 182(1): 1-7.
- _____. 1999. Theoretical results on the effects of nonregular spatial patterns of plants on yield per area. *Journal of Agronomy and Crop Science*. Vol. 182(1): 1-7.
- _____. 2000. Note on the Effect of Non-regular Spatial Patterns of Plants on Yield per Area Based on a Logarithmic Relationship between Single Plant Yield and Individual Area. Institute of Crop Science and Plant Breeding. Christian-Albrechts-Universität Kiel. Kiel, Germany.
- Kristensen L, Olsen J, Weiner J, Griepentrog HW, Nørremark M. 2006. Describing the spatial pattern of crop plants with special reference to crop-weed competition studies. *Field Crops Research* Vol. 96: 207-215.
- Kuai J, Sun Y, Zuo Q, Huang H, Liao Q, Wu C, Lu J, Wu J, Zhou G. 2015. The yield of mechanically harvested rapeseed (*Brassica napus* L.) can be increased by optimum plant density and row spacing. (En línea). *Nature Research. Scientific Reports*. 5 (18835): 1-14. En línea. Enero 2019.
<https://www.nature.com/articles/srep18835>.
- Liu S, Baret F, Andrieu B, Burger P, Hemmerlé M, 2017. Estimation of wheat plant density at early stages using high resolution imagery. *Front. Plant Science*. 8:739. En línea, Enero 2021. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2017.00739>.
- Liu T, Li R, Jin X, Ding J, Zhu X, Sun C, Guo W. 2017. Evaluation of Seed

- Emergence Uniformity of Mechanically Sown Wheat with UAV RGB Imagery Remote Sensing. 2017, 9, 1241. DOI: 10.3390/rs9121241.
- Mattera J. 2004. Efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre los componentes del rendimiento de forraje y el uso de la radiación en el cultivo de alfalfa. Tesis Ing. Agr. Buenos Aires, Argentina. Escuela para Graduados Ing. Agr Alberto Soriano. Facultad de Agronomía-Universidad de Buenos Aires. 8 p.
- _____, Romero LA, Cuatrín A, Grimoldi AA. 2009. Row spacing effects on biomass production and persistence of alfalfa. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Rafaela, Argentina IFEVA-CONICET, Cátedra de Forrajicultura, Facultad de Agronomía (UBA).
- McVetty PBE, Duncan RW. 2015. Chapter 7. Canola, Rapeseed, and Mustard: For Biofuels and Bioproducts. Springer Science+Business Media New York 2015. DOI 10.1007/978-1-4939-1447-0_7.
- Mead R. 1966. A Relationship between Individual Plant-spacing and Yield. National Vegetable Research Station, Wellesbourne. Annals of Botany, N.S. Vol. 30, No. 118.
- Mithen R, Harper JL, Weiner J. 1984. Growth and mortality of individual plants as a function of available area. Oecologia (Berlin) 62:57-60
- Mulvaney MJ, Leon RG, Seepaul R, Wright DL, Hoffman TL. 2019. Brassica carinata Seeding Rate and Row Spacing Effects on Morphology, Yield, and Oil. Agronomy Journal. Vol. 111: 528–535.
- Pan X, Caldwell CD, Falk KC, Lada R. 2012. The effect of cultivar, seeding rate and applied nitrogen on Brassica carinata seed yield and quality in contrasting environments. Canadian Journal of Plant Science, 92: 961_971. DOI: 10.4141/CJPS2011-169
- Satorre E, Benech R, Slafer G, De la Fuente E, Miralles D, Otegui M, Savin R. 2003. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 783 p.
- Sankaran S, Quirós JJ, Knowles R, Knowles LO. 2017. High-Resolution Aerial Imaging Based Estimation of Crop Emergence in Potatoes. American Journal of Potato Research. Res. 94, 658–663. DOI 10.1007/s12230-017-9604-2.

- Seepaul R, George S, Wright DL. 2016. Comparative response of *Brassica carinata* and *B. napus* vegetative growth, development and photosynthesis to nitrogen nutrition. University of Florida, North Florida Research and Education Center, Quincy, United States. *Industrial Crops and Products*. Vol. 94: 872–883.
- _____, Marois J, Small IM, George S, Wrigth DL. 2019. *Carinata* Dry Matter Accumulation and Nutrien Uptake Responses to Nitrogen Fertilization. *Agronomy Journal*. Volume 111:1-9.
- _____, Kumar S, Boote KJ, Small IM, George S, Wrigth DL. 2021. Physiological analysis of growth and development of winter *carinata* (*Brassica carinata* A. Braun). *GCB Bioenergy*. 2021; 00:1–22. DOI: 10.1111/gcbb.12831.
- Sincik M, Goksoy TA, Turan MZ. 2010. Influence of sowing properties on winter oilseed rape in a sub-humid Mediterranean environment. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici*. 38 (1): 171-175.
- Therneau T, Atkinson B, Ripley B. 2013. Rpart: Recursive Partitioning. R Package Version 4.1-3. En línea. Setiembre 2020. <http://CRAN.R-project.org/package=rpart>.
- Zanetti F, Vamerali T, Mosca G. 2009. Yield and oil variability in modern varieties of high-erucic winter oilseed rape (*Brassica napus* L. var. *oleifera*) and Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) under reduced agricultural inputs. *Industrial Crops and Products*. Vol. 30: 265-70.

3. COMENTARIOS Y EVALUACIÓN FINAL

3.1 RENDIMIENTO LOGRADO

El rendimiento medio alcanzado en el trabajo fue de 516 g m⁻², muy por encima de reportes previos, (180 a 340 g m⁻²) (Zanetti et al., 2009, Pan et al., 2012, Mulvaney et al., 2019, Seepaul et al., 2019). A nivel comercial, el rendimiento promedio de carinata para la zafra 2018 fue de 1800 kg ha⁻¹, siendo el 2.º año de mayor rendimiento reportado en el país (en el año 2019 el rendimiento promedio fue de 1900 kg ha⁻¹) (UPM Biofuels, comunicación personal, 01/10/2020). Este rendimiento es superior a los obtenidos para las demás especies del género *Brassica*. En canola, para el período 2015-2017, el rendimiento promedio nacional fue de 1400 kg ha⁻¹, a nivel comercial (<http://www.fao.org>)

Bajo buenas condiciones climáticas, el cultivo de carinata fue capaz de compensar el rendimiento en un amplio rango de poblaciones y alcanzar un buen rendimiento por unidad de superficie, explicado por la plasticidad vegetativa en respuesta a la disponibilidad de recursos. Bajo este escenario, incurrir en una siembra muy densa puede significar un gasto excesivo de semillas, ya que el rendimiento no varió dentro de una gama amplia de poblaciones. Sin embargo, en siembras subóptimas y en condiciones adversas, no es esperable que haya compensación en los componentes del rendimiento. Por tanto, frente a un pronóstico de un año con condiciones climáticas adversas, donde las plantas sufran un estrés constante, trabajar con poblaciones en el rango inferior al evaluado en este trabajo podría implicar un elevado riesgo, ya que la compensación se verá limitada. Es por esto que resulta necesario evaluar este efecto en condiciones menos favorables a las registradas en este estudio.

Siembras tardías o muy tempranas significan condiciones de estrés para las plantas, lo cual trae consigo una compensación limitada y, probablemente, un bajo rendimiento por planta (Angadi et al., 2013, Mulvaney et al., 2019). Al mismo tiempo, no hay que perder de vista que la carinata se caracteriza por un tamaño de semilla pequeño (entre 3 y 4 mg), lo que puede reducir drásticamente las posibilidades de un establecimiento exitoso (Zanetti et al., 2013). Dado esto y la

dificultad de la colocación precisa en profundidad, las tasas de siembra más bajas son un desafío con la mayoría de los equipos de siembra utilizados (Mulvaney et al., 2019), por lo que es necesario mediar entre la densidad económicamente óptima y la posibilidad de obtener una buena emergencia, es decir, una buena población de plantas.

3.2 LOGROS ALCANZADOS

En este trabajo se generó un importante aporte metodológico, ya que se obtuvo una extensa base de datos. Se etiquetaron 14000 plantas de forma manual, contabilizando el total de imágenes tomadas en el experimento. Esto es un valioso aporte en la detección de plantas y la primera en este cultivo. Uno de los objetivos específicos del trabajo (objetivo número 4) era el desarrollo de una metodología que permita la identificación de plantas de carinata de forma remota y fácil, que se pueda replicar en otros cultivos. En pos de este objetivo, el etiquetado manual es el primer eslabón, ya que actuó como entrenamiento del algoritmo que permitió el etiquetado automático de las plantas.

El método normalmente utilizado para evaluar las emergencias es el conteo manual de plantas (Jin et al., 2016, Sankaran et al., 2017). La obtención de imágenes y algoritmos de procesamiento ofrece una tecnología no invasiva y efectiva para evaluar las emergencias y segregar a las plantas de interés del fondo de la imagen. Contar con la identificación de plantas, repetido en una cantidad importante de veces, le permite al programa definir lo que es una planta, segregarlas del resto y así lograr su identificación simplemente sobre las imágenes, sin la necesidad de hacer ningún trabajo previo, siendo posible, en todo caso, solo realizar una corrección del trabajo realizado. Incluso se plantea la posibilidad de profundizar la labor al obtener ciertos rasgos descriptivos del crecimiento de las plantas, como la cobertura, la densidad o la altura de las plantas (Sankaran et al., 2017, Zhao et al., 2018).

Luego del etiquetado, fue posible otorgar a cada planta un id, es decir, una numeración con la cual se cuantificó a la población. Contar con esta identificación en cada momento permitió realizar una correspondencia entre plantas de manera individual a través del tiempo (Figura 16). Este es un importante logro, ya que fue

posible hacer un seguimiento de la población desde la etapa vegetativa hasta la cosecha. A cada planta presente se la representa con *sí* y las ausentes con *no* (figura 17). Al obtener las plantas ubicadas y con un número (id), sabiendo sus coordenadas, se observó para cada una su presencia/ausencia en los distintos momentos y se lo comparó en todo momento con las plantas medidas a cosecha, pudiendo hacer el seguimiento durante todo el cultivo. Este resultado preliminar fue generado tomando como criterio principal la ubicación o cercanía de cada planta de las imágenes en relación con las plantas cosechadas (dato real), resultando un método sencillo pero no exacto.

Este estudio se realizó solo para las parcelas que habían logrado la mejor correspondencia (10 % de las parcelas) según lo observado. Dentro de este grupo de plantas estudiadas, se observaron diversas situaciones. Hubo plantas identificadas por primera vez en T30, otras aparecían desde el inicio, pero en muchos casos aparecían y/o desaparecían de una fecha a otra (figura 17), lo cual puede deberse a muerte de plantas o a errores en la detección en algunos de los momentos. Con una mejor lectura e identificación de las plantas, es esperable lograr mejores resultados que posibiliten un mejor seguimiento de la población.

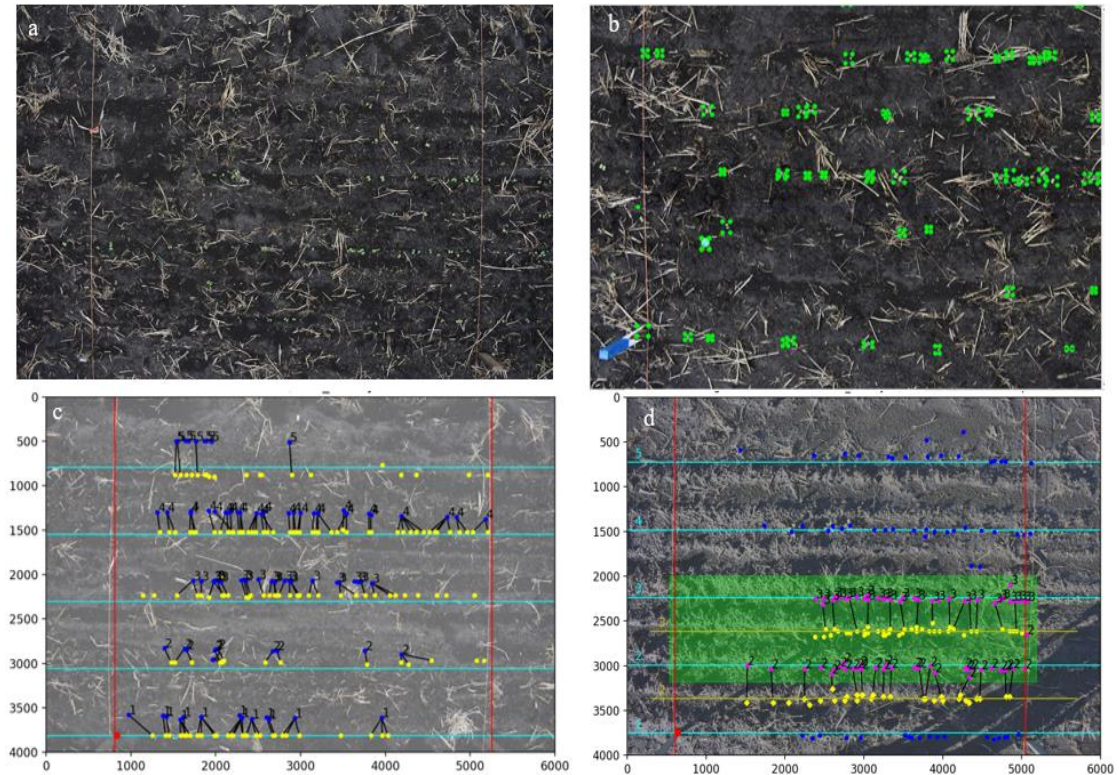


Figura 14. Procedimiento completo de etiquetado y correspondencia entre plantas medidas a través de las imágenes y manualmente en la cosecha. Imagen a campo de una de las parcelas en T20. (a) Imagen con el total de plantas etiquetadas (color verde). Se observan 5 surcos etiquetados, de los cuales 2 centrales fueron surcos cosechados. (b) Correspondencia entre la ubicación de las plantas obtenida a campo en la cosecha (color amarillo) y las plántulas ubicadas por el programa (color azul). Se observa una correspondencia no exacta. (c) Misma correspondencia que parte C, pero para los dos surcos cosechados (d).

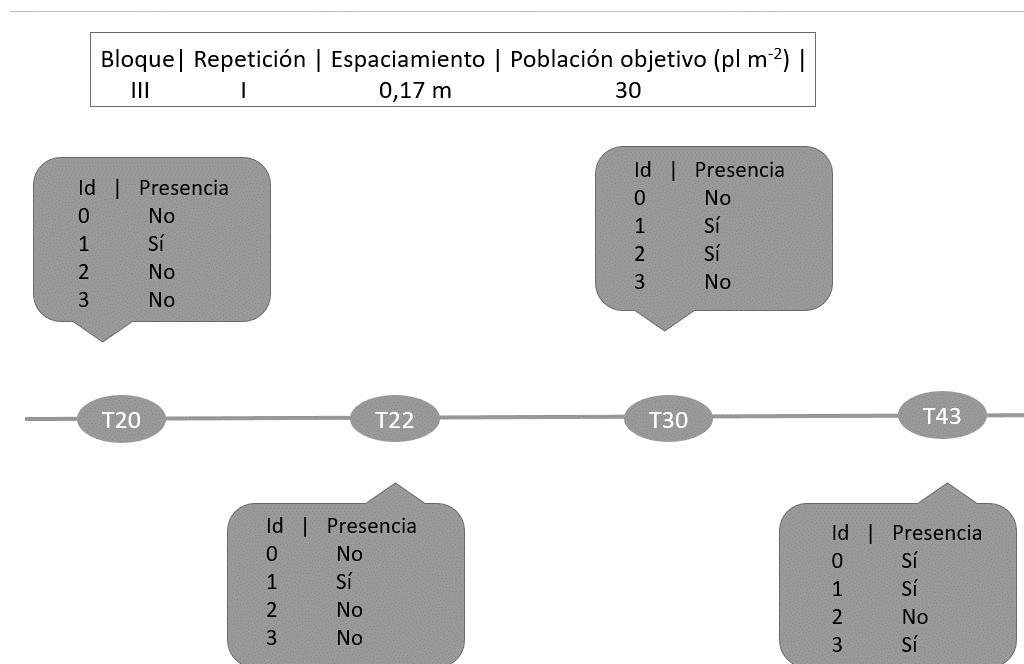


Figura 15. Línea del tiempo con los resultados obtenidos. Cada planta identificada tiene su id y se evalúa la presencia o ausencia en los distintos momentos de evaluación, utilizando como criterio de clasificación su ubicación (coordenadas en X e Y).

3.3 DIFICULTADES Y TAREAS PENDIENTES

A pesar de avanzar en el seguimiento de la dinámica poblacional, determinar el momento en el cual se dan las pérdidas de plantas es una tarea pendiente. La superposición entre plantas no permitió un mayor seguimiento luego de T43 (Figura 16), por lo que este método de imágenes es viable para observar la dinámica de emergencia y el comportamiento de las plántulas y plantas en las etapas iniciales, pero, para el seguimiento posterior, es necesario rever la metodología a emplear. La mayor pérdida de plantas puede darse en etapas avanzadas del cultivo, cuando la competencia por recursos se maximiza, podría ser floración y/o llenado. En este ensayo se observó un descenso de la población luego de los 30 días de siembra (estado de roseta) hasta la cosecha, por lo que pone en duda el momento donde se da la mayor pérdida de plantas, ya que podría comenzar desde etapas tempranas.



Figura 16. Imagen tomada a 40 días de sembrado el ensayo, donde se observa una gran dificultad en la identificación de cada planta.

La experiencia generada permite identificar las limitantes a levantar en trabajos futuros. Resulta necesario obtener imágenes idénticas en cada instancia, desde el mismo punto, centradas, que generen una visualización clara de toda la parcela y todas las plantas, sin superposiciones que dificulten su identificación. Previo a la siembra, es necesario ajustar una serie de aspectos claves que permitan obtener imágenes exactas. La delimitación del área de estudio debe ser de tal forma que no se altere al pasar los días. El uso de piolas, las cuales se estiran, cortan, degradan o sufren alguna otra alteración, puede ocasionar diferencias en el foco de las imágenes, lo que después se traduce en diferentes ubicaciones, ya que se altera la extrapolación de pixel a centímetros. Es necesario disponer de una marca clara y concisa para la colocación del soporte fotográfico, que permita su colocación exacta en todo momento. La colocación de objetos guía resulta clave en la etapa de calibración como en el enfoque de la cámara. Un aspecto a mejorar en este sentido es

la utilización de los objetos adecuados, ya que se usaron tapas plásticas en lugar de, por ejemplo, dameros con medidas.

El clima es un factor a tener en cuenta, ya que limita la toma periódica de las imágenes. Eventos de lluvias y vientos no permitieron, en este ensayo, mantener un intervalo regular entre los distintos días en los que se tomaron las imágenes. Es necesario tomar las imágenes en el mismo horario repetidamente para evitar efectos de sombreado y lograr la misma luminosidad. Otros aspectos que generan cierta dificultad en este tipo de cultivo, y que quizás no sea problema en otros como maíz o girasol, es el tamaño de las plántulas. La densidad y espaciamientos comúnmente utilizados y la superposición de hojas que tiene el cultivo cuando se emplean densidades altas limita el tiempo en el que las plantas se logran identificar sin error. Muchos pueden ser los motivos por los cuales los tallos de las plantas se arqueen, como, por ejemplo, alta densidad o qué tan laboreado se encuentre el suelo, lo que ocasiona fallas en la medición de las coordenadas de las plantas y dificultades en el seguimiento de cada una de ellas. Además de las labores previas y las dificultades biológicas propias del cultivo, se pueden presentar problemas operativos no previstos. Es necesaria la verificación de las condiciones en cada sección. Una estaca que se mueve, efectos del clima u agentes bióticos pueden generar variantes en la medición y, por ende, en el resultado.

Existen otras posibles mediciones a realizar sobre las plantas que permitan hacer una buena correspondencia, además de la ubicación. Zhao et al. (2018) usaron para el recuento de plantas de canola en etapas de crecimiento temprano el área, la relación longitud-ancho y la altura de las plantas, con muy buenos resultados en detección de plantas y valoración de calidad de siembra. Las características que se pueden obtener de las plantas, como fue en el caso de Zhao et al. (2018), permiten identificar y diferenciar cada planta de manera más fácil y con bajo nivel de error. Al obtener una correlación exacta entre plantas, sabiendo distintos parámetros como fecha de emergencia, conformación del «vecindario» de cada planta, altura, ancho u otros, donde cada una de estas esté correctamente identificada desde etapas iniciales, es posible determinar su efecto en el rendimiento final. En el objetivo de entender el comportamiento productivo final de las plantas de carinata, contar con la dinámica

temporal completa y caracteres claves descriptivos del crecimiento podría aportar grandes avances en el tema. En este trabajo, se midieron, para un pequeño grupo de plantas, ciertos parámetros iniciales como altura y ancho de la planta (figura 19), labor que se deberá continuar y profundizar en futuros trabajos.

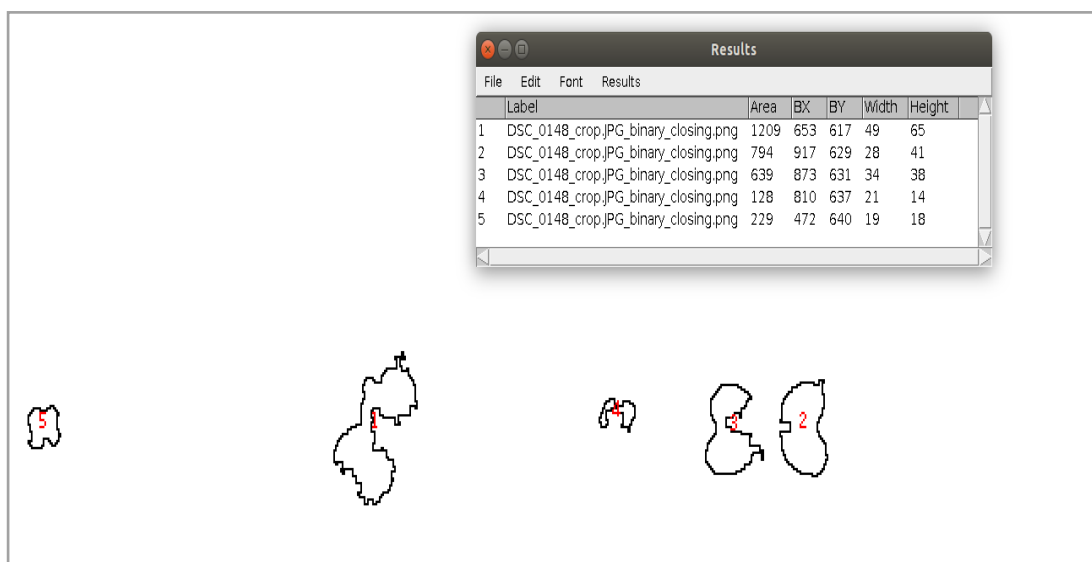


Figura 17. Ejemplo para 5 plantas de carinata identificadas, donde se determinaron coordenadas, área, ancho y altura. Contar con esta información para una población relevante de plantas permitirá relacionar con el rendimiento y evaluar su efecto en la producción final de cada planta.

3.4 RESUMEN FINAL

El trabajo permitió observar la falta de respuesta del cultivo de carinata al arreglo espacial logrado. Esta variable según distintos tratamientos de densidad y espaciamiento utilizado no afectó de manera significativa al rendimiento. En busca del objetivo de entender el rendimiento logrado, se pretendía observar el efecto del arreglo temporal, la dinámica de emergencias y muertes que se daban desde etapas tempranas y durante todo el cultivo y estudiar su efecto. Si bien este enfoque quedó inconcluso, se pudieron lograr grandes avances en la metodología para el estudio de la dinámica temporal. Se tomaron registros fotográficos en distintos momentos, con las cuales se generó una gran base de datos con plantas identificadas de manera manual. Esto permitió el entrenamiento de un algoritmo para el etiquetado

automático de las plantas, lo que habilitó a comparar ambos métodos. Se desarrollaron pautas metodológicas que deben mejorar, pero sirven como base para estudios posteriores. Lograr una imagen iluminada, nítida y, sobre todo, idéntica en cada momento es el primer paso para la detección. Se deben ajustar los momentos, ya que, por el tipo de cultivo y siembra utilizada, ocurre superposición de plantas a los 40 días de la siembra. Para unas pocas plantas se generó una numeración (id) individual y se realizó una correlación entre las plantas ubicadas mediante fotos en etapas tempranas y las ubicaciones logradas en la cosecha, con un resultado inexacto que evidencia falencias que deben ser corregidas. Para un grupo aún más menor de plantas se pudieron obtener otros datos relevantes como el área o su ancho, lo cual puede ser un método a utilizar en el futuro para la correcta identificación de las plantas. Contar con esta información posibilitará hacer el seguimiento de la población y estudiar la significancia de la dinámica temporal en el rendimiento final, ya sea por planta o por unidad de superficie.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Alemaw G. 2003. Review on breeding of Ethiopian Mustard. Institute of Agricultural Research, Holetta Research Centre. P.O. Box 2003 Addis Ababa, Ethiopia. 593-597
- Amaral MK, Netto P, Figueiredo F. 2015. Evaluation of the Morisita Index for determination of the spatial distribution of species in a fragment of *Araucaria forest*. Applied ecology and environmental research. Vol. 13(2): 361-372.
- Andrade FH, Abatte PE, 2005. Response of Maize and Soybean to Variability in Stand Uniformity. Agronomy Journal, Vol. 97:1263-1269.
- Angadi SV, Cutforth HW, McConkey BG, Gan Y. 2013. Yield adjustment by canola grown at different plant populations under semiarid conditions. Crop Science. Vol. 43: 1358-1366.
- Badii MH, Guillen A, Cerna E, Landeros J. 2011. Dispersión Espacial: El Prerrequisito Esencial para el Muestreo. Daena: International Journal of Good Conscience. 6(1) 40-71.
- Bonan GB. 2011. The Size Structure of Theoretical Plant Populations : Spatial Patterns and Neighborhood Effects. Ecological Society of America Stable. Ecology, Vol. 69(6): 1721-30. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/1941150>.
- Bybordi A, Tabatabaei J. 2009. Effect of Salinity Stress on Germination and Seedling Properties in Canola Cultivars (*Brassica napus* L.). Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 37 (1) 2009, 71-76.
- Cardone M, Mazzoncini M, Menini S, Rocco V, Senatore A, Seggiani M, Vitolo S. 2003. Brassica carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy : agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization. Biomass and Bioenergy, Vol. 25: 623-36.
- Coll L. 2010. Ciclo, densidad y fecha de siembra de colza en relación con el rendimiento. Grupo de Ecofisiología Vegetal y Manejo de Cultivos. INTA EEA Paraná.
- Fernández SO. 1991. Transferencia genética entre las especies cultivadas de

- Brassica. Sevilla, España. Universidad de Sevilla. pp. 28-33
- Fischer RA, Miles RE. 1973. The Role of Spatial Pattern in the Competition between Crop Plants and Weeds. A Theoretical Analysis. *Mathematical Biosciences* 18, 335-350.
- García Préchac F. 2004. Cultivo continuo en siembra directa o rotaciones de cultivos y pasturas en suelos pesados del Uruguay. *Revista Científica Agropecuaria* 8(1): 23-29.
- Geisler G, Stoy A. 1987. Untersuchungen zum Einfluß der Bestandesdichte auf das Ertragspotential von Rapspflanzen (*Brassica napus* L. var. *napus*). *Journal of Agronomy and Crop Science*. Vol. 159(4): 232-40.
- Golay J, Kanevski M, Vega Orozco CD, Leuenberger M. 2014. The multipoint Morisita index for the analysis of spatial patterns. *Physica A* 406 (2014) 191-202.
- Griepentrog HW. 1999. Zur Bewertung der Flächenverteilung von Saatgut. The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen. *Agrartechnische Forschung* 5 H. 2, S. 117-124.
- _____, Olsen JM, Weiner J. 2009. The Influence of Row Width and Seed Spacing on Uniformity of Plant Spatial Distributions. KU-LIFE, Copenhagen, Denmark. VDI-Berichte Nr. 2060.
- Hossain G, Johnson EN, Blackshaw RE, Liu K, Kapiniak A, Gampe G, Molnar L, Luan L, Poppy L, Gan Y. 2018. Agronomic Responses of *Brassica carinata* to Herbicide, Seeding Rate, and Nitrogen on the Northern Great Plains. *Crop Science*. Vol. 58: 2633-2643.
- Hühn M. 1987. Stability Analysis of Winter-rape (*Brassica napus* L.) by Using Plant Density and Mean Yield per Plant. Institute of Crop Science and Plant Breeding. Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- _____. 1998. Theoretical results on the effects of nonregular spatial patterns of plants on yield per area. *Journal of Agronomy and Crop Science*. Vol. 182(1): 1-7.
- _____. 1999. Theoretical results on the effects of nonregular spatial patterns of plants on yield per area. *Journal of Agronomy and Crop Science*. Vol. 182(1):

1-7.

- _____. 2000. Note on the Effect of Non-regular Spatial Patterns of Plants on Yield per Area Based on a Logarithmic Relationship between Single Plant Yield and Individual Area. Institute of Crop Science and Plant Breeding. Christian-Albrechts-Universität Kiel. Kiel, Germany.
- Jin X, Liu S, Baret F, Hemerlé M, Comar A. 2016. Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery. *Remote Sensing of Environment* 198 (2017) 105-114. En línea. Marzo 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.007>.
- Kristensen L, Olsen J, Weiner J, Griepentrog HW, Nørremark M. 2006. Describing the spatial pattern of crop plants with special reference to crop-weed competition studies. *Field Crops Research* Vol. 96: 207-215.
- Kuai J, Sun Y, Zuo Q, Huang H, Liao Q, Wu C, Lu J, Wu J, Zhou G. 2015. The yield of mechanically harvested rapeseed (*Brassica napus* L.) can be increased by optimum plant density and row spacing. *Nature Research. Scientific Reports*. 5 (18835): 1-14. En línea. Febrero 2019. <https://www.nature.com/articles/srep18835>.
- Leon RG, Ferrell JA, Mulvaney MJ. 2017. Carinata tolerance to preemergence and postemergence herbicides. *Weed Technol.* 31:877–882. DOI:10.1017/wet.2017.62.
- Mead R. 1966. A Relationship between Individual Plant-spacing and Yield. National Vegetable Research Station, Wellesbourne. *Annals of Botany, N.S.* Vol. 30, No. 118.
- Mithen R, Harper JL, Weiner J. 1984. Growth and mortality of individual plants as a function of available area. *Oecologia (Berlin)* 62:57-60
- Mulvaney MJ, Leon RG, Seepaul R, Wright DL, Hoffman TL. 2019. Brassica carinata Seeding Rate and Row Spacing Effects on Morphology, Yield, and Oil. *Agronomy Journal*. Vol. 111: 528-535.
- Moller B, Meikle C. 2018. Evaluación y caracterización de genotipos avanzados de Brassica carinata A. Braun como alternativa de producción invernal en Uruguay. 2018. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. 21, 58 p.

- Morris NL, Miller PCH, Orson JH, Froud-Williams RJ. 2009. The effect of wheat straw residue on the emergence and early growth of sugar beet (*Beta vulgaris*) and oilseed rape (*Brassica napus*). *European Journal of Agronomy*. Vol. 30(3): 151-62.
- Nafziger ED, Carter PR, Graham EE. 1991. Response of Corn to Uneven Emergence. *Crop Science*, vol. 31: 811-815.
- Otsu N. 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1): 62-66.
- Pan X, Caldwell CD, Falk KC, Lada R. 2012. The effect of cultivar, seeding rate and applied nitrogen on *Brassica carinata* seed yield and quality in contrasting environments. *Canadian Journal of Plant Science*, 92: 961-971. DOI: 10.4141/CJPS2011-169
- Puente MP. 2015. Métodos de segmentación de imágenes de textura. Optimización del método Otsu. Tesis para obtener el título de magíster en Análisis y Procesamiento de Imágenes. Universidad Nacional de Córdoba. 1-20 pp.
- Rodríguez Herranz J. 2016. Desarrollo del control visual de un UAV para el seguimiento de líneas de cultivos. Tesis ingeniero en Robótica. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid. 38 p.
- Ross MA, Harper JL. 1972. Occupation of biological space during seedling establishment. *British Ecological Society. Journal of Ecology* Vol. 60, nº1. En línea. Abril 2021. <http://www.jstor.org/stable/2258041>.
- Rutto E, Daft C, Kelly J, Khim Chim B, Mullock J, Torres G, Raun W. 2014. Effect of Delayed Emergence on Corn (*Zea Mays* L.) Grain Yield. *Journal of Plant Nutrition* 37(2): 198-208.
- Sankaran S, Quirós JJ, Knowles R, Knowles LO. 2017. High-Resolution Aerial Imaging Based Estimation of Crop Emergence in Potatoes. *American Journal of Potato Research*. Res. 94, 658–663. DOI 10.1007/s12230-017-9604-2.
- Satorre E, Benech R, Slafer G, De la Fuente E, Miralles D, Otegui M, Savin R. 2003. Producción de granos; bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 783 p.
- Scarth R, Tang J. 2006. Modification of Brassica Oil Using Conventional and

- Transgenic Approaches. Crop Science, vol. 46. DOI:10.2135/cropsci2005.08-0245.
- Seepaul R, George S, Wright DL. 2016. Comparative response of *Brassica carinata* and *B. napus* vegetative growth, development and photosynthesis to nitrogen nutrition. University of Florida, North Florida Research and Education Center, Quincy, United States. Industrial Crops and Products. Vol. 94: 872–883.
- _____, Marois J, Small IM, George S, Wright DL. 2019. *Carinata* Dry Matter Accumulation and Nutrient Uptake Responses to Nitrogen Fertilization. Agronomy Journal. Volume 111:1-9.
- _____, Kumar S, Boote KJ, Small IM, George S, Wright DL. 2021. Physiological analysis of growth and development of winter *carinata* (*Brassica carinata* A. Braun). GCB Bioenergy. 2021; 00:1–22. DOI: 10.1111/gcbb.12831.
- Setia R, Bhathal G, Setia N. 1995. Influence of paclobutrazol on growth and yield of *Brassica carinata* A. Plant Growth Regulation 16:121-127. DOI: 10.1007/BF00029532.
- Sierts HP, Léon J, Geisler G, Diepenbrock W. 1987. Stability of Yield Components from Winter Oil-Seed Rape (*Brassica napus* L.) Journal of Agronomy and Crop Science. Vol. 158: 107-13.
- Sincik M, Goksoy TA, Turan MZ. 2010. Influence of sowing properties on winter oilseed rape in a sub-humid Mediterranean environment. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici. 38 (1): 171-175.
- Taylor DC, Falk KC, Don Palmer C, Hammerlindl J, Babic V, Mietkiewska E, Jadhav A, Marillia EF, Francis T, Hoffman T, Giblin EM, Katavic V, Keller WA. 2010. *Brassica carinata* – a new molecular farming platform for delivering bio-industrial oil feedstocks: case studies of genetic modifications to improve very long-chain fatty acid and oil content in seeds. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 4:538–561.
- Watkinson AR, Lonsdale WM, Firbank LG. 1983. A Neighbourhood Approach to Self-thinning. Oecologia (Berlin) (1983) 56:381-384.
- Zanetti F, Vamerali T, Mosca G. 2009. Yield and oil variability in modern varieties of high-erucic winter oilseed rape (*Brassica napus* L. var. *oleifera*) and

Ethiopian mustard (*Brassica carinata* A. Braun) under reduced agricultural inputs. *Industrial Crops and Products*. Vol. 30: 265-70.

_____, Monti A, Berti MT. 2013. Challenges and opportunities for new industrial oilseed crops in EU-27: A review. *Industrial Crops and Products* 50 (2013) 580-595.

Zhao B, Zhang J, Yang C, Zhou G, Ding Y, Shi Y, Zhang D, Xie J, Liao D. 2018. Rapeseed Seedling Stand Counting and Seeding Performance Evaluation at Two Early Growth Stages Based on Unmanned Aerial Vehicle Imagery. *Frontiers in Plant Science*. DOI: 10.3389/fpls.2018.01362.