

Aplicando la ciencia de la polinización en la producción de *Brassica carinata*

Orellano, E¹; Pacini, A¹; Manfrino, R¹; Ceccotti, M¹; Rosetti, L¹; Ochoa, E¹& Cavigliasso, P².

¹IdICaL-EEA INTA RAFAELA

²EEA INTA MARCOS JUAREZ

Resumen

La polinización biótica constituye un servicio ecosistémico clave para la producción agrícola, particularmente en cultivos con dependencia de los insectos polinizadores. *Brassica carinata* es una oleaginosa de creciente interés productivo en el centro de Argentina, destinada principalmente a usos industriales y a la producción de biocombustibles. Su sistema reproductivo sugiere una alta sensibilidad a la presencia de polinizadores, sin embargo, la información sobre el efecto de la polinización entomófila en su productividad es aún limitada. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la polinización biótica sobre la producción de *B. carinata* en condiciones reales de producción, analizando componentes de rendimiento, tales como el número de siliculas y semillas, así como sus atributos de calidad.

El estudio se llevó a cabo durante la campaña invernal 2025 en un lote de la ciudad de Rafaela (Santa Fe, Argentina) comparando dos tipos de polinización: i) autopolinización mediante la exclusión de insectos y ii) polinización biótica con libre acceso de polinizadores, incluyendo colmenas manejadas de *Apis mellifera* en el sistema. Se cuantificaron variables reproductivas y productivas asociadas al cuajado de frutos y a la producción de semillas, y los datos fueron analizados mediante modelos estadísticos avanzados (GLM y GLMM) para comparar ambos tratamientos.

La polinización biótica incrementó significativamente todas las variables de rendimiento evaluadas en comparación con la autopolinización; sin embargo, no se registraron efectos sobre la calidad de las semillas. El tratamiento con agentes bióticos presentó valores superiores en la cantidad de siliculas (+34%), en el número de semillas por silicua (+30%) y en el peso de semillas por unidad de superficie (+37%). Si bien el peso individual de la semilla fue un 11% mayor en el tratamiento de autopolinización, este parámetro no alcanza para compensar la reducción en los demás componentes del rendimiento. Como control de la biomasa por unidad de superficie se utilizó el número de plantas y la cantidad de materia seca por metro cuadrado, no observándose diferencias estadísticas. Además, se observó una asociación positiva entre la frecuencia de visita de *A. mellifera* y el porcentaje de formación de siliculas, lo que indica una mayor eficiencia reproductiva asociada a una mayor actividad de los polinizadores.

En conjunto, los resultados indican que la autopolinización exclusiva en *B. carinata* constituye un escenario con déficit de polinización, mientras que la polinización entomófila permite optimizar la eficiencia reproductiva, lo cual se traduce en un incremento del potencial productivo del cultivo. Estos hallazgos resaltan la importancia de integrar la polinización como un componente del manejo agronómico de *B. carinata*, ya sea mediante la conservación de polinizadores silvestres o la

incorporación planificada de colmenas manejadas, resultando una estrategia clave para mejorar la estabilidad y sostenibilidad productiva de este cultivo en los sistemas agrícolas del centro de Argentina.

Palabras claves: *Brassica carinata*; Polinización; *Apis mellifera*; Producción; Valor económico.

1. INTRODUCCIÓN

La polinización constituye uno de los servicios ecosistémicos más estudiados a nivel mundial (**Dainese et al., 2019; Gazzea et al., 2023**), dado que aproximadamente el 80 % de las plantas con flores dependen de este proceso y que su contribución mejora la producción del 75 % de los cultivos de importancia económica a escala global (**Breeze et al., 2016**). En este contexto, la disminución de los polinizadores, tanto en términos de abundancia como de riqueza de especies, se ha destacado como un problema relevante debido al riesgo de disminución en la polinización de los cultivos y, en consecuencia, su producción (**Potts et al., 2010; Dicks et al., 2016; IPBES, 2016**).

La conservación de hábitats seminaturales cerca de áreas de producción intensiva es necesaria para proporcionar refugios adecuados a los polinizadores y otros insectos (**Tscharntke et al., 2005; Kremen et al., 2007; Ricketts et al., 2008; Garibaldi et al., 2016; Cavigliasso et al., 2022**). De este modo, se favorece el mantenimiento de los servicios ecosistémicos en los agroecosistemas y se generan efectos positivos en el rendimiento de los cultivos (**Gagic et al., 2019; González et al., 2020; Mazzei et al., 2021; Levenson et al., 2022**). Sin embargo, si bien la polinización entomófila constituye un servicio ecosistémico importante para muchos cultivos (**Klein et al., 2007; Giannini et al., 2015; Siopa et al., 2023**), el grado en que los polinizadores limitan actualmente la producción agrícola aún es poco conocido, especialmente en sistemas de producción extensiva (**Reilly et al., 2020**).

Si bien los polinizadores son parte integral de los agroecosistemas, y su rol en la producción de alimentos es ampliamente reconocido, las estimaciones sobre su contribución en la productividad y en la rentabilidad de los sistemas agrícolas continúa siendo escasa (**Basualdo et al., 2022; Basualdo & Cavigliasso, 2023; Giannini et al., 2015**). Generalmente, los paquetes tecnológicos utilizados en la agricultura no incluyen a la polinización entomófila como un factor de importancia productiva. En este sentido, si bien se cuantifican las pérdidas asociadas a deficiencias en el manejo integral, como el raleo, la poda, aspectos nutricionales, control de plagas y manejo del riego, rara vez se consideran las pérdidas derivadas por una polinización deficiente.

Brassica carinata (A. Braun) es un cultivo oleaginoso de creciente interés a nivel global y regional, impulsado por su aptitud para la producción de aceites industriales y biocombustibles, así como por su incorporación como cultivo invernal en sistemas agrícolas extensivos (**Gesch et al., 2015; Zanetti et al., 2020**). El rendimiento promedio de *B. carinata* en la región Centro de Argentina, principalmente

en la provincia de Córdoba y Santa Fe, puede variar significativamente de un año a otro debido a factores como las condiciones climáticas, prácticas de manejo agrícola y la calidad del suelo. Sin embargo, en general, los rendimientos promedio suelen ser de entre 1,4 a 1,8 toneladas por hectárea, pudiendo alcanzar las 2,5-2,6 toneladas por hectárea en años favorables y condiciones óptimas. En Argentina y otros países de América del Sur, la expansión de la carinata se asocia a estrategias de diversificación productiva y a su adaptación a ambientes marginales o de transición, donde puede complementar rotaciones dominadas por cultivos estivales (**Zuil et al., 2022**). A pesar de su importancia creciente, el conocimiento sobre los procesos ecológicos que regulan su productividad, y particularmente sobre el rol de la polinización entomófila, sigue siendo limitado en comparación con otros cultivos oleaginosos consolidados.

Desde el punto de vista reproductivo, el cultivo presenta un sistema predominantemente alógamo, con grados variables de autocompatibilidad según el genotipo, pero con una fuerte dependencia de la polinización cruzada para maximizar el cuajado de frutos y el rendimiento (**Rakow & Woods, 1987; Self et al., 1999**). Al igual que otras especies del género *Brassica*, sus flores hermafroditas, abiertas y ricas en néctar y polen favorecen la visita de una amplia diversidad de insectos, lo que posiciona a la polinización biótica como un componente central de su biología reproductiva (**Free, 1993; Delaplane & Mayer, 2000**). Estudios experimentales en Brassicáceas han demostrado que la exclusión de polinizadores reduce significativamente el número de silicuas por planta, el número de semillas por silicua y el peso de las semillas, evidenciando que la autofecundación resulta insuficiente para alcanzar el potencial productivo del cultivo (**Morandin & Winston, 2005; Bommarco et al., 2012**).

La eficiencia reproductiva se encuentra estrechamente vinculada a la transferencia efectiva de polen entre flores y entre plantas, proceso que depende en gran medida de la actividad de los polinizadores. En *Brassica napus* y especies afines, se ha observado que la polinización entomófila incrementa la deposición de polen viable sobre el estigma, mejora la fecundación de los óvulos y aumenta tanto el número como la uniformidad de las semillas producidas (**Sabbahi et al., 2005; Bartomeus et al., 2014**). Asimismo, la polinización cruzada favorecida por insectos puede mejorar atributos de calidad de la semilla, incluyendo el peso individual y el contenido de aceite, aspectos críticos para cultivos destinados a usos industriales y energéticos (**Pierre et al., 2010; Bommarco et al., 2012**).

La dependencia de la carinata a los polinizadores no es constante, sino que varía en función de factores ambientales y agronómicos. Variables como la temperatura, la disponibilidad hídrica y la fertilidad del suelo influyen sobre la duración de la floración, la viabilidad del polen y la receptividad estigmática, modulando así la contribución relativa de la polinización biótica (**Mesquida & Renard, 1982; Sutter et al., 2018**). En ambientes donde el estrés térmico o hídrico limita la autofecundación, la actividad de

los polinizadores adquiere una importancia aún mayor para sostener el rendimiento, fenómeno ampliamente documentado en cultivos del género *Brassica* (**Clough et al., 2014; Perrot et al., 2019**).

Las abejas melíferas (*Apis mellifera*) se encuentran entre los principales visitantes florales de *B. carinata* y de otras Brassicáceas cultivadas, debido a la elevada oferta de néctar y polen durante el período de floración (**Free, 1993; Westcott & Nelson, 2001**). Su alta constancia floral y sus elevadas tasas de visita las convierten en vectores eficientes de polen, contribuyendo significativamente al aumento del rendimiento (**Sabbahi et al., 2005; Morandin & Winston, 2006**). Desde una perspectiva apícola, estos cultivos representan además un recurso forrajero estratégico, especialmente en paisajes agrícolas simplificados donde la oferta floral alternativa es escasa (**Rollin & Garibaldi, 2019**).

No obstante, la intensificación agrícola y la pérdida de hábitats seminaturales han provocado una disminución en la abundancia y diversidad de polinizadores silvestres, lo que puede generar déficits de polinización en cultivos dependientes como la carinata (**Garibaldi et al., 2013; Potts et al., 2016**). En este contexto, la incorporación de colmenas manejadas emerge como una herramienta potencial para compensar la pérdida de servicios de polinización, particularmente en sistemas extensivos de gran escala (**Bartomeus et al., 2014**). Sin embargo, los estudios que integren explícitamente la polinización como un componente del manejo agronómico del cultivo, considerando su aporte productivo y económico en condiciones reales de producción, son aún escasos.

Profundizar el conocimiento sobre el rol de la polinización entomófila resulta clave para optimizar el manejo de *B. carinata*, mejorar la estabilidad del rendimiento y avanzar hacia sistemas productivos más sustentables. Generar evidencia empírica sobre la influencia de la actividad de los polinizadores en la formación de silicuas, así como el número y la calidad de las semillas, permitirá sustentar estrategias de manejo integradas que reconozcan a la polinización como un servicio ecosistémico relevante dentro de los sistemas agrícolas basados en Brassicáceas.

La contribución de la polinización biótica a la producción de carinata podría ser muy importante dado que aumenta la deposición de polen, además de diversos parámetros productivos. Los objetivos del presente estudio fueron: a) estimar el efecto de la polinización biótica sobre la cantidad y calidad de semilla de carinata, b) determinar la contribución de *Apis mellifera* y su grado de interacción con las flores de carinata en lotes productivos, y c) evaluar la rentabilidad de un servicio profesional de polinización.

2. METODOLOGIA

2.1.Zona de estudio.

El área bajo estudio se encuentra en el departamento Castellanos (Lat: 31° 11' 03.06'' S; Lon: 61° 39' 37.24'' W) y cuenta con 33 ha totales. El lote utilizado consta de una lengua de área natural (macizo arbóreo con vegetación remanente) de aproximadamente 50 m de ancho y 300 m de largo (**Fig. 1**) permitiendo aportar información sobre los efectos dados por especies silvestres de polinizadores.

El cultivo se implantó sobre un suelo Argiudol típico (Serie Rafaela), de textura franco-limosa, según la clasificación de la USDA Soil Taxonomy, con un Índice de productividad de 80.

Durante la campaña 2025, *B. carinata* fue sembrada el 10 de mayo de 2025 con una distancia entre surcos de 20 cm. El 18 de agosto de 2025, de acuerdo con la escala fenológica de CETIOM, se determinó que el cultivo se encontraba en plena floración (F2), momento a partir del cual se inició la etapa experimental. La cosecha se realizó el 10 de octubre de 2025.

2.2.Diseño experimental

El estudio fue diseñado para comparar variables productivas asociadas a la cantidad y calidad de las semillas entre tratamientos reproductivos (autopolinización vs. polinización biótica) en *B. carinata*. Al mismo tiempo, al momento de definir la ubicación de las parcelas evaluadas, se implementó un diseño espacialmente explícito que permitió analizar la variabilidad de los datos en relación con una serie de factores fijos, tales como la distancia a la fuente de abejas melíferas y la frecuencia de interacción de polinizadores.

Cada unidad experimental consistió en la totalidad de plantas presentes en una superficie de 1 m². En dicha superficie, se estimó la formación de frutos, la relación entre las silicuas formadas en función de las flores iniciales, el llenado de las silicuas (número de semillas/fruto) y la calidad de las semillas que fue evaluada a través del peso (peso de 1000 semillas, peso / m²) y su perfil nutricional (proteína, extracto etéreo).

Para el tratamiento de *Polinización Biótica* (PO) se seleccionaron ocho parcelas, dispuestas mediante un diseño espacialmente explícito dentro del lote, de manera que la localización de cada una represente la variabilidad edáfica y, al mismo tiempo, se sitúe a diferentes distancias de la fuente de polinizadores (ubicación de las colmenas).

Para el tratamiento de *Autopolinización* (AU) se realizaron jaulas de exclusión con estructura de hierro nervado de 6 mm y sobre la misma se colocó una tela de tul de color blanco (**Fig. 2**). Se utilizó este material de exclusión ya que es translúcido, tiene un bajo porcentaje de reducción de la irradiación (~ 3%) y no tiene filtros UV. Se distribuyeron cinco jaulas de exclusión dentro del lote, ubicadas de forma contigua a las cinco parcelas correspondientes al tratamiento de polinización biótica. El gradiente de separación entre las jaulas y las colmenas fue de 15 m, comenzando la jaula 1 a los 15 m y finalizando la jaula 5 a los 75 m de distancia. (**Fig. 1**).

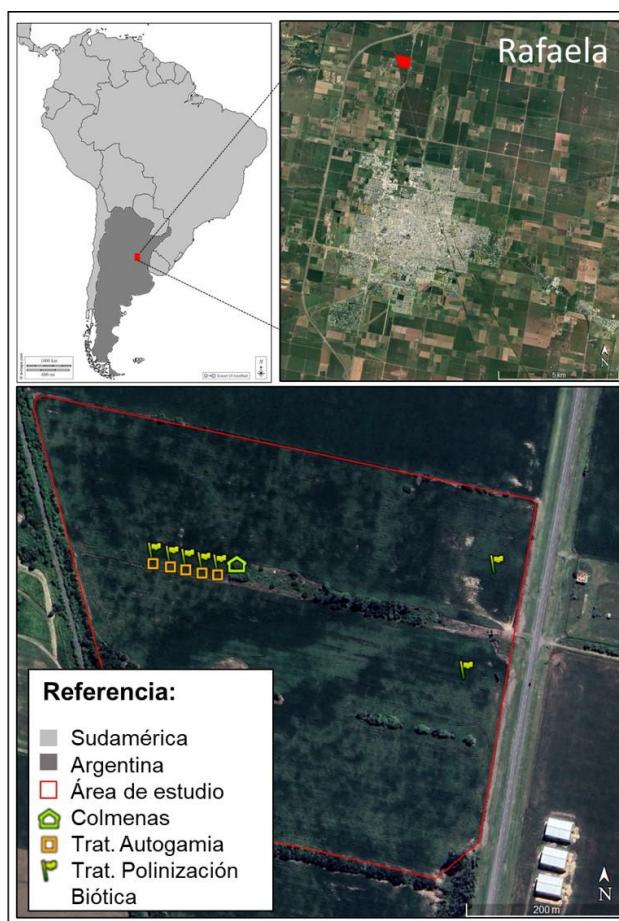


Figura 1. Ubicación del lote de estudio. Se presentan los límites definidos a la toma de datos y los puntos de muestreo designados de forma espacialmente explícita.

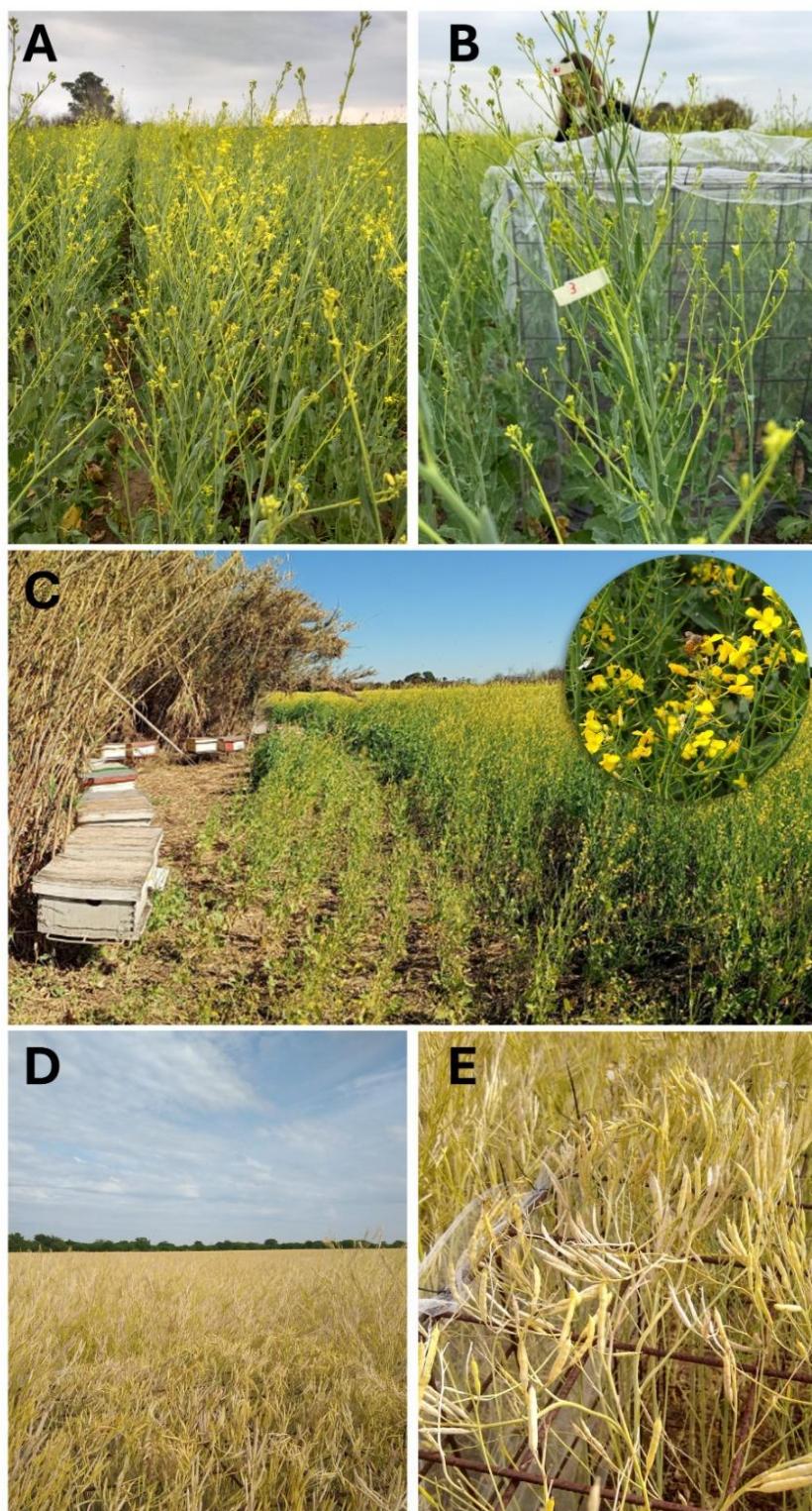


Figura 2. **A)** Lote de *B. carinata* en floración. **B)** Jaulas de exclusión utilizadas para el tratamiento de Autopolinización **C)** Colmenas utilizadas para el servicio de polinización (detalle de abeja melífera en flor de *B. carinata*), **D)** Lote previo a la cosecha, **E)** Silicuas.

En el centro del lote y dentro de un área acondicionada para tal fin, se introdujeron 31 colmenas distribuidas a lo largo de 50 m lineales. Las mismas ingresaron dentro del lote el 18 de agosto y se retiraron el 25 de septiembre de 2025. Fueron gestionadas de forma convencional, lo cual consiste en un manejo en grupos centrales situados dentro del campo y con un monitoreo semanal de su actividad de forrajeo. Este estilo de gestión es similar al que llevan a cabo apicultores de todo el mundo en el marco de servicios de polinización profesionales.

2.3. Recolección de datos

*2.3.1. Cultivo de *B. carinata*.*

Se seleccionaron tres plantas por unidad muestral durante la floración del cultivo (F2). En cada planta se identificaron tres nudos consecutivos del eje principal, ubicados en la zona central de la misma, donde se registró el total de flores iniciales y el número silicuas formadas. A partir de estos datos se calculó el cuajado de frutos, definido como la relación entre el número de silicuas formadas y el número inicial de flores.

Al momento de la cosecha, la totalidad de las plantas incluidas en cada parcela fue cosechada a mano y colocadas en bolsas individuales y se determinó la materia seca total. Las bolsas correspondientes a las 13 unidades muestrales fueron secadas mediante el protocolo PROMEFA-v2 (**AOAC, 1990 N°130.15 y N° 167.03**). Para la evaluación de la cantidad y calidad de las semillas de carinata, inicialmente se seleccionaron 100 silicuas por bolsa y se cuantificó el número de semillas por vaina. Posteriormente, las semillas totales de cada bolsa fueron cosechadas de manera independiente mediante una cosechadora experimental (*Wintersteiger*). Una vez cosechadas, se estimó el rendimiento y el peso de mil semillas para cada una de las muestras. Se estimó la proteína bruta y el extracto etéreo mediante los métodos de referencia estandarizados para especies forrajeras (**AOAC, 1998 N°976.05 y AOAC, 1999 N° 920.39 respectivamente**).

2.3.2. Actividad de las abejas.

La frecuencia de visitas a las flores se estimó de manera sistemática en todas las parcelas correspondientes al tratamiento de polinización biótica. Para ello, se realizaron censos visuales de polinizadores, registrando el número de flores visitadas por los polinizadores durante un período de 5 min (expresado como número de visitas por flor en 5 min). Cada censo incluyó un conjunto diferente de flores seleccionadas al azar con un promedio de 90 unidades florales por censo. Estos censos se realizaron el mismo día entre las 9 am - 4 pm, cambiando periódicamente el horario de censo en cada parcela para cubrir todo el rango horario a lo largo de las 13 fechas de censo distribuidas a lo largo de la floración (24 de agosto a 25 de septiembre de 2025). Los mismos se realizaron en días con un clima

favorable para el forrajeo de las abejas, días soleados a parcialmente soleados en horas donde la temperatura es adecuada para su actividad. En total, se realizaron 309 censos de polinizadores dentro del lote, totalizando 25.75 horas de observación (es decir, 3.2 hs por parcela).

2.4. Análisis de datos

Se utilizaron modelos generales lineales (GLM) o generalizados lineales mixtos (GLMM) para los análisis realizados (**Zuur et al., 2013**).

*Dependencia de *B. carinata* a la polinización biótica.*

En primer lugar, se analizó la relación entre la formación de silicuas en función del tratamiento de polinización para las flores de carinata. El número de silicuas formadas en cada conjunto de racimos florales estudiados se utilizó como variable de respuesta, y las flores iniciales de los mismos racimos se incluyeron en el modelo como variable "offset". La estructura aleatoria del modelo fue "Parcela", con una distribución de error de tipo Binomial negativa (link=log).

Cantidad y calidad de granos de carinata.

En los siguientes análisis, se cuantificaron los datos de: materia seca, plantas/m², peso de 1000, N° semillas/silículas, peso total/m², proteína bruta y extracto etéreo para cada parcela, requisito para poder asociar las diferentes variables y factores propuestos.

Las variables estimadas en cada parcela se utilizaron como respuestas, considerando el tratamiento como factor fijo. Los análisis se realizaron asumiendo una distribución de error de tipo gaussiana.

Efectos de la frecuencia de visita sobre la producción de carinata.

Para determinar el efecto de la frecuencia de visita/flor sobre el porcentaje de frutos formados, se utilizó como factor fijo la frecuencia de visita/flor promedio total y la de *Apis mellifera* de forma independiente.

Selección y cálculo de modelos.

Para seleccionar la mejor estructura para los GLM y GLMM, partimos de la estructura de modelo más sencilla y lógica. Utilizamos el criterio de información de Akaike (AIC) para seleccionar el modelo que mejor se ajustaba a nuestra variabilidad, seleccionando el modelo no nulo con el valor AIC más bajo (**Bates et al., 2014; Bates, 2015**). Utilizamos la función ANOVA del paquete "stats" para comparar modelos. Comprobamos los supuestos de los modelos presentados utilizando el paquete "performance" versión 0.10.2 (**Lüdecke et al., 2021**).

Todos los cálculos se realizaron con el software estadístico R versión 4.1.3 (**RStudio Team., 2015**). Se utilizaron las funciones *glm*, *glmer* y *glmer.nb* del paquete "lme4" versión 1.1-27.1 para determinar la significación de los modelos. Para la comparación de diferentes categorías correspondientes a un factor fijo, utilizamos la función *LSD.test* del paquete "agricolae" versión 1.3-5. Para los gráficos, utilizamos las herramientas gráficas del paquete "ggplot2" versión 3.3.5.

3. RESULTADOS

El ensamble de polinizadores de *B. carinata* fue determinado por un total de 10977 visitas, de las cuales el 92,68 % fueron de *Apis mellifera*. El 7,32 % de las visitas restantes se reparte entre abejas nativas (*Halictidae* y *Apidae*), moscas de diversas familias (*Syrphidae*, *Muscidae*, *Sarcophagidae*) y *Lepidópteros* en baja proporción.

La frecuencia media de visitas a las flores fue de 0,446 ($\pm 0,568$) visitas por flor cada cinco minutos. Este valor equivale a aproximadamente 5,4 visitas por flor por hora durante el período diurno

Las parcelas bajo polinización biótica presentaron un 34,15 % más de frutos cuajados en comparación con las correspondientes al tratamiento de autopolinización (GLMM, $\beta = 0.42$, SE = 0.13, Z = 3,31, $P = 0.0009$). En promedio, el 90,75 ($\pm 6,93$) % de las flores fructificaron en el tratamiento de polinización biótica, mientras que en las parcelas donde se excluyeron sus visitas cuajaron solo el 59,76 ($\pm 0,62$) % de las flores (**Fig. 3A; Tabla 1**).

A través de los datos obtenidos podemos inferir que el incremento de la frecuencia de visita de las abejas melíferas aumenta la probabilidad de formación de frutos (GLM, $\beta = 0.88$, SE = 0.39, $t = 2.26$, $P=0.0735$). (**Fig. 3B, Tabla 1**). Al respecto, se observa que la distribución que mejor se ajusta a los datos es la polinómica (cuadrática) con un $R^2 = 0.7892$.

Siguiendo la misma tendencia, las plantas de las parcelas bajo polinización biótica aumentaron un 30,35 % la producción de semillas por silicias que las plantas autopolinizadas (GML; $\beta = 3.42$, SE = 0.96, Z = 3.57, $P < 0.0044$) (**Fig. 4A**).

En este estudio, el rendimiento promedio bajo autopolinización fue de 1538,8 kg/ha, mientras que la polinización biótica incrementó el rendimiento hasta 2427,9 kg/ha lo que representa una diferencia de 889,1 kg/ha atribuible a la acción de los polinizadores.

La sumatoria de los efectos estimados en las variables productivas que repercuten sobre el peso total de las semillas por unidad de superficie resultó en un alza del 36,62 % de su media y una reducción del 20,93 % de su variabilidad de las parcelas de polinización biótica en comparación con las de autopolinización (Peso total/m²: $\beta = 88.91$, SE = 30.28, Z = 2.94, $P = 0.0135$) (**Fig. 4B**). A modo de

control, se comparó el número de plantas/m² y la materia seca de las parcelas con diferentes tratamientos de polinización, no observando diferencias significativas entre ambas estimaciones (**Tabla 1**).

Al comparar el contenido de proteína bruta y de extracto etéreo de las semillas cosechadas en ambos tratamientos, no se observaron diferencias significativas.

Tabla 1. Medidas resumen de las variables estimadoras de la cantidad y calidad de semillas de carinata y la eficiencia de la polinización biótica cuantificadas para cada tratamiento de polinización. Se presentan las medias (SD) y los estadísticos para cada GLM y GLMM seleccionado ($\Delta AIC > 2$). Medias con letras diferentes presentan diferencias significativas (*LSD Fisher*).

Variables respuesta	<i>Polinización</i>		Intercepto	Estimador	EE	Z	P	$\Delta\%^*$
	Biótica	Autógama						
Controles								
Nº plantas/m ²	40.25 (3.54)	41.40 (4.48)	41.40	-1.15	5.71	-0.20	0.8440	-
Materia Seca	92.44 (0.49)	92.39 (0.62)	92.39	0.05	0.79	0.06	0.9502	-
Productividad								
Formación de frutos (%)	90.75 (6.93) A	59.76 (6.00) B	4.09	0.42	0.13	3.31	0.0009	34,149
Nº semillas / Silicua	11.27 (0.59) A	7.85 (0.75) B	7.85	3.42	0.96	3.57	0.0044	30,346
Peso 1000 semillas (g)	3.46 (0.11) B	3.90 (0.13) A	3.90	-0.44	0.17	-2.68	0.0231	11,282
Peso semillas/m ² (g)	242.79 (18.78) A	153.88 (23.75) B	153.88	88.91	30.28	2.94	0.0135	36,620
Calidad								
Proteína Bruta (PB)	19.70 (0.98)	19.31 (1.24)	19.31	0.39	1.59	0.24	0.8123	-
Extracto Etéreo (EE)	45.08 (1.80)	43.56 (2.28)	43.56	1.52	2.91	0.52	0.6118	-

*Δ%: Representa la diferencia porcentual entre las medias de cada tratamiento.

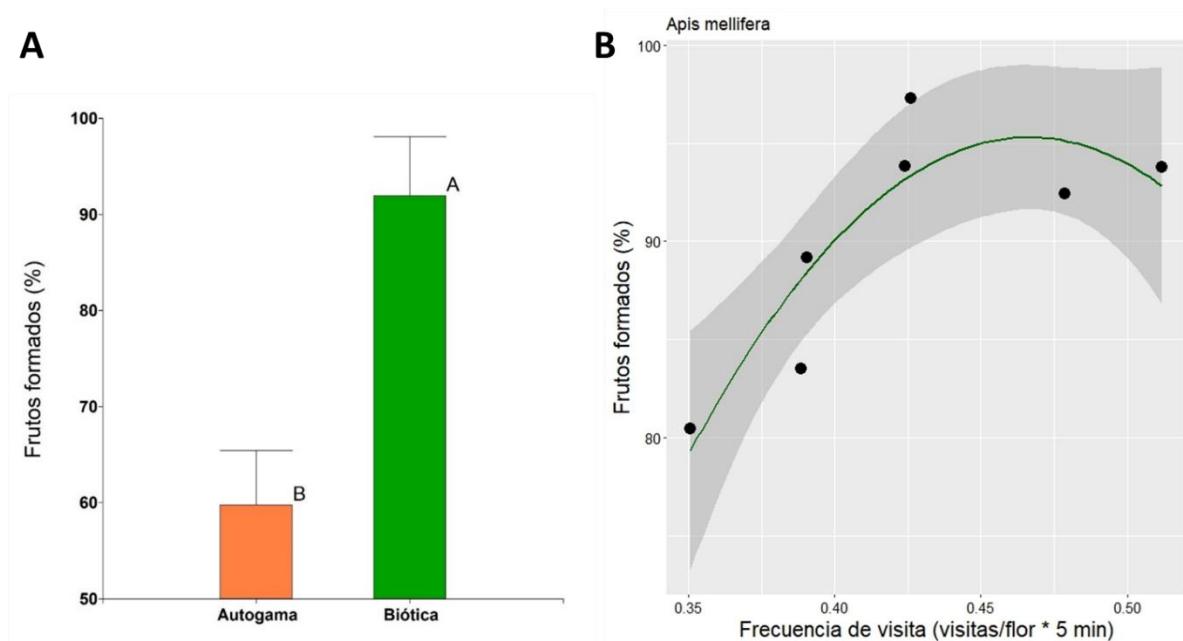


Figura 3. Formación de frutos de *B. carinata*. **A)** Comparación de la proporción de frutos formados en plantas autopolinizadas y con polinización biótica (letras diferentes muestran diferencias significativas). **B)** Relación entre la frecuencia de visitas de *Apis mellifera* y el porcentaje de frutos formados.

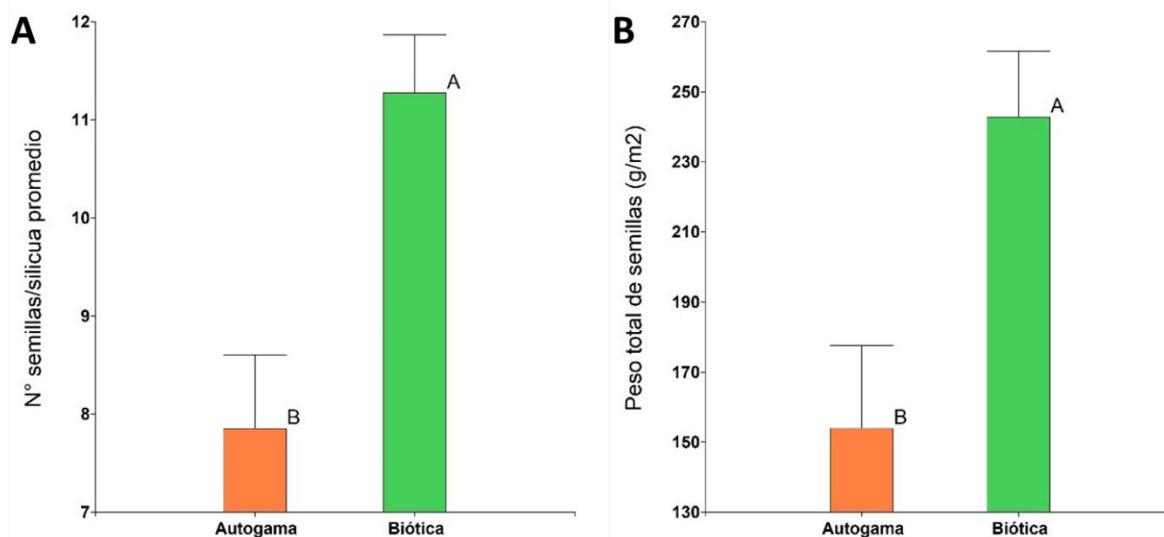


Figura 4. **A)** Formación de semillas promedio por silicua y **B)** Peso de semillas de *B. carinata* por unidad de superficie generadas en los diferentes tratamientos de polinización. Las letras diferentes indican diferencias significativas.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la polinización biótica, tiene un efecto positivo y significativo sobre la productividad de *B. carinata* en condiciones reales de producción, evidenciado por incrementos en la formación de silicuas, el número de semillas por silicua y el rendimiento total por unidad de superficie en los tratamientos expuestos a polinizadores en comparación con aquellos donde se excluyó su acceso. Estos resultados son consistentes con numerosos estudios realizados en especies del género *Brassica*, donde la actividad de los insectos polinizadores incrementa la deposición de polen viable en los estigmas y mejora la eficiencia de fecundación, aun en especies con distintos grados de autocompatibilidad (**Morandin & Winston, 2005; Pierre et al., 2010; Bommarco et al., 2012**). En este sentido, los resultados confirman que, si bien *B. carinata* puede producir semillas en ausencia de polinizadores, la autopolinización resulta insuficiente para expresar su potencial reproductivo, resaltando su dependencia a la polinización cruzada.

Las diferencias observadas entre los tratamientos sugieren la existencia de un déficit de polinizadores cuando los insectos son excluidos, situación que ha sido ampliamente documentada en cultivos oleaginosos (**Garibaldi et al., 2013; Potts et al., 2016**). La mayor eficiencia reproductiva registrada bajo polinización biótica puede atribuirse a una mayor transferencia de polen entre flores y plantas, proceso que favorece el cuajado de frutos y el llenado de semillas, resultando clave en cultivos donde el rendimiento está estrechamente vinculado al número de óvulos efectivamente fecundados (**Free, 1993; Sabbahi et al., 2005**). Este patrón concuerda con trabajos previos que muestran que la polinización entomófila no solo incrementa el rendimiento, sino que también mejora atributos de calidad de la semilla, como el peso individual y el contenido de aceite, variables particularmente relevantes para *B. carinata* dado su destino para industria y producción de biocombustible (**Bommarco et al., 2012; Bartomeus et al., 2014**).

Las abejas melíferas se destacaron como los principales visitantes florales, en concordancia con antecedentes que identifican a esta especie como uno de los vectores de polen más eficientes en Brassicaceas cultivadas. Esta eficiencia se atribuye a su elevada frecuencia de visitas, alta constancia floral y capacidad para movilizar grandes volúmenes de polen (**Westcott & Nelson, 2001; Rollin & Garibaldi, 2019**). En paisajes agrícolas dominados por cultivos extensivos, donde la diversidad y abundancia de polinizadores silvestres puede verse reducida por la simplificación del hábitat, la presencia de colmenas manejadas adquiere un rol relevante para asegurar niveles adecuados de servicio de polinización (**Aizen et al., 2009; Garibaldi et al., 2011**). En este contexto, la incorporación estratégica de colmenas durante el período de floración de la carinata emerge como una herramienta de manejo capaz de mitigar déficits de polinizadores y estabilizar los rendimientos a escala de lote.

Desde una perspectiva económica, los resultados obtenidos permiten cuantificar explícitamente el valor del servicio ecosistémico de polinización en *B. carinata* aplicando el enfoque propuesto por **Basualdo et al. (2022)**, donde estiman la contribución de los polinizadores como la fracción del rendimiento atribuible a la polinización biótica multiplicada por el valor bruto de la producción. Considerando un precio promedio de la semilla de carinata de 500 - 550 US\$ por tonelada, el valor bruto de la producción bajo el escenario de autopolinización se ubica entre 769 y 846 US\$ ha⁻¹, mientras que bajo polinización biótica asciende a 1214 - 1335 US\$ ha⁻¹. En consecuencia, el valor económico potencial del servicio de polinización se estima entre 445 y 489 US\$ ha⁻¹, lo que equivale a aproximadamente un 37 - 40 % del valor bruto total del cultivo bajo polinización biótica. Estos resultados indican que la autopolinización representa un escenario de déficit de polinización con pérdidas económicas directas y cuantificables, y que una fracción sustancial del ingreso potencial del productor en sistemas de carinata del centro de Argentina depende directamente de la actividad de los polinizadores. En concordancia con lo reportado para otros cultivos extensivos en el país, este análisis refuerza la necesidad de considerar la polinización entomófila como un insumo productivo estratégico, cuyo aporte económico justifica plenamente la implementación de prácticas de manejo orientadas a la conservación de polinizadores silvestres y/o la incorporación planificada de colmenas manejadas durante el período de floración.

En conjunto, los resultados de este trabajo aportan evidencia empírica local que respalda la importancia de la polinización entomófila como un componente clave del manejo agronómico de *B. carinata*. La integración de la polinización dentro de los esquemas de producción permitiría no solo mejorar la productividad y estabilidad del cultivo, sino también maximizar el retorno económico asociado a este servicio ecosistémico. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de avanzar hacia enfoques de manejo más integrados, que reconozcan explícitamente el valor productivo y económico de la polinización en cultivos emergentes de este tipo.

AGRADECIMIENTOS.

Se agradece la valiosa contribución del Programa Nacional de Apicultura (PROAPI) del INTA, en particular la financiación desde su instrumento, el proyecto estructural “Aportes al Desarrollo Sostenible de la Apicultura Argentina (2023-PE-L01-I069-INTA)”, y la contribución de la Estación Experimental Agropecuaria Rafaela (CR Santa Fe). Además, se agradecen los servicios del laboratorio del área producción animal, en especial a Mónica Gaggiotti del laboratorio de forrajes (EEA Rafaela), quien nos ha facilitado los análisis de calidad del cultivo de *B. carinata*.

Se agradece al productor agropecuario Mario Ulrich de Rafaela que facilitó su lote de producción para realizar en ensayo.

REFERENCIAS

1. Aizen, M. A., Garibaldi, L. A., & Dondo, M. (2009). Expansión de la carinata y diversidad de la agricultura argentina. *Ecología austral*, 19(1), 45-54.
2. Bartomeus, I., Potts, S. G., Steffan-Dewenter, I., Vaissière, B. E., Woyciechowski, M., Krewenka, K. M., ... Bommarco, R. (2014). Contribution of insect pollinators to crop yield and quality varies with agricultural intensification. *PeerJ*, 2, e328. <https://doi.org/10.7717/peerj.328>
3. Basualdo, M., Cavigliasso, P., de Avila Jr, R. S., Aldea-Sánchez, P., Correa-Benítez, A., Harms, J. M., ... & Salvarrey, S. (2022). Current status and economic value of insect-pollinated dependent crops in Latin America. *Ecological Economics*, 196, 107395.
4. Basualdo, M. y Cavigliasso, P. (2023). Valoración económica de la polinización entomófila en cultivos de la Argentina: posibles efectos de la crisis de polinizadores en la agricultura. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina* 82(1): 48-56.
5. Bates, D. (2015). Package ‘lme4’. Convergence. 12(2). Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/lme4.pdf>. Last accessed: June 22, 2021.
6. Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2014). Fitting linear mixed-effects models using lme4. arXiv preprint arXiv:1406.5823.
7. Bommarco, R., Marini, L., & Vaissière, B. E. (2012). Insect pollination enhances seed yield, quality, and market value in oilseed rape. *Oecologia*, 169(4), 1025–1032. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2271-6>
8. Breeze, T. D., Gallai, N., Garibaldi, L. A., Li, X. S. (2016). Economic measures of pollination services: shortcomings and future directions. *Trends in Ecology and Evolution* 31(12), 927-939.b
9. Cavigliasso, P., Phifer, C. C., Knowlton, J. L., Licata, J. A., Flaspohler, D. J., Webster, C. R., & Chacoff, N. P. (2022). Influence of landscape composition on wild bee communities: Effects of functional landscape heterogeneity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 340, 108150.
10. Clough, Y., Ekoos, J., Báldi, A., Batáry, P., Bommarco, R., Gross, N., ... Tscharntke, T. (2014). Density of insect-pollinated grassland plants decreases with increasing surrounding land-use intensity. *Ecology Letters*, 17(9), 1168–1177.
11. Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., ... & Steffan-Dewenter, I. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science advances*, 5(10), eaax0121. DOI: 10.1126/sciadv.aax0121
12. Delaplane, K. S., & Mayer, D. F. (2000). Crop pollination by bees. CABI publishing. p. 344.
13. Dicks, L. V., Viana, B., Bommarco, R., Brosi, B., Arizmendi, M. D. C., Cunningham, S. A., ... & Potts, S. G. (2016). Ten policies for pollinators. *Science*, 354(6315), 975-976.
14. Free, J. B. (1993). *Insect pollination of crops* (2nd ed.). Academic Press.
15. Gagic, V., Marcora, A., & Howie, L. (2019). Additive and interactive effects of pollination and biological pest control on crop yield. *Journal of Applied Ecology*, 56(11), 2528-2535.
16. Garibaldi, L. A., Carvalheiro, L. G., Vaissière, B. E., Gemmill-Herren, B., Hipólito, J., Freitas, B. M., ... & Zhang, H. (2016). Mutually beneficial pollinator diversity and crop yield outcomes in small and large farms. *Science*, 351(6271), 388-391.
17. Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Kremen, C., Morales, J. M., Bommarco, R., Cunningham, S. A., ... & Klein, A. M. (2011). Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. *Ecology letters*, 14(10), 1062-1072.
18. Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M. A., Bommarco, R., Cunningham, S. A., ... Klein, A. M. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science*, 339(6127), 1608–1611.
19. Gazzea, E., Batáry, P., & Marini, L. (2023). Global meta-analysis shows reduced quality of food crops under inadequate animal pollination. *Nature communications* 14(1), 4463. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40231-y>
20. Gesch, R. W., Archer, D. W., & Berti, M. T. (2015). Dual cropping winter camelina with soybean in the northern Corn Belt. *Agronomy Journal*, 107(5), 1802–1810.

21. Giannini, T.C., Cordeiro, G.D., Freitas, B.M., Saraiva, A.M., & Imperatriz-Fonseca, V.L. (2015). The Dependence of Crops for Pollinators and the Economic Value of Pollination in Brazil. *Journal of Economic Entomology*, 108(3), 1-9 DOI: 10.1093/jee/tov093
22. González, E., Landis, D. A., Knapp, M., & Valladares, G. (2020). Forest cover and proximity decrease herbivory and increase crop yield via enhanced natural enemies in soybean fields. *Journal of Applied Ecology*, 57(11), 2296-2306. 10.1111/1365-2664.13732
23. IPBES (2016) The Assessment Report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on Pollinators, Pollination and Food Production. IPBES Secretariat, Bonn, Germany. 10.5281/ZENODO.3402857
24. Klein, A. M., Vaissiere, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the royal society B: biological sciences*, 274(1608), 303-313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>
25. Kremen, C., Williams, N. M., Aizen, M. A., Gemmill-Herren, B., LeBuhn, G., Minckley, R., ... & Ricketts, T. H. (2007). Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecology letters*, 10(4), 299-314.
26. Levenson, H. K., Sharp, A. E., & Tarpy, D. R. (2022). Evaluating the impact of increased pollinator habitat on bee visitation and yield metrics in soybean crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 331, 107901.
27. Lüdecke, D., Ben-Shachar, M., Patil, I., Waggoner, P., Makowski, D. (2021). An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models." *Journal of Open Source Software*, 6(60), 3139. doi:10.21105/joss.03139.
28. Mazzei, M. P., Vesprini, J. L., & Galetto, L. (2021). Seminatural habitats and their proximity to the crop enhances canola (*Brassica napus*) pollination and reproductive parameters in Argentina. *Crop Science*, 61(4), 2713-2721. 10.1002/csc2.20450
29. Mesquida, J., & Renard, M. (1982). Study of the pollination of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Apidologie*, 13(4), 353–366.
30. Morandin, L. A., & Winston, M. L. (2005). Wild bee abundance and seed production in conventional, organic, and genetically modified canola. *Ecological Applications*, 15(3), 871–881.
31. Morandin, L. A., & Winston, M. L. (2006). Pollinators provide economic incentive to preserve natural land in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116(3–4), 289–292.
32. Perrot, T., Gaba, S., Roncoroni, M., Gautier, J. L., & Bretagnolle, V. (2019). Bees increase oilseed rape yield under real field conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 266, 39–48.
33. Pierre, J., Vaissière, B. E., Vallée, P., & Renard, M. (2010). Efficiency of insect pollination of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Agronomy for Sustainable Development*, 30(2), 1–9.
34. Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., & Kunin, W. E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in ecology & evolution*, 25(6), 345-353.
35. Potts, S. G., Imperatriz-Fonseca, V., Ngo, H. T., Aizen, M. A., Biesmeijer, J. C., Breeze, T. D., ... Vanbergen, A. J. (2016). Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540(7632), 220–229.
36. Rakow, G., & Woods, D. L. (1987). Outcrossing in *Brassica carinata*. *Canadian Journal of Plant Science*, 67(1), 79–83.
37. Reilly, J. R., Artz, D. R., Biddinger, D., Bobiwash, K., Boyle, N. K., Brittain, C., Brokaw, J., Campbell, J. W., Daniels, J., Elle, E., Ellis, J. D., Fleischer, S. J., Gibbs, J., Gillespie, R. L., Gundersen, K. B., Gut, L., Hoffman, G., Joshi, N., Lundin, O., Mason, K., McGrady, C. M., Peterson, S. S., Pitts-Singer, T. L., Rao, S., Rothwell, N., Rowe, L., Ward, K. L., Williams, N. M., Wilson, J. K., Isaacs, R., Winfree, R. (2020). Crop production in the USA is frequently limited by a lack of pollinators. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 287: 20200922. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0922>
38. Ricketts, T. H., Regetz, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., Bogdanski, A., ... & Viana, B. F. (2008). Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns?. *Ecology letters*, 11(5), 499-515. 10.1111/j.1461-0248.2008.01157.x
39. Rollin, O., & Garibaldi, L. A. (2019). Impacts of honeybee density on crop yield: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 56(5), 1152–1163. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13355>
40. RStudio Team. (2015). RStudio: Integrated Development Environment for R. Boston, MA. Retrieved from <http://www.rstudio.com/>

41. Sabbahi, R., De Oliveira, D., & Marceau, J. (2005). Influence of honey bee (*Apis mellifera* L.) density on the production of canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Apicultural Science*, 49(2), 5–13.
 42. Self, S. G., Riddle, T. C., & Kirkpatrick, K. J. (1999). Pollination biology of Ethiopian mustard (*Brassica carinata*). *Euphytica*, 108(2), 111–117.
 43. Siopa, C., Carvalheiro, L., Castro, H., Loureiro, J., & Castro, S. (2023). Quantifying crop pollinator dependence values--an updated compilation and discussion on methodological approaches. *Authorea Preprints*. DOI: 10.22541/au.167828466.63884414/v1
 44. Sutter, L., Albrecht, M., & Jeanneret, P. (2018). Landscape greening and local creation of wildflower strips and hedgerows promote multiple ecosystem services. *Journal of applied ecology*, 55(2), 612–620.
 45. Tscharntke, T., Klein, A. M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., & Thies, C. (2005). Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity–ecosystem service management. *Ecology letters*, 8(8), 857–874.
 46. Westcott, L., & Nelson, D. (2001). Canola pollination: an update. *Bee World*, 82(3), 115–129.
 47. Zanetti, F., Vamerali, T., & Mosca, G. (2020). Yield and nitrogen use efficiency of *Brassica carinata* under different nitrogen fertilization regimes. *Industrial Crops and Products*, 154, 112696.
 48. Zuil, S., Rosetti, L., Vellaz, O. (2022) Informe Técnico: *Brassica carinata*, una alternativa invernal viable para la región centro de Santa Fe. Repositorio:<https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/11543/INTA CRSantaFe EEARafaela Zuil S Brassica carinata alternativa invernal viable centro Santa Fe.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Rendimiento%20y%20caracter%C3%ADsticas%20agron%C3%A1ticas>
 49. Zuur, A. F., Hilbe, J. M., & Ieno, E. N. (2013). A Beginner's Guide to GLM and GLMM with R: A Frequentist and Bayesian Perspective for Ecologists. Highland Statistics Limited.