

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales



Tesina de grado para optar al título de Biólogo

**Efectos de la pérdida de hábitat para polinizadores sobre el rendimiento de cultivos de soja
(*Glycine max*)**

Alumno: Agustín Vargas Clérico

Director: Dr. Leonardo Galetto

Codirector: Dr. Leonardo Amarilla

Lugar de trabajo: Cátedra de Diversidad Biológica III (FCEFyN-UNC), Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV/CONICET-UNC)

Marzo de 2024

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales



Tesina de grado para optar al título de Biólogo

Alumno: Agustín Vargas Clérico

Director: Dr. Leonardo Galetto

Codirector: Dr. Leonardo Amarilla

Lugar de trabajo: Cátedra de Diversidad Biológica III (FCEfyN-UNC), Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV/CONICET-UNC)

CALIFICACIÓN: 10 (Diez)

TRIBUNAL EXAMINADOR:

.....
DR. GUILLERMO FUNES
PRESIDENTE
Prof. Regular
Firma y Aclaración

.....
DR. SANTIAGO BENÍTEZ-VIEYRA
VOCAL
Firma y Aclaración

.....
DR. ANDRÉS BLANCO
VOCAL
Firma y Aclaración

Efectos de la pérdida de hábitat para polinizadores sobre el rendimiento de cultivos de soja (*Glycine max*)

Resumen

La agricultura intensiva en general y el cultivo industrial de soja en particular ocasionan pérdida de paisajes naturales o seminaturales y, con ello, la pérdida de biodiversidad y de procesos ecosistémicos tales como la polinización. Los paisajes naturales/seminaturales funcionan como sitios de anidamiento y/o refugios de polinizadores. La soja es el cultivo más extendido en la Argentina y la práctica más habitual utiliza grandes cantidades de agroquímicos para maximizar el rendimiento del cultivo, lo que afecta negativamente a las poblaciones de polinizadores en los agroecosistemas. Si bien la soja es considerada autógama, se ha demostrado que los polinizadores aumentan el rendimiento del cultivo. Entonces, el incremento en el rendimiento de cultivos de soja asociado al proceso de polinización también podría estar relacionado con la cantidad de hábitat seminatural circundante al cultivo. El objetivo de este trabajo fue evaluar las relaciones entre la cantidad de hábitat seminatural favorable para polinizadores y el rendimiento del cultivo de soja en 58 sitios de muestreo incluidos en cuatro zonas productivas de las Provincias Fitogeográficas Chaqueña, del Espinal y Pampeana (Argentina). Se espera que la variación en la cantidad de hábitat seminatural (variable regresora) se relacione positivamente con las variaciones en el número de semillas por planta y el rendimiento del cultivo (t/ha) de soja (variables de respuesta) en cada una de las zonas productivas. Para descartar posible autocorrelación espacial se realizaron pruebas de Mantel. Para evaluar posibles relaciones entre las variables de respuesta y la variable regresora se realizaron regresiones lineales mixtas. Se encontró que la cantidad de hábitat seminatural se relaciona significativa y positivamente con el número de semillas por planta y con el rendimiento del cultivo dentro de cada una de las zonas productivas estudiadas. Este estudio proporciona evidencia correlacional de una influencia positiva de la cantidad de hábitat seminatural circundante al lote de cultivo sobre el número de semillas por planta y el rendimiento del cultivo de soja, en una escala -de paisaje- amplia para la región. Los resultados permiten enfatizar la importancia de conservar los paisajes seminaturales (e.g., bosques nativos, pastizales, humedales) para promover la biodiversidad y los bienes ecosistémicos comunes, los que, además, resultan beneficiosos para la producción agrícola.

Palabras claves: agroecosistemas, biodiversidad, conservación.

Índice

Introducción	2
<i>Objetivos</i>	4
<i>Hipótesis</i>	4
<i>Predicciones</i>	4
Materiales y Métodos	4
<i>Sitios de estudio, estimación de la cantidad de hábitat y muestreo</i>	4
<i>Definición de las variables</i>	7
<i>Análisis de datos</i>	7
Resultados	8
Discusión	12
Agradecimientos	15
Bibliografía	16

Efectos de la pérdida de hábitat para polinizadores sobre el rendimiento de cultivos de soja (*Glycine max*)

Introducción

Los cambios en el uso de la tierra están promoviendo la pérdida y degradación del hábitat natural/seminatural en la mayoría de los ecosistemas del planeta y se constituyen así en una de las principales causas de pérdida de biodiversidad en esta época, el Antropoceno (Crutzen & Stoermer, 2000; Rico, 2019). Dentro de estas causas se puede reconocer a la fragmentación del hábitat, concepto que, por lo general, involucra a dos procesos diferentes: la fragmentación de hábitat *per se* y la pérdida de hábitat. La fragmentación del hábitat *per se* implica la subdivisión de un hábitat natural en fragmentos de menor tamaño sin que, necesariamente, ocurra pérdida significativa del hábitat (Fahrig, 2003; 2013). Por el contrario, la pérdida de hábitat implica una reducción en la superficie de hábitat natural o seminatural sin una necesaria subdivisión del área remanente (Fahrig, 2003; 2013).

Se ha propuesto que muchos procesos y patrones ecológicos que ocurren en un paisaje e involucran a la biodiversidad y sus interacciones funcionales, responden a la cantidad de hábitat presente en un área circundante (i.e. hipótesis de la cantidad de hábitat), independientemente de la configuración espacial (i.e., fragmentación) que posea ese hábitat remanente (Fahrig, 2013; Saura, 2020). Entonces, la cantidad de hábitat, y no la configuración de éste, sería un mejor predictor de los patrones y procesos ecológicos en paisajes fragmentados (Jackson & Fahrig, 2016).

La agricultura intensiva es una de las prácticas que más rápido avanza sobre los paisajes naturales/seminaturales (en adelante nos referiremos como hábitat seminatural) ocasionando pérdida o disminución de biodiversidad (Dicks et al., 2016; 2021; Mastrángelo et al., 2019). La expansión del cultivo industrial de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] a nuevas áreas geográficas, por ejemplo, es uno de los principales impulsores de la pérdida y fragmentación del hábitat seminatural en América del Sur, principalmente en la región fitogeográfica del Chaco (Cáceres, 2015). La pérdida y fragmentación del hábitat impactan negativamente en procesos ecosistémicos que influyen positivamente en el rendimiento de los cultivos, tales como la polinización (e.g., girasol, Sáez et al., 2012; colza, Mazzei et al., 2022; soja, Zelaya et al., 2018; Garibaldi et al., 2021; Santone et al., 2022). La soja es una leguminosa nativa de Asia Oriental y es el cultivo más extendido en la Argentina, que es el tercer país en producción mundial (Aizen et al., 2009; FAOSTAT, 2023).

El cultivo industrial de soja requiere la aplicación de grandes cantidades de agroquímicos, tales como fertilizantes, insecticidas y plaguicidas (Sarandón & Flores, 2014), prácticas que disminuyen las poblaciones de polinizadores en los agroecosistemas (Galletto et al., 2022). Si bien la soja es considerada autógena, se ha demostrado que los polinizadores aumentan la cantidad de polen

depositado sobre el estigma (Huais et al., 2020; Santone et al., 2022). Además, las plantas de soja que se encuentran más próximas a porciones de hábitat seminatural inmersas en la matriz de cultivo presentan mayor cantidad de polen que aquellas que están más alejadas (Huais et al., 2020). Estos resultados sugieren que los rangos de vuelo de los polinizadores son relativamente cortos (<2 km), particularmente los de las abejas nativas (Huais et al., 2020). Por su parte *Apis mellifera* usualmente tiene rangos de vuelo hasta de 5 km (Waddington et al., 1994; Beekman & Ratnieks, 2000; Steffan-Dewenter & Kuhn, 2003).

Entonces, el incremento en el rendimiento en el cultivo de soja asociado al proceso de polinización (Zelaya et al., 2018; Garibaldi et al., 2021; Santone et al., 2022) también podría estar relacionado con la cantidad de hábitat seminatural en los alrededores de la matriz de cultivo ya que, generalmente, funcionan como sitios de anidamiento y/o refugios de polinizadores y de enemigos naturales de las plagas de cultivos (Garibaldi et al., 2021; Monasterolo et al., 2015; González et al., 2020). Sin embargo, algunos estudios indican que la mayor polinización registrada cerca del borde del cultivo puede no corresponderse con una mayor producción de semillas por planta (e.g., Huais et al., 2020). Recientemente, un trabajo analizó las variaciones en el rendimiento del cultivo de soja por lote en campos ubicados en las Provincias Fitogeográficas Pampeana y Chaqueña, y concluyó que estas variaciones no son explicadas por la cantidad de hábitat seminatural alrededor de los lotes de cultivo (Goldenberg et al., 2022). Por otro lado, la dependencia a polinizadores del cultivo de soja ha sido poco explorada a escala regional, a pesar de la importancia de este conocimiento tanto desde el punto de vista tanto básico como aplicado. En un trabajo reciente se estimó el rendimiento de cultivos de soja y su relación con la dependencia de la polinización biótica en un gradiente latitudinal (entre los 4 y los 40 grados de latitud sur), encontrándose que la dependencia a polinizadores y su influencia en el rendimiento del cultivo puede estructurarse latitudinalmente, disminuyendo a latitudes altas (da Cunha et al., 2023).

En base a lo expuesto, se desprende que los estudios que evalúan distintas relaciones funcionales y del paisaje (e.g., relaciones entre polinizadores, polinización, cantidad de hábitat, configuración del paisaje, gradientes latitudinales) con la producción de semillas y/o el rendimiento en cultivos de soja (e.g., Monasterolo et al., 2015; Zelaya et al., 2018; González et al., 2020; Huais et al., 2020; Garibaldi et al., 2021; Goldenberg et al., 2022; Santone et al., 2022; da Cunha et al., 2023), muestran una diversidad de resultados que requiere ampliar los estudios ampliando la escala espacial para entender mejor el rol del paisaje y de los polinizadores en la producción de los cultivos de soja.

Objetivo general: Evaluar las relaciones entre las variaciones en la cantidad de hábitat seminatural favorable para polinizadores y el rendimiento del cultivo de soja considerando diferentes zonas productivas en las Provincias Fitogeográficas Chaqueña, del Espinal y Pampeana (Argentina).

Objetivos específicos:

- a- Estimar la cantidad de hábitat seminatural existente en un radio de 6 km alrededor de lotes de cultivo distribuidos en un rango geográfico amplio en Argentina y contabilizar el número de semillas por planta y estimar el rendimiento del cultivo de soja (toneladas por hectárea).
- b- Evaluar relaciones entre las variaciones en la cantidad de hábitat seminatural y el número de semillas por plantas y el rendimiento del cultivo para una amplia región de Argentina donde se cultiva soja y dentro de distintas regiones productivas.

Hipótesis: Los sitios con mayor cantidad de hábitat seminatural (i.e., menor pérdida de hábitat para los polinizadores) resultan favorables para los polinizadores, brindando mayores posibilidades de polinización del cultivo y, consecuentemente, mayor rendimiento en el cultivo de soja, aunque las tendencias pueden variar regionalmente.

Predicción: Una mayor cantidad de hábitat seminatural, calculado en un radio de 6 km alrededor del lote cultivado con soja, se relacionará positivamente con el número de semillas por planta y el rendimiento del cultivo de soja en general y dentro de cada una de las regiones productivas estudiadas.

Materiales y métodos

Sitios de estudio, estimación de la cantidad de hábitat y muestreo

En este estudio se consideran 58 sitios de muestreo incluidos en cuatro regiones productivas (Fig. 1): la zona *uno* con 14 sitios, incluida en la Provincia Fitogeográfica Chaqueña, la zona *dos* con 13 sitios, en la Provincia Fitogeográfica Chaqueña y del Espinal (transición), la zona *tres* con 20 sitios, en el sur del Espinal y el norte de la Provincia Fitogeográfica Pampeana y la zona *cuatro* con 11 sitios, en el sur de la Provincia Fitogeográfica Pampeana. La clasificación de provincias fitogeográficas acordes a la de Oyarzábal et al. (2018). Los distintos sitios se seleccionaron *a priori* en Google Earth, para ellos se identificaron lotes de cultivo con diferentes cantidades de hábitat circundante. Luego durante los viajes de muestreo, se corroboró que el cultivo fuera de soja y se registró la geolocalización del sitio. Con esto, posteriormente se estimó la cantidad de hábitat según metodología que se describirá más adelante.

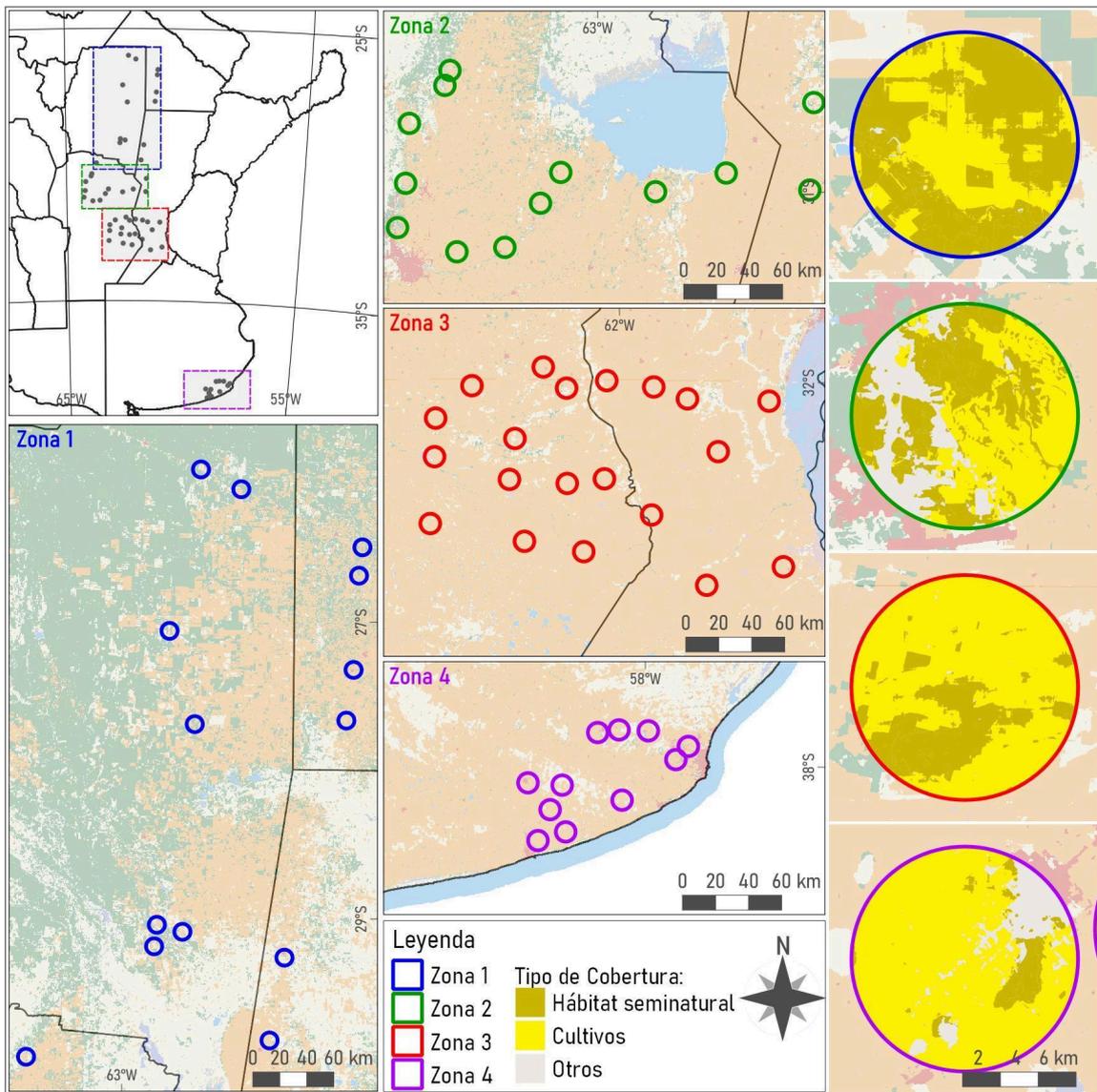


Figura 1: Arriba, a la izquierda: mapa político parcial de la Argentina con las cuatro regiones productivas incluidas en este estudio (rectángulo de líneas discontinuas): la zona *uno* en azul, en la Provincia Fitogeográfica Chaqueña, la zona *dos* en verde en la Provincia Fitogeográfica Chaqueña y del Espinal (transición), la zona *tres* en rojo, en el sur del Espinal y norte de la Provincia Fitogeográfica Pampeana y la zona *cuatro* en violeta, en el sur de la Provincia Fitogeográfica Pampeana. Abajo, a la izquierda y en el centro de la figura se muestra una ampliación de cada zona de estudio y de las áreas buffer de 6 km de radio incluidas en cada una de ellas. A la derecha de la figura se presentan cuatro áreas buffer, una de cada zona productiva (vinculadas por el código de color) y se muestra la superficie cubierta por hábitat seminatural (más oscura) y por el cultivo (amarillo). La superficie cubierta por hábitat seminatural incluye a las capas *trees*, *flooded vegetation* y *rangeland* del producto LandCover de Sentinel-2 (ESA, 2021).

Las cuatro zonas productivas mencionadas previamente, coinciden con cuatro de las 17 zonas ReTAA (zonas delimitadas por **Relevamiento Tecnológico Agrícola Aplicado**) reconocidas por la Bolsa de Cereales de la Argentina (www.bolsadecereales.com/imagenes/retaa/2016-08/2014/MPN_AACREA_ReTAA_PAS_BC_2606_14.pdf). Estas zonas se diferencian principalmente por el manejo agronómico (tipo de siembra, rotación, etc.), el uso de insumos (cultivares utilizados, semillas inoculadas o no, agroquímicos y fertilizantes utilizados, concentración y frecuencia de aplicaciones de agroquímicos), las condiciones geo-climáticas de las zonas y, consecuentemente, por el rendimiento de los cultivos. Entonces en este estudio, resultaron incluidas las siguientes zonas ReTAA: *uno* -NEA (coincide con Provincia Fitogeográfica Chaqueña), *dos* -Centro Norte Córdoba (coincide con transición Provincia Fitogeográfica Chaqueña-Espinal), *tres* -Núcleo Norte (coincide con Espinal y el norte de la Provincia Fitogeográfica Pampeana), *cuatro* -Sureste de Buenos Aires (coincide con sur de la Provincia Fitogeográfica Pampeana).

En cada zona los sitios de muestreo incluyeron cultivo de soja (lote) y diferentes cantidades de hábitat seminatural disponible para los polinizadores (y otros elementos y procesos inherentes a la biodiversidad). Se consideró como hábitat favorable para los polinizadores a cualquier área con cobertura de vegetación tales como: bosques o remanentes de bosque, áreas inundables con vegetación y áreas de pastizales. En cada sitio de muestreo se definió al azar un punto focal en el lote de cultivo, el que se utilizó como centro geográfico para trazar un radio de seis kilómetros y delimitar un círculo, denominado área buffer. Para asegurar la independencia entre los sitios, se consideró el mayor rango de vuelo reportado para polinizadores y se evitaron superposiciones entre los sitios. Para cada área buffer se estimaron la superficie de hábitat seminatural y la superficie cultivada (Fig. 1). Luego de sumar ambas superficies se calculó la cantidad de hábitat seminatural expresada como porcentaje con relación a la superficie total. Las estimaciones se realizaron utilizando el software QGIS (QGIS Development Team, 2016) y las capas (*crops*, *trees*, *flooded vegetation*, y *rangeland*) del producto LandCover de Sentinel-2 (ESA, 2021) proyectadas para el período 2017-2018 (período en que se realizó el muestreo).

Alrededor de cada punto focal se trazó una parcela de 100 m x 100 m y, cubriendo toda la parcela se tomaron al azar 10 plantas de soja en madurez completa (estadio R8: plantas completamente secas y con frutos maduros y semillas), excepto en la zona *cuatro* que se incluyeron seis plantas para cada lote. Además, en cada lote se trazaron tres parcelas de 1 m² separadas entre sí por al menos 10 m y se registró la cantidad de plantas por metro cuadrado para poder estimar la cantidad de plantas por hectárea y luego calcular el rendimiento del lote.

Definición de las variables

Las variables dependientes o variables de respuesta son el número de semillas por planta y el rendimiento del cultivo (expresado en toneladas por hectáreas). Las semillas de cada una de las 10 plantas de cada lote fueron secadas, por separado, en estufa hasta lograr una masa constante. El rendimiento se estimó con base en la masa seca de las semillas de cada planta y a la cantidad de plantas por hectárea. La variable independiente (regresora) es la proporción de hábitat seminatural (%) en cada sitio.

Análisis de datos

Para evaluar posible autocorrelación espacial se realizó una prueba de Mantel entre las variables de respuesta y la distribución geográfica en el área completa de estudio. Esta prueba indicó que existe autocorrelación geográfica significativa. Los estadísticos r (coeficiente de correlación de Mantel) y p (valor para definir el umbral de significancia, en este caso, 0,05) se presentan en la Tabla 1 y se indican en negrita. Para evaluar posibles relaciones entre las variables de respuesta y la variable regresora de interés (cantidad de hábitat) incluyendo a todos los sitios en su conjunto, se realizaron regresiones mediante Modelos Lineales Mixtos (LLM). La distribución geográfica (residuos espaciales) se utilizó como covariable en los modelos, mientras que los sitios de muestreo se utilizaron como factor aleatorio. Tanto la cantidad de hábitat como los residuos espaciales explicaron significativamente a las variables de respuesta (ver sección resultados, Tabla 2), por lo tanto, se procedió a realizar un análisis de estructura de vecindad.

Este análisis evidenció un patrón espacial estructurado en cuatro grupos de vecinos. Estos cuatro grupos de vecinos coincidieron con las cuatro zonas productivas mencionadas más arriba. Un sitio ubicado en el norte de Córdoba y dos sitios ubicados en el centro oeste de Santa Fe resultaron ambiguos (pudiendo ubicarse tanto en la zona productiva *uno* como en la *dos*). Su ubicación final se definió con base en los resultados obtenidos en las pruebas de Mantel implementadas para cada zona productiva por separado. Estas pruebas de Mantel indicaron que no existe autocorrelación geográfica para las variables de respuesta dentro de cada zona (el sitio ubicado en Córdoba resultó incluido en la zona productiva *uno* y los sitios ubicados en Santa Fe, en la zona *dos*). Para evaluar posibles relaciones entre las variables de respuesta y la variable regresora de interés en cada una de las cuatro zonas de estudio por separado, se realizaron regresiones mediante LMM y los sitios de muestreo fueron incluidos como factores aleatorios.

Todos los análisis estadísticos se realizaron en R (Core Development Team, 2015). Las pruebas de Mantel se realizaron con la función 'Mantel' del paquete *vegan* (Oksanen et al., 2010). Para construir la covariable (residuos espaciales), se utilizó la función *SpatialPoints* y *spDists* del paquete *sp* (Pebesma, 2021) y la función *nb2listw* del paquete *spdep* (Bivand & Wong, 2018). Para estimar los

vecinos más cercanos se utilizó el algoritmo KNN (k-nearest neighbors) con las funciones `nb2listw` y `knn2nb` del paquete *spdep*. La estructura de vecindad se visualizó utilizando la función `plot` de R. Las relaciones entre variables de respuesta y covariables o variable regresora y factor aleatorio se realizaron utilizando el paquete *lme4* (Bates et al., 2015). Se tomó el criterio de información de Akaike (AIC) para evaluar aquel modelo que mejor explica la variabilidad de los datos (e.g., modelo nulo). Los modelos fueron validados utilizando las funciones del paquete DHARMA (Hartig, 2018). Los gráficos fueron realizados utilizando el paquete `ggplot2` (Wickham, 2016) junto con el paquete `ggeffects` (Lüdtke, 2018) para graficar las curvas ajustadas y los intervalos de confianza de los LMMs.

Resultados

Durante la temporada de cultivo 2017-2018 se tomaron datos de 58 lotes de soja en cuatro zonas productivas de la Argentina. El número promedio de semillas, el rendimiento promedio (t/ha) del cultivo y la cantidad promedio de hábitat seminatural para cada zona productiva y para el conjunto total de datos se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Número promedio de semillas y rendimiento promedio del cultivo (t/ha) en cada una de las cuatro zonas productivas. Cantidad promedio de hábitat seminatural (%) en cada sitio de muestreo considerando un área buffer de 6 km de radio. Entre paréntesis se indican los valores mínimos y máximos de cada variable). En negrita se presentan los estadísticos r (coeficiente de correlación de Mantel) y p (valor para definir el umbral de significancia, en este caso, 0,05) asociados a las pruebas de Mantel para las dos variables de respuesta.

	Zona productiva <i>uno</i>	Zona productiva <i>dos</i>	Zona productiva <i>tres</i>	Zona productiva <i>cuatro</i>	Total
Número de semillas por plantas (prueba de Mantel)	155 (82-229) ($r = 0,6$; $p = 0,07$)	125 (82-199) ($r = 0,4$; $p = 0,08$)	155 (83-245) ($r = 0,3$; $p = 0,09$)	136 (83-179) ($r = 0,5$; $p = 0,11$)	144,3 (82-245) ($r = 0,8$; $p = 0,042$)
Rendimiento (t/ha) (prueba de Mantel)	6,33 (3,4-9,23) ($r = 0,1$; $p = 0,09$)	5,2 (2,7-9,17) ($r = 0,3$; $p = 0,07$)	6,23 (3-9,81) ($r = 0,4$; $p = 0,08$)	5,3 (3,26-8,6) ($r = 0,1$; $p = 0,15$)	5,83 (2,7-9,8) ($r = 0,6$; $p = 0,047$)
Cantidad de hábitat seminatural (%)	53,2 (16,8-87,4)	22,6 (0,19-58,8)	4,5 (0,07-25,5)	12,8 (0,58-47,3)	24,64 (0,07-87,4)

Las regresiones lineales que incluyeron a la cantidad de hábitat seminatural y a los residuos espaciales como covariables resultaron positivas y significativas para explicar el número de semillas por planta y el rendimiento del cultivo cuando se consideró un único conjunto de datos (Tabla 2). Las

regresiones indicaron que, al aumentar la cantidad de hábitat seminatural e influenciada por la distribución geográfica, aumenta tanto el número de semillas (de 82 a 245; Fig. 2A) como el rendimiento del cultivo (de 2,7-9,8 Fig. 2B). Las regresiones lineales resultaron positivas y significativas para explicar el número de semillas en las zonas productivas *dos*, *tres* y *cuatro* (Tabla 3) y el rendimiento en todas las zonas productivas (Tabla 4).

Tabla 2: Resultados de las regresiones considerando el número de semillas por planta (NSP) y el rendimiento (t/ha) (R) como variable de respuesta y la cantidad de hábitat (CH) y residuos espaciales (RS; distribución geográfica) como covariables. Los sitios (S) de tomas de muestra para varias plantas fueron incluidos como factores aleatorios. Estimado: Est; Error Estándar: EE; Valor T: T; Pr(>|t|): p; Varianza: V; Desvío Estándar: DE. Modelo lineal mixto (LMM). Intercepto (Inter).

Modelo LMM	Efecto fijo					Efecto aleatorio		
		Est	EE	T	p		V	DE
NSP~CH+RS+(1 S)	Intercepto	132,7	3,39	29,07	7,38e-19	Sitio (Inter)	362,07	19,02
	Cantidad de hábitat	0,491	0,10	4,077	4,55e-05	Residuos	65,86	8,11
	Residuos espaciales	0,81	0,01	37,03	8,38e-21			
R~CH+RS+(1 S)	Intercepto	5,197	0,11	25,14	4,2e-23	Sitio (Inter)	0,41	0,64
	Cantidad hábitat	0,026	0,0035	7,57	3,6e-14	Residuos	0,11	0,33
	Residuos espaciales	0,863	0,0158	34,44	3,6e-39			

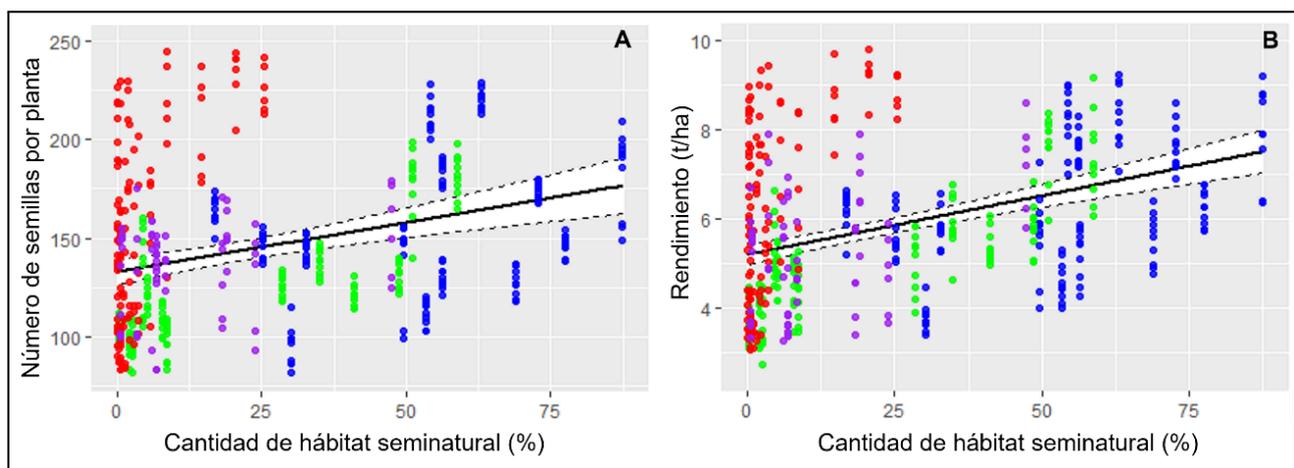


Figura 2: Regresiones entre el número de semillas por planta de soja (A) y el rendimiento de plantas de soja (B) y la cantidad de hábitat seminatural y la distribución geográfica (residuos espaciales) como covariables. Cada círculo representa el número de semillas o rendimiento estimado de una planta de soja. Los círculos con colores iguales representan al número de semillas o rendimiento de cada planta de una misma zona productiva (azul, zona uno; verde, zona dos; rojo, zona tres; violeta, zona cuatro).

Tabla 3: Resultados de las regresiones considerando el número de semillas por planta (NSP) como variable de respuesta y la cantidad de hábitat (CH) como variable regresora. Los sitios (S) de tomas de muestra fueron incluidos como factores aleatorios. Estimado: Est; Error Estándar: EE; Valor T: T; $Pr(>|t|)$: p; Varianza: V; Desvío Estándar: DE. Modelo lineal mixto (LMM). Intercepto (Inter).

Zona Productiva/ Modelo LMM	Efecto fijo				Efecto aleatorio			
		Est	EE	T	p		V	DE
Zona uno/ NSP~CH+(1 S)	Intercepto	127,6	27,1	4,69	2,67e-06	Sitio (Inter)	1266,5	35,6
	Cantidad de hábitat	0,52	0,47	1,1	0,055	Residuos	101,2	10,06
Zona dos/ NSP~CH+(1 S)	Intercepto	101,5	6,86	14,7	1,76e-49	Sitio (Inter)	271,9	16,49
	Cantidad de hábitat	1,06	0,22	4,75	1,94e-06	Residuos	0,22	4,75
Zona tres/ NSP~CH+(1 S)	Intercepto	136,1	7,05	19,28	6,90e-83	Sitio (Inter)	514,6	22,68
	Cantidad de hábitat	4,27	0,83	5,17	3,09e-07	Residuos	1150,2	33,91
Zona cuatro/ NSP~CH+(1 S)	Intercepto	130,6	4,18	27,69	2,91e-167	Sitio (Inter)	46,63	6,59
	Cantidad de hábitat	0,44	0,25	1,7	0,048	Residuos	481,2	21,94

Al considerar cada una de las zonas productivas por separado, las regresiones indicaron que, a medida que aumenta la cantidad de hábitat seminatural, aumenta tanto el número de semillas (Fig. 3) como el rendimiento del cultivo (Fig. 4). El número de semillas por planta aumentó: en la zona productiva *uno* (no significativo; $p = 0,055$) de 82 a 229 (Fig. 3A), en la zona *dos* de 82-199 (Fig. 3B), en la zona *tres* de 83 a 245 (Fig. 3C), en la zona *cuatro* de 83-179 (Fig. 3D). El rendimiento del cultivo aumentó: en la zona productiva *uno*, de 3,41 t/ha a 9,23 t/ha (Fig. 4A), en la zona *dos* de 2,7 t/ha a 9,17 t/ha (Fig. 4B), en la zona *tres* de 3 t/ha a 9,81 t/ha (Fig. 4C), en la zona *cuatro* de 3,26 t/ha a 8,6 t/ha (Fig. 4D). Las variables de respuesta resultaron positiva y significativamente (menos el número de semillas para la zona uno) relacionadas con la cantidad de hábitat seminatural existente en toda la región o en cada una de las zonas productivas. En toda la región la cantidad de hábitat varió entre 0,07 % y 87,4 %. En la zona productiva *uno*, la cantidad de hábitat varió entre el 16,8 % y el 87,4 %, en la zona *dos* entre el 0,19 % y el 58,8 %, en la zona *tres* entre el 0,07 % y el 25,5 % y en la zona *cuatro* entre el 0,58 % y el 47,3 %.

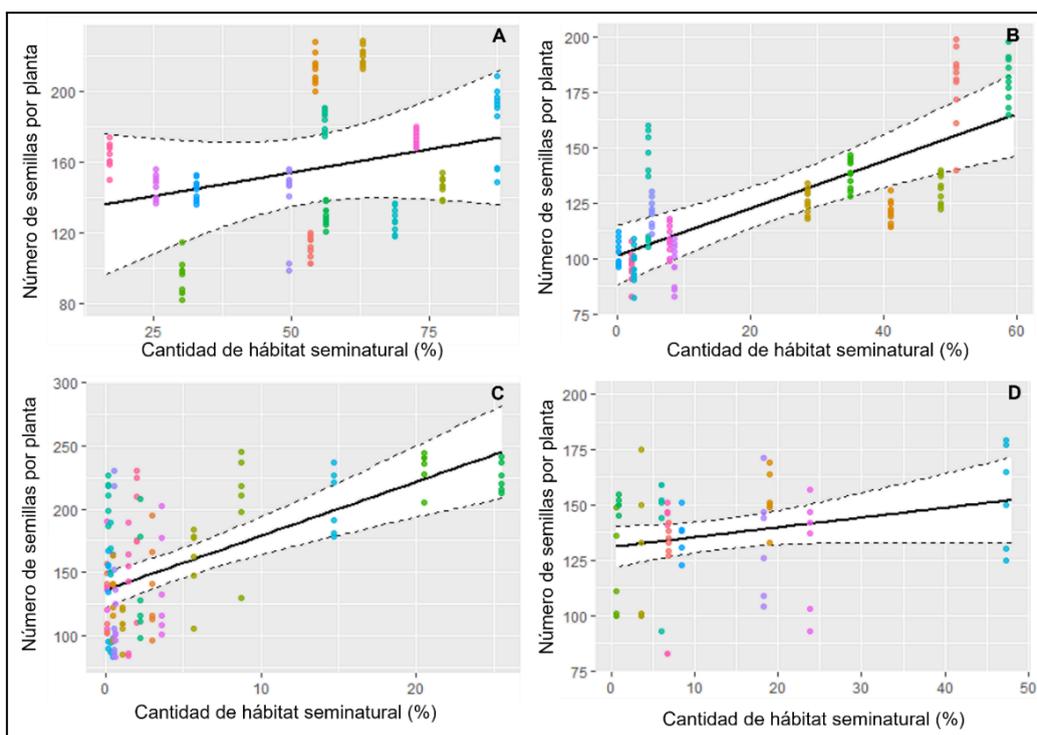


Figura 3: Regresiones entre el número de semillas por planta de soja y la cantidad de hábitat seminatural (%) en cada una de las zonas productivas. **A**, zona uno; **B**, zona dos; **C**, zona tres; **D**, zona cuatro. Cada círculo representa el número de semillas de una planta. Los colores agrupan a las plantas de un determinado lote de cultivo (un sitio dentro de una zona productiva dada).

Tabla 4: Resultados de las regresiones considerando el rendimiento (t/ha) (R) como variable de respuesta y la cantidad de hábitat (CH) como variable regresora. Los sitios (S) de tomas de muestra fueron incluidos como factores aleatorios. Estimado: Est; Error Estándar: EE; Valor T: T; $\Pr(>|t|)$: p; Varianza: V; Desvío Estándar: DE. Modelo lineal mixto (LMM). Intercepción (Inter).

Zona Productiva/ Modelo LMM	Efecto fijo					Efecto aleatorio		
		Est	EE	T	p		V	DE
Zona uno/ $R \sim CH + (1 S)$	Intercepto	4,55	0,98	4,6	3,34e-06	Sitio (Inter)	1,62	1,27
	Cantidad de hábitat	0,03	0,017	1,93	0,045	Residuos	0,36	0,60
Zona dos/ $R \sim CH + (1 S)$	Intercepto	4,05	0,24	16,3	3,5e-60	Sitio (Inter)	0,41	0,64
	Cantidad de hábitat	0,05	0,008	6,29	3,06e-10	Residuos	0,11	0,33
Zona tres/ $R \sim CH + (1 S)$	Intercepto	5,47	0,28	19,29	5,5e-83	Sitio (Inter)	0,78	0,88
	Cantidad de hábitat	0,16	0,033	4,95	7,33e-07	Residuos	2,13	1,46
Zona cuatro/ $R \sim CH + (1 S)$	Intercepto	4,78	0,38	12,9	9,62e-35	Sitio (Inter)	0,68	0,82
	Cantidad de hábitat	0,04	0,021	1,92	0,044	Residuos	1,02	1,01

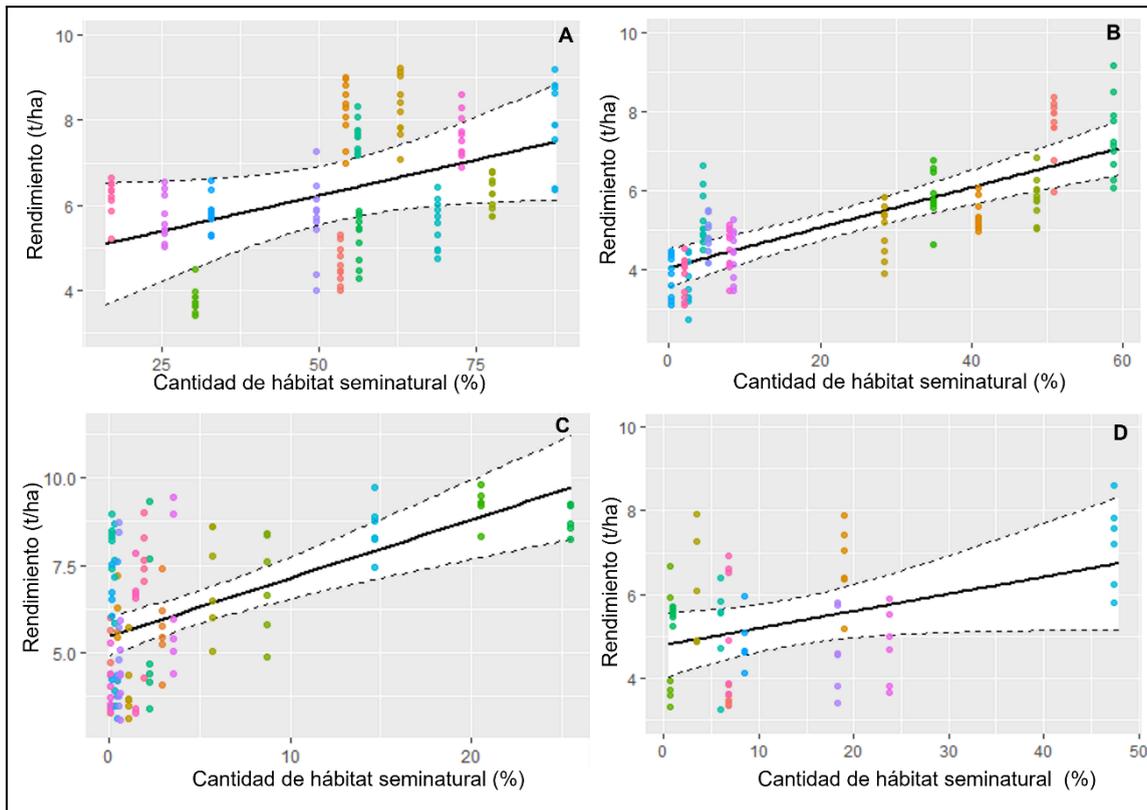


Figura 4: Regresiones entre el rendimiento de plantas de soja y la cantidad de hábitat seminatural (%) en cada una de las zonas productivas. **A**, zona uno; **B**, zona dos; **C**, zona tres; **D**, zona cuatro. Cada círculo representa el rendimiento por hectárea estimado a partir de una planta. Los colores agrupan a las plantas de un mismo lote de cultivo (un sitio dentro de una zona productiva dada).

Discusión

Se analizó si la proporción de hábitat seminatural (cantidad de área en relación al área cultivada en un área buffer de 6 km de radio) circundante a lotes de cultivo de soja, podría explicar la variabilidad del número de semillas por planta y del rendimiento del cultivo en cuatro zonas productivas de la Argentina. En general, se encontraron relaciones significativas que indican el impacto positivo de la cantidad de hábitat sobre estas dos variables de rendimiento del cultivo de soja en general, y también para distintas regiones productivas en particular.

En un trabajo reciente (Goldenberg et al., 2022) se analizaron las variaciones en el rendimiento del cultivo de soja por lote en campos ubicados en las Provincias Fitogeográficas Pampeana y Chaqueña, relacionadas a la configuración del paisaje y a las particularidades de las prácticas. Dicho trabajo consideró un radio de 1,5 km alrededor del lote para estimar la cantidad de hábitat seminatural circundante, distancia que es considerablemente menor a la incluida en este trabajo. Se encontró que los rendimientos de soja no se relacionaron con la cantidad de hábitat seminatural. Otro estudio desarrollado en dos paisajes en la provincia de Córdoba encontró un efecto positivo del tamaño del fragmento de bosque (fragmentación de hábitat *per se*) sobre el proceso de polinización de las

plantas de soja (número de polen sobre los estigmas), aunque no se evidenciaron relaciones con el número de semillas producidas (Huais et al., 2020). Otros estudios desarrollados en campos con cultivo de soja en la provincia de Córdoba encuentran relaciones positivas entre el rendimiento del cultivo y la cobertura vegetal circundante (González et al., 2020) y/o con la distancia al bosque (González et al., 2020; Monasterolo et al., 2015).

Para analizar esta diversidad de respuestas del rendimiento de la soja frente a los cambios en la cantidad de hábitat seminatural entre los estudios previos se puede considerar que, en este estudio, se utilizó como predictor a la pérdida de hábitat (medida como proporción en la cantidad de hábitat seminatural en relación con el área cultivada) y no la fragmentación de hábitat *per se* (Jackson & Fahrig, 2016), como en algunos estudios previos. Aunque la métrica del paisaje que utilizamos para construir la variable regresora es reduccionista o simplista, un abordaje a escala de paisaje sigue siendo importante para capturar el efecto de procesos tales como la polinización sobre el rendimiento del cultivo (Le Provost et al., 2021). Otra métrica del paisaje como la calidad del hábitat (e.g., diversidad de plantas; estructura de la comunidad de plantas; etc.) debería considerarse para capturar el efecto de otros procesos ecosistémicos (e.g., presencia y control de plagas, avance de malezas, herbívora, sitios de nidificación para los polinizadores, etc.), además de la polinización sobre los cultivos (Kremen et al., 2007; Liere et al., 2015). Además, las respuestas entre el rendimiento y la cantidad de hábitat seminatural podrían variar de acuerdo con los distintos radios considerados alrededor de los lotes de cultivos entre estudios (1,5 y 6 km; Goldenberg et al., 2022 y este estudio, respectivamente) ya que los rangos de vuelo de los principales polinizadores registrados en soja (*Apis mellifera*) exceden 1,5 km (e.g., Milfont et al., 2013; Zelaya et al., 2018; Huais et al., 2020).

La soja es principalmente autógena, sin embargo, existe evidencia suficiente que respalda la polinización entomófila de la misma y el impacto positivo de la polinización biótica sobre el número de semillas y/o el rendimiento del cultivo (Klein et al., 2007; Chacoff et al., 2010; Zelaya et al., 2018; Garibaldi et al., 2021; Santone et al., 2022). Existe la idea general de que una proporción del 20 % de hábitat seminatural circundante al lote de cultivo de soja (y otros cultivos), es suficiente para saturar los requisitos del cultivo en cuanto a la provisión de polinización y otros procesos ecosistémicos benéficos para el cultivo (Garibaldi et al., 2020). Aunque no se desarrollaron análisis explícitos, nuestros resultados sugieren que la proporción de hábitat seminatural necesario para brindar lugares de anidación y fuentes de alimento para los polinizadores que puedan garantizar polinización en la soja y que repercuta en el rendimiento, estaría por encima de ese 20 % propuesto. Por ejemplo, en la zona *uno* la cantidad mínima de hábitat seminatural fue de aprox. 17 % y la máxima de aprox. 88 %, y la relación positiva fue lineal y significativa para el rendimiento para todo ese rango de variación. Asimismo, en ninguna de las zonas con porcentaje de hábitat seminatural por

encima del 20 % (zonas *uno*, *dos* y *cuatro*) se encontró una saturación en el rendimiento alrededor de los 20 % de hábitat seminatural circundante. Estos resultados permiten repensar las sugerencias para los gestores y técnicos en producción ya que la planificación en la conservación de hábitat seminaturales para los polinizadores tendría un impacto directo y positivo en la mejora de los rindes en la soja.

El rendimiento de los lotes de soja que incluimos en este estudio podría estar influenciado por otros factores no considerados aquí. Por ejemplo, también podrían influir en el rendimiento por lote el manejo o práctica agrícola que se realiza (asociado al *input* de insumos o tecnologías asociadas a la producción), el tiempo desde que ocurrió la transformación del suelo para la actividad agrícola (Goldenberg et al., 2022) y/o la dependencia a polinizadores que tienen las distintas variedades del cultivo y que se estructura latitudinalmente (da Cunha et al., 2023). Si bien no se realizaron análisis explícitos sobre estos factores adicionales, en la zona *uno* se registró el mayor rendimiento promedio y se ubica en una región en que el cultivo industrial de soja se ha introducido recientemente, si se la compara con las otras zonas. Entonces, el mayor rendimiento podría estar asociado al tiempo de transformación del suelo para esta actividad y no tanto con la proporción de ambientes seminaturales que beneficien a los polinizadores ya que la relación fue positiva, aunque no tan marcada como en las zonas 2 y 3. Por su parte, la zona *tres* presentó mayor rendimiento que las zonas *dos* y *cuatro*, aunque presenta la menor cantidad de hábitat seminatural promedio. Esto podría deberse a que los insumos asociados a la práctica estén enmascarando la intensidad de los efectos de la cantidad de hábitat circundante sobre el rendimiento del cultivo en estas zonas productivas, o bien que menores proporciones de hábitat seminatural tengan mayor impacto comparativo a la zona 1. A su vez, el rendimiento promedio en cada zona, y entre las zonas, puede estar influenciado por la dependencia diferencial a polinizadores que se relaciona con factores latitudinales (da Cunha et al., 2023). En cualquier caso, para mejorar nuestro entendimiento sobre el rol del paisaje y los polinizadores en la producción de este cultivo, se requieren estudios adicionales que contemplen factores de análisis en conjunto ya que pueden estar vinculados a estas posibles causales de las variaciones en los rendimientos del cultivo de soja en estas zonas productivas.

En resumen, este estudio proporciona evidencia correlacional de una influencia positiva de la cantidad proporcional de hábitat seminatural circundante al lote de cultivo sobre el número de semillas por planta y el rendimiento del cultivo de soja, en una escala -de paisaje- amplia para la región. Los resultados permiten enfatizar la importancia de conservar los paisajes seminaturales (e.g., bosques nativos, pastizales, humedales) para promover la biodiversidad y los bienes ecosistémicos comunes los que, además, resultan beneficiosos para la producción agrícola.

Agradecimientos

A la Dra. Ana Anton, por alentarme a encarar este proyecto y acompañarme durante el mismo.

A mis directores, Dres. Leonardo Amarilla y Leonardo Galetto, por su generosidad y paciencia incondicionales a lo largo del trabajo.

A la Mg. Biól. Daihana S. Argibay del IMBIV (CONICET-UNC) y del Centro de Ecología y Recursos Naturales Renovables (CERNAR, FCEFYN-UNC) por estimar las métricas del paisaje y realizar la Fig. 1. A Gabriel Grilli (IMBIV) por el muestreo realizado junto a Leonardo Amarilla en las zonas *uno* y *dos*. A Matías Maggi (CONICET) y José Vespriani (Universidad Nacional de Rosario) por los muestreos realizados en las zonas *tres* y *cuatro* respectivamente. A CONICET (PDTS) y SECyT (UNC) por el financiamiento otorgado para desarrollar este proyecto.

A mi familia.

Bibliografía

- Aizen, M. A., Garibaldi, L. A., & Dondo, M. (2009). Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina. *Ecología Austral*, 19(1), 045-054.
- Bates, D., & Sarkar, D. (2007). lme4: linear mixed-effects models using Eigen and Eigen++ classes. R package version 0.9975-11. <http://www.r-project.org/>.
- Beekman, M., & Ratnieks, F.L.W. (2000). Long-range foraging by the honey-bee, *Apis mellifera* L. *Functional Ecology*, 14, 490–496. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2000.00443.x>.
- Bivand, R., & Wong, D. (2018). spdep: Spatial Dependence: Weighting Schemes, Statistics and Models (R package version 1.1-2). Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=spdep>.
- Cáceres, D. M. (2015). Accumulation by dispossession and socioenvironmental conflicts caused by the expansion of agribusiness in Argentina. *Journal of Agrarian Change*, 15, 116–147. <https://doi.org/10.1111/joac.12057>.
- Chacoff, N.P., Morales, C.L., Garibaldi, L.A., Ashworth, L., & Aizen, M.A. (2010). Pollinator dependence of Argentinean agriculture: current status and temporal analysis. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*, 3, 106–116.
- Crutzen, P. J., & Stoermer, E. F. (2000). Global change newsletter. *The Anthropocene*, 41, 17-18.
- da Cunha, N. L., Chacoff, N. P., Sáez, A., Schmucki, R., Galetto, L., Devoto, M., ... & Aizen, M. A. (2023). Soybean dependence on biotic pollination decreases with latitude. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 347, 108376.
- Dicks, L. V., Viana, B., Bommarco, R., Brosi, B., del Coro Arizmendi, M., Cunningham, S. A., Galetto, L., Hill, R., Lopes, A.V., Pires, C., Taki, H., & Potts, S.G. (2016). Ten policies for pollinators. *Science*, 354(6315), 975-976.
- Dicks, L. V., Breeze, T. D., Ngo, H. T., Senapathi, D., An, J., Aizen, M. A., ... & Potts, S. G. (2021). A global-scale expert assessment of drivers and risks associated with pollinator decline. *Nature Ecology & Evolution*, 5(10), 1453-1461.
- ESA (European Space Agency) (2021). Sentinel-2. Disponible en: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34(1), 487-515.
- Fahrig, L. (2013). Rethinking patch size and isolation effects: the habitat amount hypothesis. *Journal of Biogeography*, 40(9), 1649-1663.
- FAOSTAT (2023). Food and Agriculture Organization of the United Nations-Statistic Division <https://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- Galetto, L., Aizen, M. A., Arizmendi, M. D. C., Freitas, B. M., Garibaldi, L. A., Giannini, T. C., ... & Imperatriz Fonseca, V. L. (2022). Risks and opportunities associated with pollinators' conservation and management of pollination services in Latin America. *Ecología Austral*, 32, 055-076.

- Garibaldi, L., Oddi, F., Miguez, F., Bartomeus, I., Orr, M., Jobbagy, E., Kremen, C., Schulte, L., Hughes, A., Bagnato, C., Abramson, G., Brodgewater, P., Gomez Carella, D., Díaz, S., Dicks, L., Ellis, E., Goldenberg, M.G., Huaylla, C., Kuperman, M., Locke, H., Mehrabi, Z., Santibanez, F., & Chao-Dong, Z., (2020). Working landscapes need more than 20% native habitat. *Conservation Letters*, 14, e12773 <https://doi.org/10.1111/conl.12773>.
- Garibaldi, L. A., Schulte, L. A., Jodar, D. N. N., Carella, D. S. G., & Kremen, C. (2021). Time to integrate pollinator science into soybean production. *Trends in Ecology & Evolution*, 36(7), 573-575.
- Goldenberg, M. G., Burian, A., Seppelt, R., Ossa, F. A. S., Bagnato, C. E., Satorre, E. H., ... & Garibaldi, L. A. (2022). Effects of natural habitat composition and configuration, environment and agricultural input on soybean and maize yields in Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 339, 108133.
- Gonzalez, 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.
- Google LLC. Google Earth. Retrieved [febrero de 2017], desde [<https://earth.google.com/web>].
- Hartig, F. (2018). DHARMA: Residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models. R package version 0.2.0.
- Huais, P. Y., Grilli, G., Amarilla, L. D., Torres, C., Fernández, L., & Galetto, L. (2020). Forest fragments influence pollination and yield of soybean crops in Chaco landscapes. *Basic and Applied Ecology*, 48, 61-72.
- Jackson, N. D., & Fahrig, L. (2016). Habitat amount, not habitat configuration, best predicts population genetic structure in fragmented landscapes. *Landscape Ecology*, 31(5), 951-968.
- Klein, A. M., Vaissière, 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.
- Kremen, C., Williams, N.M., Aizen, M.A., Gemmill-Herren, B., LeBuhn, G., Minckley, R., Packer, L., Potts, S.G., Roulston, T., Steffan-Dewenter, I., V´azquez, D.P., Winfree, R., Adams, L., Crone, E.E., Greenleaf, S.S., Keitt, T.H., Klein, A.-M., Regetz, J., & 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, 299–314. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01018.x>.
- Lüdecke, D. (2018). ggeffects: Tidy data frames of marginal effects from regression models. R package version 1.0.1.
- Mastrángelo, M.E., Pérez-Harguindeguy, N., Enrico, L., Bennett, E., Lavorel, S., Cumming, G.S., Abeygunawardane, D., Amarilla, L.D., Burkhard, B., (...) & Zoeller, K. (2019). Key knowledge gaps to achieve global sustainability goals. *Nature Sustainability*, 2(12), 1115-1121.
- 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.

- Monasterolo, M., Musicante, M. L., Valladares, G. R., & Salvo, A. (2015). Soybean crops may benefit from forest pollinators. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202, 217-222.
- Le Provost, G., Thiele, J., Westphal, C., Penone, C., Allan, E., Neyret, M., Van Der Plas, F., Ayasse, M., (...) & Manning, P. (2021). Contrasting responses of above-and belowground diversity to multiple components of land-use intensity. *Nature Communications*. 12, 1–13.
- Liere, H., Kim, T. N., Werling, B. P., Meehan, T. D., Landis, D. A., & Gratton, C. (2015). Trophic cascades in agricultural landscapes: indirect effects of landscape composition on crop yield. *Ecological Applications*, 25(3), 652-661.
- Oksanen, J. (2010). Vegan: community ecology package. <http://vegan.r-forge.r-project.org/>.
- Oyarzábal, M., Clavijo, J., Oakley, L., Biganzoli, F., Tognetti, P., Barberis, I., ... & León, R. J. (2018). Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología Austral*, 28(1), 40-63.
- Pebesma, E. (2021). sp: Classes and Methods for Spatial Data. R package version 1.4-7. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=sp>.
- QGIS Development Team., 2016. QGIS Geographic Information System. <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Development Team. (2018). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Rico, Y. (2019). Landscape genetics of Mexican biodiversity: A review. *Acta Universitaria* 29, e1894. doi. <http://doi.org/10.15174.au.2019.1894>.
- Sáez A, Sabatino M, & Aizen MA. (2012). Interactive Effects of Large- and Small-Scale Sources of Feral Honey-Bees for Sunflower in the Argentine Pampas. *PLoS ONE*, 7(1), e30968. doi:10.1371/journal.pone.0030968.
- Santone, A., Mazzei, M. P., Vesprini, J., Torres, C., Amarilla, L. D., & Galetto, L. (2022). Pollination service and soybean yields. *Acta Oecologica*, 116, 103846.
- Sarandón, S. J., & Flores, C. C. (2014). Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables. Colección libros de cátedra. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. Capítulo, 5, 131-158.
- Saura, S. (2021). The Habitat Amount Hypothesis implies negative effects of habitat fragmentation on species richness. *Journal of Biogeography*, 48(1), 11-22.
- Steffan-Dewenter, I., Kuhn, A. (2003). Honeybee foraging in differentially structured landscapes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 270, 569–575. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2292>.
- Waddington, K.D., Visscher, P.K., Herbert, T.J., & Raveret, M.R., 1994. Comparisons of forager distributions from matched in suburban honeybee colonies environments. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 35, 423–429. <https://doi.org/10.1007/BF00165845>.
- Wickham, H., 2009. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis.
- Zelaya, P. V., Chacoff, N. P., Aragón, R., & Blendinger, P. G. (2018). Soybean biotic pollination and its relationship to linear forest fragments of subtropical dry Chaco. *Basic and Applied Ecology*, 32, 86-95.