

Selección de plantas beneficiosas para los polinizadores de cultivos: aplicación de algoritmos genéticos

Haedo Joana Paola¹[0000-0001-7069-574X] and Nelida Beatriz Brignole²³[0000-0002-4795-2872]

¹ Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS), CONICET, Bahía Blanca, Argentina.
jphaedo@cerzos-conicet.gob.ar

² Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Computación Científica (LIDECC)- Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Computación (DCIC), Universidad Nacional del Sur (UNS)- Bahía Blanca, Argentina.

³ Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI), UNS-CONICET, Bahía Blanca, Argentina.
dybrigno@criba.edu.ar

Resumen. La polinización biótica es un servicio ecosistémico esencial, pues gran parte de los cultivos producidos para el consumo humano necesitan de ella para incrementar la cantidad y calidad de los frutos y semillas. A nivel mundial, el área agrícola para cultivos dependientes de polinizadores crece, exacerbando la crisis de polinización por la disminución de la diversidad de polinizadores. La restauración de los paisajes agrícolas mediante el uso de plantas en los bordes de cultivo podría aumentar abundancia de polinizadores. Dado que existen muchas especies de plantas potencialmente elegibles para conformar estas nuevas comunidades, crear un “mix” óptimo para un determinado cultivo es un desafío agronómico. En este estudio, se desarrolló un algoritmo genético para seleccionar un “mix” óptimo de cinco plantas que promueva la mayor diversidad de polinizadores en los cultivos de alfalfa (*Medicago sativa*). Utilizando como dato de entrada una meta-red de interacciones conformada por 32 especies de plantas y 31 especies de abejas, se logró una reducción de la dimensión de la red de interacción manteniendo la mayor cantidad de especies de polinizadores posibles.

Palabras clave: Computación evolutiva, Polinización, Red de interacciones.

1 Introducción

La polinización biótica es un servicio ecosistémico esencial, ya que gran parte de los cultivos producidos para el consumo humano necesitan de ella para incrementar tanto rendimiento como la calidad de los frutos y semillas [1]. A nivel mundial, el área agrícola utilizada para la producción de cultivos dependiente de los polinizadores está en continuo crecimiento [2]. Por otro lado, se habla de una “crisis de polinización”

causada por la disminución de la abundancia y diversidad de polinizadores [3–6]. Un factor importante en la pérdida de polinizadores en los sistemas agrícolas es la disminución de los recursos florales y de sitios de nidificación para las especies polinizadoras (principalmente insectos) [7]. La restauración de los paisajes agrícolas mediante el uso de plantas en los bordes de cultivo podría aumentar la abundancia de polinizadores y favorecer la polinización [8]. Debido a que hay muchas especies de plantas potencialmente elegibles para conformar estas nuevas comunidades, crear un “mix” óptimo de plantas para un determinado cultivo es un desafío agronómico. Las técnicas computacionales, como los algoritmos genéticos, podrían ser útiles para resolver este problema.

Como el objetivo es aumentar la abundancia de un grupo particular de especies (los polinizadores de un cultivo), se debe tener en cuenta la red de interacciones entre las plantas y los polinizadores de cultivo [9]. Las redes de interacción ecológica describen la estructura de comunidades biológicas permitiendo medir el papel ecológico de cada una de las especies [10]. La representación gráfica de una red incluye nodos, que son las especies de los dos grupos que interactúan (como plantas y polinizadores), los cuales están interconectados por medio de enlaces (Fig.1). Las redes de interacción planta-polinizador también pueden representarse en forma de matriz, cuyas filas y columnas son las especies de plantas y polinizadores, y los valores de las celdas la presencia (1) o la ausencia (0) de interacción entre las especies (Fig. 1). Hasta ahora, solo dos estudios han abordado la técnica de los algoritmos genéticos aplicada a la optimización de redes de interacciones en ambientes agrícolas [9, 11].

En el presente trabajo, se diseñó un algoritmo genético con el objetivo de seleccionar un “mix” de cinco (5) plantas para cultivar en los bordes de cultivos de alfalfa (*Medicago sativa*) cuya red de interacciones planta-polinizador posea la mayor diversidad de polinizadores posible.

	A	B	C	D	E
a	1	1	1	1	1
b	1	1	1	0	0
c	1	1	0	0	0
d	1	0	0	0	0
e	1	0	0	0	0

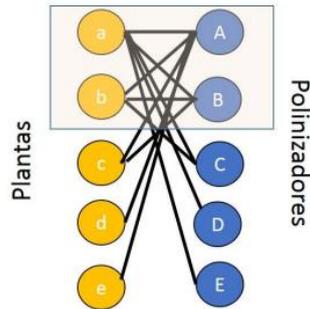


Fig. 1. Red de interacciones planta polinizador. En la parte superior se muestra una matriz de interacción hipotética en la que las columnas (A-E) representan las especies de animales y las filas (a-e) las especies de plantas. Los unos (1) o ceros (0) en cada celda representan la presencia o ausencia de la interacción entre las especies de la fila y columna correspondiente. La figura en la parte inferior muestra los mismos datos, pero en forma de red bipartita, los nodos amarillos representan las especies de plantas y los nodos azules las de polinizadores. Cada interacción es indicada mediante un enlace entre los nodos.

2 Materiales y métodos

Sitio de estudio y cultivo

La alfalfa es un cultivo proveniente de Asia, que se utiliza en distintas partes del mundo como forraje para ganado. La zona del Valle Inferior del Río Colorado (VIRC), es una de las mayores productoras de semillas de alfalfa de Argentina [12]. Se ha demostrado que para la producción de semillas de calidad, la alfalfa necesita de la visita de polinizadores, especialmente de abejas, debido a la morfología de sus flores [13, 14]. Sin embargo, la abundancia y diversidad de polinizadores en el VIRC es muy baja, por lo que la producción de semillas es bastante deficiente. Es por ello, que el cultivo de plantas en los bordes de cultivo puede ser una buena forma de atraer polinizadores y mejorar el rendimiento del cultivo.

Construcción de la red de interacciones planta-polinizador

Para conocer las interacciones entre los polinizadores y las plantas que potencialmente podrían ser utilizadas en bordes de cultivo, se realizaron censos de polinizadores durante toda la extensión de la floración de alfalfa (desde finales de diciembre hasta principios de febrero) en dos

años consecutivos. Estos censos se hicieron en 8 (año 1) y 11 (año 2) campos de alfalfa del VIRC. Los censos consistieron en caminatas semanales de 20 minutos en dos transectos de 50×2 m (100 m²), uno en el borde (sobre plantas que crecen espontáneamente en ellos) y otro dentro del cultivo. En cada caminata se cuantificó el número de visitas de abejas por inflorescencia y por minuto (para un enfoque comparable, consulte [15]). Los polinizadores fueron capturados, sacrificados y llevados al laboratorio, donde fueron montados en alfileres entomológicos y determinados al nivel taxonómico más bajo posible. Los especímenes fueron depositados en la Colección Entomológica de LIBA (CERZOS) y la Colección Entomológica de la Catedra de Botánica General (FAUBA), Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina. Con los datos tomados durante los dos años de muestreo se construyó una única red de interacciones planta-polinizador (meta red) que incluye tanto el cultivo como las otras especies de plantas que se encontraban en los bordes. Con esta meta red se pudo observar cuales son las especies de polinizadores compartidos entre las plantas de los bordes y el cultivo de alfalfa, la diversidad de estas especies (principalmente abejas nativas) es las que se intentó optimizar con el algoritmo genético desarrollado. El listado original de plantas y especies de polinizadores se encuentra detallado en el Anexo 1.

Algoritmo genético. Se desarrolló un algoritmo genético para encontrar el “mix” (definido como un listado de cinco plantas) que maximicen la diversidad de polinizadores (definido como el número de especies de polinizadores) en la red de interacciones planta polinizador. Para desarrollarlo se utilizó como dato de entrada la meta red de interacciones anteriormente construida, conformada por 32 especies de plantas y 31 especies de abejas. El resultado que se esperó obtener es una red conformada por cinco especies de plantas y la mayor cantidad de especies de polinizadores posible.

Individuo y población inicial. Cada uno de los individuos se construyó mediante la selección de cinco especies al azar dentro de la meta red. Cada una de estas especies tenía asociadas sus interacciones con las especies de polinizadores. Por lo tanto, cada individuo se representó como una matriz cuyas columnas eran las especies de plantas, las filas las especies de polinizadores y las celdas la presencia (1) o ausencia (0) de interacción entre ambas. La población inicial estuvo conformada por 1000 individuos.

Función de fitness. La función de fitness se definió como la riqueza (R) de polinizadores asociada cada “mix” de cinco plantas. La riqueza de polinizadores se calculó como la cantidad de especies de polinizadores que interactuaron con al menos una especie de planta en el “mix”. La función de fitness puede representarse de la siguiente manera:

$$R = \sum_{j=1}^n I_j$$

Donde n es el número de especies de polinizadores, I_j es una variable indicadora que toma el valor 1 si la especie de polinizador j interactúa con al menos una de las cinco especies de plantas del “mix”, y 0 en caso contrario. La variable I_j se puede expresar como:

$$I_j = \max_{i=1}^5 x_{ij}$$

Donde x_{ij} es el valor de la celda en la fila i y columna j de la matriz x , que indica si existe (1) o no (0) una interacción entre la especie de planta i y la especie de polinizador j . La expresión indica que el valor de la variable I_j es igual al máximo valor en la fila j de la matriz x . Es decir, si existe al menos una interacción entre la especie de polinizador j y alguna de las cinco especies de plantas del “mix”, el valor máximo en la fila j de la matriz x será 1, y por lo tanto el valor de I_j será igual a 1.

Operadores del algoritmo genético. Dentro de cada iteración del algoritmo, se seleccionaron al azar 500 individuos (50% de la población inicial) y se sometieron a un cruzamiento uniforme. El cruzamiento consistió en el reemplazo de dos especies del individuo (filas “2” y “4” de la matriz), por otras dos seleccionadas al azar del listado de plantas original. Los individuos resultantes o hijos se unieron a la población inicial, y se sometió al 10% (150 individuos) a mutación. La mutación consistió en el reemplazo de una especie (fila “1” de la matriz) por otra seleccionada al azar dentro del listado original de especies de plantas. Para la selección, se construyó un ranking descendente de fitness para los 1500 individuos (población inicial más hijos mutados) y seleccionaron los 1000 mejores individuos. Esta nueva población se volvió a someter al proceso de operaciones genéticas a lo largo de 100 generaciones. Como resultado final se obtuvo un individuo conformado por cinco especies cuya riqueza de polinizadores en la máxima posible. En la Fig. 2 se muestra un esquema del algoritmo genético. El algoritmo se corrió 10 veces y se estimó la frecuencia de selección de cada una de las especies de plantas.

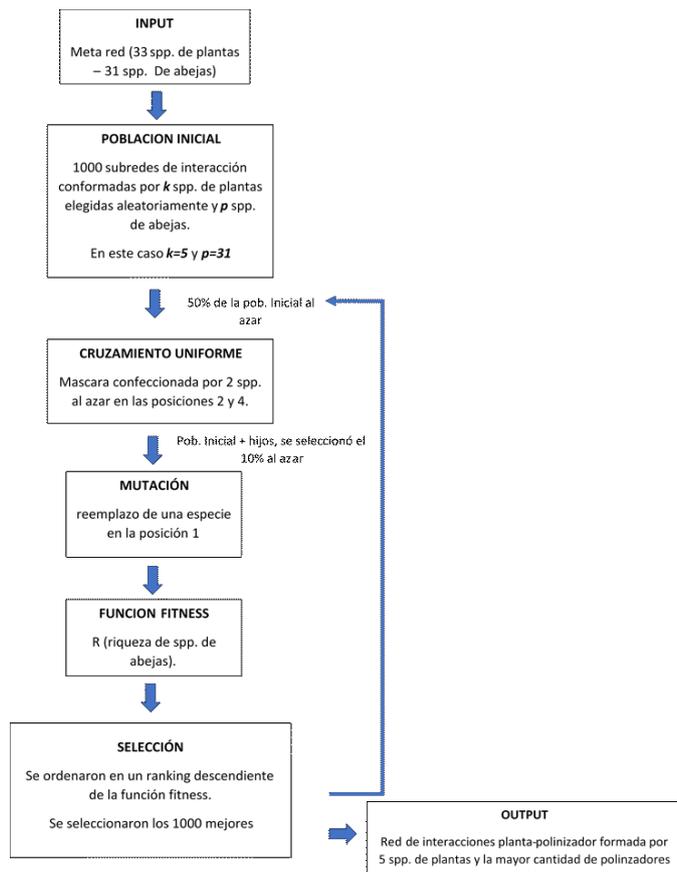


Fig. 2. Esquema del algoritmo genético desarrollado

3 Resultados

En este estudio utilizamos una meta-red de interacciones que incluyó 31 especies de abejas y 33 especies de plantas en 19 campos de alfalfa del VIRIC. Se seleccionaron sólo especies de abejas y se excluyeron otras especies de insectos que visitan las flores, ya que la alfalfa solo puede ser polinizada por abejas [16]. Después de 10 corridas, se encontró que tres especies de plantas (*Diploaxis tenuifolia*, *Centaurea solstitialis*, *Carduus nutans*) formaron parte del mix 10 veces, mientras que *Cichorium intybus* y *Eupatorium sp.* estuvieron presentes en 6 corridas. Además, el cultivo, *Medicago sativa*, fue seleccionado en todas las corridas. La máxima riqueza de especies de abejas encontrada fue de 23 en los mixes que contenían *Cichorium intybus* y *Eupatorium sp.*, sin embargo, estas dos especies interactuaron con distintas especies de polinizadores, según se muestra en la Tabla 2. Se encontró que estas cinco especies de plantas compartían un número determinado de especies de abejas con el cultivo de alfalfa. Por lo tanto, su presencia en los bordes de cultivo podría aumentar las visitas de polinizadores al cultivo, mejorando así el servicio de polinización y, por consiguiente, el rendimiento del cultivo [14].

Tabla 1. Especies seleccionadas por el algoritmo genético luego de 10 corridas.

Especie de planta	Frecuencia de selección
<i>Diplotaxis tenuifolia</i>	10
<i>Centaurea solstitialis</i>	10
<i>Carduus nutans</i>	10
<i>Medicago sativa</i>	10
<i>Cichorium intybus</i>	6
<i>Eupatorium sp.</i>	6

Tabla 2. Especies seleccionadas y abejas con los que interactúan.

	<i>Medicago sativa</i>	<i>Carduus nutans</i>	<i>Centaurea solstitialis</i>	<i>Cichorium intybus</i>	<i>Diplotaxis tenuifolia</i>	<i>Eupatorium sp.</i>
<i>Apis mellifera</i>	1	1	1	1	1	1
<i>Augochloropsis</i>	0	1	0	1	1	0
<i>Bombus atratus</i>	0	1	1	0	0	0
<i>Bombus bellincola</i>	1	1	0	0	0	0
<i>Bombus sp.</i>	1	1	1	1	0	0
<i>Colletes sp. 1</i>	1	0	1	0	0	0
<i>Diadasia sp.1</i>	1	0	1	0	0	0
<i>Emphorino sp.</i>	0	0	1	0	0	0
<i>Exomalopsis sp.</i>	1	0	1	0	1	0
<i>Halictidae sp. 1</i>	0	0	0	0	1	0
<i>Megachile (Acentron) sp.</i>	0	1	1	0	0	1
<i>Megachile (Pseudocentron)</i>	0	0	1	0	0	1
<i>Megachile jenseni</i>	0	0	1	0	0	0
<i>Megachile rotundata</i>	1	0	1	1	1	1
<i>Megachile sp.</i>	1	0	1	0	0	0
<i>Melissodes rufithorax</i>	1	1	1	1	1	1

<i>Melissoptila tandilensis</i>	0	0	1	0	0	1
<i>Psaenythia sp. 1</i>	1	0	0	0	0	0
<i>Pseudagapostemon huinca</i>	0	0	0	0	1	0
<i>Pseudagapostemon sp.</i>	0	1	0	1	1	1
<i>Xylocopa atamisquensis</i>	1	0	0	1	0	0
<i>Xylocopa mendozaana</i>	1	1	0	0	0	0
<i>Xylocopa splendula</i>	1	1	0	0	1	0

4 Discusión y conclusiones

Este trabajo presenta una primera aproximación a un algoritmo genético para seleccionar plantas que aumenten la riqueza de polinizadores en cultivos de alfalfa. El algoritmo ha demostrado ser efectivo al lograr una alta riqueza de polinizadores con un número mínimo de plantas, lo que podría ser útil en el diseño de bordes de cultivos. Es importante destacar que este análisis contribuye al desarrollo productivo de la provincia de Buenos Aires, ya que el VIRIC es una de las zonas más importantes de producción de semillas de alfalfa [12]. Al utilizar un algoritmo genético para seleccionar plantas que aumenten la riqueza de polinizadores en cultivos de alfalfa, nuestro estudio aplica una herramienta que es valiosa para mejorar la producción de semillas de alfalfa en la región.

Se requieren métodos predictivos basados en la teoría de redes para aprovechar los servicios ecosistémicos y construir agroecosistemas más resilientes [17]. Los algoritmos genéticos son una herramienta computacional muy útil para identificar la mezcla óptima de especies, y este modelo sencillo puede mejorarse para aumentar su sensibilidad en la selección de plantas. Sería interesante evaluar si las características de la red inicial, como su robustez y estabilidad, se mantienen en las redes reducidas, ya que esto podría influir en el éxito de la comunidad artificial creada en el borde de cultivo [18, 19]. Aunque el número de veces que se corrió el algoritmo puede ser insuficiente para llegar a conclusiones sólidas, en el futuro se pueden implementar diferentes técnicas de cruzamiento, mutación y selección para lograr una mayor diversidad de individuos y un mejor fitness. Además, se espera que este mismo algoritmo pueda utilizarse como soporte de decisión para optimizar otras características importantes de las redes de interacciones, como la centralidad de las especies dentro de la red.

Referencias

1. Klein, A.M., Vaissière, B.E., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Tscharntke, T.: Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 274, 303–313 (2007). <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>
2. Aizen, M.A., Garibaldi, L.A., Harder, L.D.: Myth and reality of a global crisis for agricultural pollination. *Ecol. Austral.* 32, 599–820 (2022). <https://doi.org/https://doi.org/10.25260/EA.22.32.2.1.1875>
3. Biesmeijer, J.C., Roberts, S.P.M., Reemer, M., Ohlemüller, R., Edwards, M., Peeters, T., Schaffers, A.P., Potts, S.G., Kleukers, R., Thomas, C.D., Settele, J., Kunin, W.E.: Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* (80), 313, 351–354 (2006). <https://doi.org/10.1126/science.1127863>
4. Carvalheiro, L.G., Kunin, W.E., Keil, P., Aguirre-Gutiérrez, J., Ellis, W.N., Fox, R., Groom, Q., Hennekens, S., Van Landuyt, W., Maes, D., Van de Meutter, F., Michez, D., Rasmont, P., Ode, B., Potts, S.G., Reemer, M., Roberts, S.P.M., Schaminée, J., Wallisdeivries, M.F., Biesmeijer, J.C.: Species richness declines and biotic homogenisation have slowed down for NW-European pollinators and plants. *Ecol. Lett.* 16, 870–878 (2013). <https://doi.org/10.1111/ele.12121>
5. Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., Kunin, W.E.: Global pollinator declines: Trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol.* 25, 345–353 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007>
6. Zattara, E.E., Aizen, M.A.: Worldwide occurrence records suggest a global decline in bee species richness. *One Earth.* 4, 114–123 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.12.005>
7. Garibaldi, L.A., Carvalheiro, L.G., Leonhardt, S.D., Aizen, M.A., Blaauw, B.R., Isaacs, R., Kuhlmann, M., Kleijn, D., Klein, A.M., Kremen, C., Morandin, L., Scheper, J., Winfree, R.: From research to action: Enhancing crop yield through wild pollinators. *Front. Ecol. Environ.* 12, 439–447 (2014). <https://doi.org/10.1890/130330>
8. Sidhu, C.S., Joshi, N.K.: Establishing wildflower pollinator habitats in agricultural farmland to provide multiple ecosystem services. *Front. Plant Sci.* 7, 1–5 (2016). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00363>
9. M'Gonigle, L.K., Williams, N.M., Lonsdorf, E., Kremen, C.: A Tool for Selecting Plants When Restoring Habitat for Pollinators. *Conserv. Lett.* 10, 105–111 (2017). <https://doi.org/10.1111/conl.12261>
10. Bascompte, J., Jordano, P.: Redes mutualistas de especies. *Investig. Cienc.* 1–10 (2008)
11. Windsor, F.M., Tavella, J., Rother, D.C., Raimundo, R.L.G., Devoto, M., Guimarães, P.R., Evans, D.M.: Identifying plant mixes for multiple ecosystem service provision in agricultural systems using ecological networks. *J. Appl. Ecol.* 58, 2770–2782 (2021). <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14007>

12. Renzi, P., Reinoso, O., Crisanti, P.: Alfalfa (*Medicago sativa*) y otras forrajeras en el valle bonaerense del río Colorado. *Inf. Tec.* No. 56, ISSN 0328-3399, INTA ediciones. (2018)
13. Haedo, J.P., Martínez, L.C., Graffigna, S., Marrero, H.J., Torretta, J.P.: Managed and wild bees contribute to alfalfa (*Medicago sativa*) pollination. *Agric. Ecosyst. Environ.* 324, 107711 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107711>
14. Haedo, J.P., Graffigna, S., Martínez, L.C., Torretta, J.P., Marrero, H.J.: Estimación del servicio de polinización en un cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) mediante la cuantificación de flores disparadas. *Ecol. Austral.* 32, 297–598 (2022)
15. Memmott, J.: The structure of a plant-pollinator food web. *Ecol. Lett.* 2, 276–280 (1999). <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.1999.00087.x>
16. Haedo, J.P., Graffigna, S., Martínez, L.C., Pérez-Méndez, N., Torretta, J.P., Marrero, H.J.: Effectiveness landscape of crop pollinator assemblages: Implications to pollination service management. *Agric. Ecosyst. Environ.* 348, 108417 (2023). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108417>
17. Raimundo, R.L.G., Guimarães, P.R., Evans, D.M.: Adaptive Networks for Restoration Ecology. *Trends Ecol. Evol.* 33, 664–675 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.06.002>
18. Bascompte, J., Stouffer, D.B.: The assembly and disassembly of ecological networks. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 364, 1781–1787 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0226>
19. Pockock, M.J.O., Evans, D.M., Memmott, J.: The robustness and restoration of a network of ecological networks. *Science* (80-.). 335, 973–977 (2012). <https://doi.org/10.1126/science.1214915>