

FITOSANITARIOS EN LA ARGENTINA: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL DESTINO E IMPACTO SOBRE EL AMBIENTE EDÁFICO Y LOS SERVICIOS DE LOS ECOSISTEMAS EN EL PERÍODO 2010-2020

María Luján Soria Mirlhen¹, Florencia Rositano^{2,3*} y Gabriela Civeira⁴

¹ Universidad de Morón, Escuela Superior de Ingeniería, Informática y Ciencias Agroalimentarias

² Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Área de Educación Agropecuaria y Ambiental - Cátedra de Extensión y Sociología Rurales

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁴ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto de Suelos

*E-mail: rositano@agro.uba.ar

Recibido: 14/12/2023

Aceptado: 28/06/2024

RESUMEN

La mayoría de los agroecosistemas argentinos utilizan fitosanitarios para combatir las adversidades bióticas. Una gran proporción es liberada al ambiente, siendo el suelo uno de los destinos alcanzados. Su aplicación continua supondría un riesgo para este recurso, así como para la provisión de servicios de los ecosistemas (SE). Este trabajo analizó el estado de situación, las áreas de investigación y de vacancia, en relación con trabajos realizados para determinar el efecto de herbicidas, plaguicidas e insecticidas sobre el ambiente edáfico y los SE que este provee en la Argentina durante el período 2010-2020. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica y se obtuvieron 75 artículos, los cuales fueron analizados cualitativa y cuantitativamente. Los resultados demostraron que los estudios se realizaron, mayoritariamente, en suelos de la Región Pampeana (79%), en comparación con las restantes regiones argentinas. Los herbicidas fueron los fitosanitarios más utilizados (67%), seguidos por los insecticidas (19%) y fungicidas (1%); también se evaluaron combinaciones de fitosanitarios (14%). Las propiedades edáficas se analizaron tanto en forma individual (el 51% priorizó el análisis de las propiedades biológicas) como en combinación (propiedades fisicoquímicas: 27%, quimicobiológicas: 3% y fisicoquímico-biológicas: 11%). La combinación de herbicidas e insecticidas evaluó, en mayor medida, el destino e impacto sobre las propiedades biológicas y los SE de regulación y, en menor medida, las propiedades físico-químicas y los SE de soporte. Estos resultados constituyen un aporte para fomentar la investigación del comportamiento de los fitosanitarios en las propiedades edáficas y en los SE provistos por suelos de distintas regiones argentinas.

Palabras clave: revisión bibliográfica, fitosanitarios, propiedades edáficas, servicios de los ecosistemas, regiones argentinas.

PHYTOSANITARY PRODUCTS IN ARGENTINA: A BIBLIOGRAPHIC REVIEW ABOUT THE DESTINATION AND IMPACT ON SOIL ENVIRONMENT AND ECOSYSTEM SERVICES IN THE 2010-2020 PERIOD

ABSTRACT

Most of argentinian agroecosystems use phytosanitary products to combat biotic adversities. A large proportion is released into the environment, with soil being one of the compartments reached. The continued application of these chemicals would pose a risk to this resource, as well as for those ecosystem services (ES) it provides. This work analyzed the state of the situation, the research and vacancy areas, to determine the effect of herbicides, pesticides and insecticides on the edaphic environment and on ES provision in Argentina during 2010-2020 period. To this end, a bibliographic review was carried out and 75 articles were obtained, which were analyzed both qualitatively and quantitatively. The results showed that studies were carried out mostly in soils of the Pampa Region (79%), compared to the rest of argentinian regions. Herbicides were the most commonly used phytosanitary products (67%), followed by pesticides (19%) and fungicides (1%). Combinations of phytosanitary products were also evaluated (14%). Edaphic properties were analyzed both individually (51% of articles prioritized the analysis of biological properties) as in combination (physical-chemistry properties: 27%, chemistry-biological properties: 3%, and physical-chemistry-biological properties: 11%). Mainly, articles combining herbicides and pesticides assessed the destination and impact on biological properties and regulatory ES; while, to a lesser extent, articles assessed the destination and impact on physical-chemical properties and supporting ES. These results constitute a contribution to promote research about the behavior of phytosanitary products in edaphic properties and in those ES provided by soils from different argentinian regions.

Key words: bibliographic research, phytosanitary products, edaphic properties, ecosystem services, argentinian regions.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de fitosanitarios en los sistemas agrícolas tiene como objetivo reducir las pérdidas potenciales de los cultivos causados por malezas, insectos y enfermedades, entre otras, contribuyendo, de esta manera, a aumentar el índice productivo de cada cultivo (Chamorro y Sarandón, 2017). Sin embargo, se estima que solo una fracción alcanza el objetivo, mientras que el resto es liberado al ambiente aun luego de una aplicación correcta (Villaamil Lepori *et al.*, 2013; Chamorro y Sarandón, 2017; Alonso *et al.*, 2018). En este sentido, el suelo es una fracción del ambiente donde estos compuestos pueden ingresar (Alonso *et al.*, 2018; Okada *et al.*, 2018; Pérez *et al.*, 2021). Algunos fitosanitarios infiltran en el suelo junto con el agua de riego o la lluvia (Wauchope, 1978) o se aplican directamente al suelo para controlar insectos o enfermedades afectando diferentes propiedades químicas, físicas y biológicas del ambiente edáfico (Durovic *et al.*, 2011; Lupi *et al.*, 2016). Este proceso puede llevar los productos químicos a horizontes más profundos del suelo e incluso hasta aguas subterráneas (Flury, 1996), afectando al ecosistema y a los servicios proporcionados por la fauna del suelo (Jat *et al.*, 2022).

En los últimos años, se han reportado estudios relacionados al impacto de la aplicación de fitosanitarios (*i.e.* herbicidas, fungicidas e insecticidas) sobre la biodiversidad edáfica de los sistemas productivos (Aparicio *et al.*, 2015; Bernasconi *et al.*, 2021; Pérez *et al.*, 2021). La biodiversidad del suelo es un actor fundamental para el funcionamiento del ecosistema, ya que interviene en numerosos procesos como la formación de la estructura, la descomposición de la materia orgánica e, incluso, es capaz de degradar sustancias que ingresan al suelo (Aparicio *et al.*, 2015; Gunstone *et al.*, 2021). Dado que los organismos que habitan el suelo responden rápidamente ante alteraciones en el sistema edáfico, han sido utilizados como indicadores potenciales de la calidad del suelo (Di Ciocco *et al.*, 2014). En este sentido, el incremento en el uso de fitosanitarios y su presencia en el ambiente edáfico ha generado el interés de la comunidad científica para evaluar el riesgo e impacto que generan estas sustancias sobre la biodiversidad edáfica (Aparicio *et al.*, 2015).

Los suelos y sus propiedades son reconocidos como la matriz que provee servicios de los ecosistemas (*i.e.* beneficios de los ecosistemas hacia la humanidad; MEA, 2005) y pueden ser afectados debido al manejo del ambiente edáfico (Montico *et al.*, 2021).

Los fitosanitarios pueden tener diversos efectos sobre aquellos servicios provistos por el suelo. Por ejemplo, el herbicida glifosato puede alterar la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas (Bott *et al.*, 2008; Henry *et al.*, 2011), lo cual afecta su crecimiento y rendimiento. Por otro lado, los insecticidas pueden tener efectos tóxicos sobre los microorganismos del suelo (macro, meso y microfauna) al reducir la biodiversidad del suelo, afectando no solo la salud del ecosistema sino también su capacidad de proveer una amplia gama de servicios. Por lo tanto, el efecto de los fitosanitarios sobre la estructura y funcionamiento del suelo disminuye, directamente, su capacidad de proveer servicios de los ecosistemas (SE), los cuales son beneficiosos para la producción agrícola (Suárez *et al.*, 2013; Magnoli *et al.*, 2018; Gunstone *et al.*, 2021).

En Argentina, los sistemas agrícolas, tanto intensivos como extensivos, son receptores de fitosanitarios, siendo los herbicidas, insecticidas y fungicidas los compuestos más comúnmente utilizados para disminuir el accionar de las adversidades bióticas (Sarandón *et al.*, 2015; CASAFE, 2016; Montoya *et al.*, 2022). Sin embargo, su excesiva utilización ha generado preocupación en el ámbito científico, por lo que se han llevado a cabo numerosos estudios a campo y laboratorio para evaluar su destino y comportamiento en el ambiente, tanto en la Región Pampeana (Aparicio *et al.*, 2015; Alonso *et al.*, 2018; Caprile *et al.*, 2019a; Bernasconi *et al.*, 2021) como en regiones extrapampeanas (González *et al.*, 2010; Miglioranza *et al.*, 2013; Holzmann *et al.*, 2021; Luzzi *et al.*, 2021).

En este contexto, resulta necesario contar con un análisis integrado sobre el destino e impacto de los fitosanitarios en el suelo. Por ello, el presente estudio tiene como objetivo analizar, a nivel nacional, el estado de situación, las áreas de investigación y de vacancia, en relación con los trabajos realizados para determinar el efecto de herbicidas, insecticidas y fungicidas sobre el ambiente edáfico y sobre los SE que este provee. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica sobre esta temática considerando el período 2010-2020.

METODOLOGÍA

En una primera etapa, se realizó una revisión bibliográfica con el buscador Scopus (www.scopus.com). La fecha de búsqueda fue el 20 de diciembre de 2021. Se relevaron artículos en los cuales estuviera presente la siguiente combinación de palabras clave: ("fate" OR "behaviour") AND ("herbicide" OR "fungicide" OR "insecticide")

OR "pesticide") AND "soils" ("assessment" OR "risk"). Esta búsqueda dio como resultado un total de 88 artículos.

En una segunda etapa, se procedió a realizar la selección de los artículos obtenidos de la búsqueda bibliográfica. Esta actividad estuvo focalizada en dos instancias de lectura. La primera instancia consistió en una lectura de la sección Resumen de cada uno de los artículos. Durante esta instancia, se consideraron dos criterios de selección: (i) estudios realizados en Argentina durante el período 2010-2020 (incluyendo aquellos artículos que fueron aceptados durante 2020, pero publicados en 2021) y (ii) estudios en los cuales se evaluó el destino e impacto de herbicidas, fungicidas e insecticidas en el suelo. En base a estos criterios de selección, se descartaron los artículos de revisión. La segunda instancia de lectura consistió en la lectura completa de los artículos. Durante esta instancia, se excluyeron aquellos que evaluaron, mediante coeficientes, el impacto ambiental de los fitosanitarios en los sistemas agrícolas y aquellos que evaluaron la presencia de fitosanitarios en el agua. Luego de ambas instancias de lectura, se obtuvieron 75 artículos científicos de los cuales 32 se publicaron en revistas nacionales y 43 en revistas internacionales.

Por último, se procedió a analizar la información obtenida mediante un análisis descriptivo y un análisis multivariado. En el primer caso, se ordenó y resumió la información obtenida como resultado de la búsqueda bibliográfica. Con relación al análisis de los SE afectados por la aplicación de fitosanitarios, se consideraron servicios de regulación y soporte surgidos de la clasificación de las propiedades edáficas recopiladas de la literatura (Burbano-Orjuela, 2016; Montico *et al.*, 2021), siendo que las publicaciones sobre estos atributos son muy recientes en la bibliografía nacional e incluyen a las propiedades edáficas como criterio de evaluación (Bedoya-Gómez *et al.*, 2021). El SE de regulación incluyó a las propiedades biológicas sumado a la materia orgánica y el carbono orgánico, mientras que el SE de soporte incluyó a las propiedades químicas y físicas (Bedoya-Gómez *et al.*, 2021; Montico *et al.*, 2021). En el segundo caso, el análisis multivariado se llevó a cabo mediante una tabla de contingencia, utilizada para calcular la probabilidad de asociación entre dos o más variables. La prueba Chi cuadrado en las tablas de contingencia permite identificar si existe una "asociación estadística significativa entre las variables seleccionadas". En este caso, la tabla de contingencia se seleccionó con el propósito de analizar la relación existente

entre las siguientes variables: la aplicación de fitosanitarios, las propiedades edáficas y los SE. El primer análisis se realizó con el software GraphPad Prism (GraphPad 9.0), mientras que el segundo, con InfoStat versión 2020e (Di Rienzo *et al.*, 2020).

RESULTADOS

El uso de fitosanitarios: evaluación de las propiedades y los servicios edáficos a escala nacional

Las publicaciones referidas a la utilización de fitosanitarios mostraron una tendencia hacia el análisis del impacto de los herbicidas sobre el ambiente edáfico (Figura 1). En este sentido, se observa que, de los 75 artículos científicos recopilados, el 67% evaluó herbicidas, el 19% insecticidas y un 1% fungicidas. Un 7% de los artículos comparó el efecto de herbicidas, fungicidas e insecticidas sobre las propiedades edáficas; por ejemplo, Spagnoletti y Chiocchio (2020) estudiaron el impacto de carbendazim (fungicida), cipermetrina (insecticida) y glifosato (herbicida) sobre hongos endófitos. Otro 7% de los artículos comparó el destino y/o impacto de herbicidas e insecticidas; por ejemplo, Dalpiaz y Andriulo (2017) evaluaron el destino de herbicidas (glifosato, atrazina y acetoclor) e insecticidas (imidacloprid y clorpirifos) en dos suelos con características contrastantes. Por otro lado, de los artículos recopilados, no se encontró ninguno que haya trabajado con herbicidas y fungicidas simultáneamente, o con la combinación fungicidas e insecticidas.

En cuanto al impacto de los fitosanitarios sobre las propiedades edáficas, se observó una tendencia hacia el análisis de las propiedades biológicas (Figura 2). En este sentido, un 51% de los artículos recopilados relevó datos del impacto sobre las propiedades biológicas del suelo. Se encontró una sola publicación que analizó el impacto sobre las propiedades químicas, y no se encontraron artículos que evaluaran exclusivamente las propiedades físicas. Un 27% de los artículos recopilados evaluó el destino de los fitosanitarios sobre las propiedades físicas en combinación con las químicas; y un 3% evaluó las propiedades químicas y biológicas en conjunto. No se encontraron artículos que hayan relevado datos sobre el destino e impacto en las propiedades físicas y biológicas de manera simultánea. El 11% de los artículos evaluó el destino e impacto sobre las tres propiedades del suelo en conjunto (Figura 2).

Los herbicidas se utilizaron con mayor frecuencia para analizar su impacto sobre las propiedades biológicas, químicas y físicas de los suelos (Cuadro 1). En el

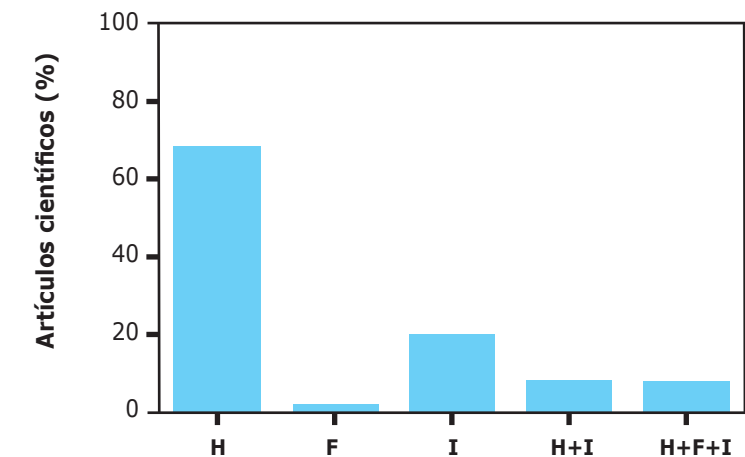


Figura 1. Cantidad de artículos científicos (en porcentaje) en relación con el tipo de fitosanitario utilizado para evaluar el destino e impacto en el ambiente edáfico y los servicios de los ecosistemas provistos por el suelo en Argentina en el período 2010-2020. H: herbicidas; F: fungicidas; I: insecticidas; H+I: herbicidas e insecticidas; H+F+I: herbicidas, fungicidas e insecticidas.

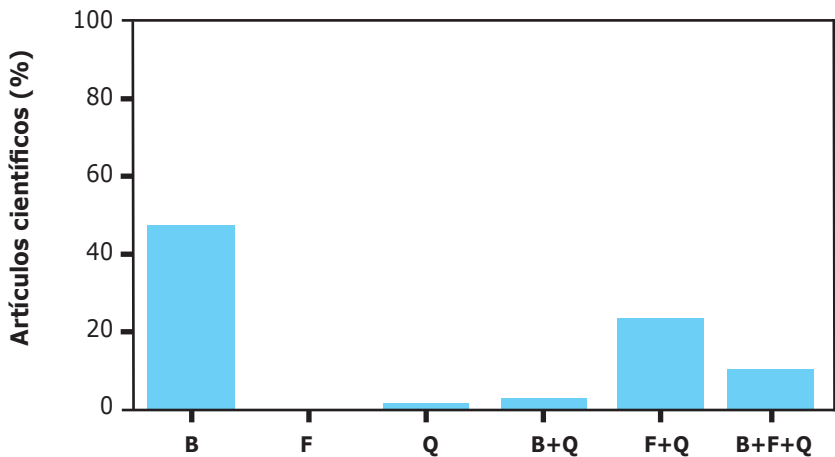


Figura 2. Cantidad de artículos científicos (en porcentaje) en relación con las propiedades edáficas evaluadas en la literatura. B: propiedades biológicas; F: propiedades físicas; Q: propiedades químicas; B+Q: propiedades biológicas y químicas; F+Q: propiedades físicas y químicas; B+F+Q: propiedades biológicas, físicas y químicas

caso de las propiedades biológicas, un 63% de los artículos analizó únicamente herbicidas (e.g. glifosato y atrazina), un 21% evaluó insecticidas (e.g. clorpirifos y endosulfan), y un 2% evaluó fungicidas (e.g. iprodione) (Cuadro 1). Adicionalmente, se hallaron casos en los que se comparó, de manera conjunta, el destino de fitosanitarios: un 6% de los artículos evaluó el efecto de insecticidas, herbicidas y fungicidas sobre los microorganismos del suelo, y un 8% evaluó el efecto de insecticidas y herbicidas sobre la macrofauna del suelo. En esta revisión bibliográfica, no se encontraron artículos que hayan abordado esta temática con fungicidas en combinación con herbicidas o insecticidas. En el caso de las propiedades químicas y físicas, un 70% de los artículos recopilados evaluó el efecto de herbicidas, seguido por un 20% de artículos que

relevó datos sobre insecticidas (Cuadro 1). En los artículos recopilados, ninguno de los autores evaluó el impacto de los fungicidas sobre las propiedades físicas y químicas. El 3% de los artículos analizó el destino de herbicidas, fungicidas e insecticidas en conjunto, mientras que el 7% evaluó la combinación de herbicidas e insecticidas.

La evaluación de los SE edáficos no tuvo una tendencia marcada (Cuadro 1). Tanto los SE de regulación como los de soporte, presentaron valores porcentuales similares en cuanto a la cantidad de artículos científicos que los analizaron. En ambos casos, los herbicidas fueron los fitosanitarios más analizados con relación al manejo de cultivos intensivos y extensivos. Con relación a los insecticidas, estos fueron evaluados en mayor porcentaje que los fungicidas para ambos SE.

Cuadro 1. Cantidad de artículos científicos (en porcentaje) según tipo de fitosanitario utilizado para analizar el impacto sobre las propiedades y los servicios de los ecosistemas edáficos en Argentina en el período 2010-2020. H: herbicidas; I: insecticidas; F: fungicidas; H+I: herbicidas e insecticidas; H+I+F: herbicidas, insecticidas y fungicidas.

Fitosanitario	Propiedades edáficas		Servicios de los ecosistemas	
	Biológicas	Físicas y químicas	Regulación	Soporte
Herbicidas	63	70	64	68
Insecticidas	21	20	22	20
Fungicidas	2	0	2	1
H+I	8	7	8	6
H+I+F	6	3	4	5

El uso de fitosanitarios: evaluación de las propiedades edáficas a escala de regiones geográficas

El impacto de los fitosanitarios se evaluó con mayor frecuencia en suelos de la Región Pampeana (Figura 3). En este sentido, de los 75 artículos recopilados, el 79% relevó datos de la Región Pampeana, el 4% relevó datos en el noroeste argentino (NOA), el 4% en la Región Patagónica, mientras que el 1% de los artículos relevó datos del noreste argentino (NEA). No se encontraron artículos que hayan relevado datos únicamente de la Región de Cuyo. En cuanto a los artículos que realizaron una comparación entre regiones, el 4% relevó datos de las regiones Pampeana y NEA, el 1% de las regiones Pampeana y Patagónica, y el 1% de las regiones Pampeana, NEA y Cuyo.

Según la literatura científica consultada, se encontró un predominio en la utilización de herbicidas, respecto

de insecticidas y fungicidas, en la evaluación del efecto sobre las propiedades edáficas en la Región Pampeana (Cuadro 2). Por su parte, en la Región Patagónica, también se evaluaron herbicidas, pero fueron predominantes los insecticidas; de los artículos recopilados de esta región, ninguno evaluó el efecto de fungicidas. En las regiones de Cuyo, NOA y NEA, solo se analizaron dos grupos de fitosanitarios: insecticidas y herbicidas. Los herbicidas fueron representativos en las regiones del NEA, Cuyo y NOA, siendo predominantes, en esta última región, los insecticidas.

En relación con las propiedades edáficas, en la Región Pampeana se recopilaron mayor cantidad de artículos en comparación con las restantes regiones. En los artículos recopilados, las propiedades biológicas presentaron una predominancia sobre las restantes propiedades edáficas en la Región Pampeana (Cuadro 2).

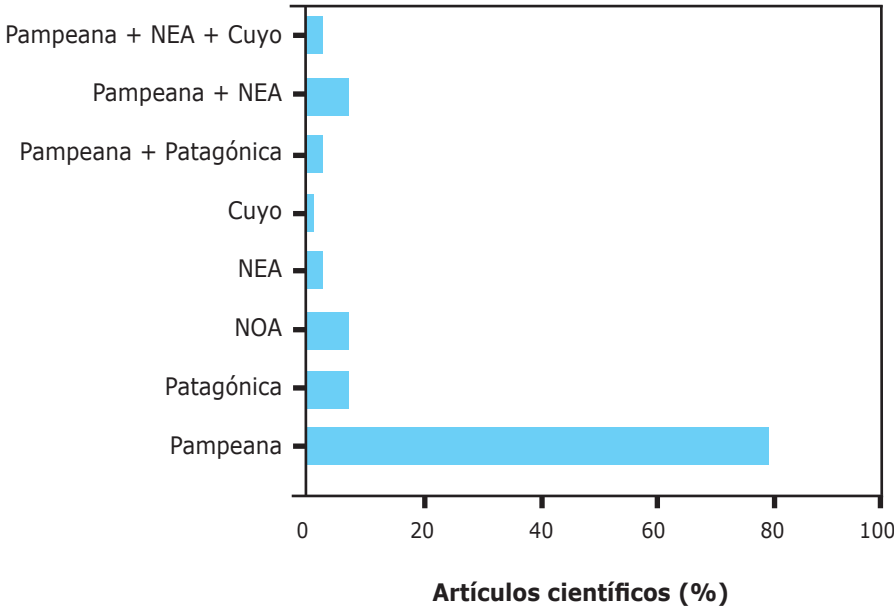


Figura 3. Cantidad de artículos científicos (en porcentaje) con relación a las regiones geográficas de Argentina, en donde se evaluó el destino e impacto de fitosanitarios en el suelo (período 2010-2020). NOA: noroeste de Argentina; NEA: noreste de Argentina.

Asimismo, la región del NOA también presentó predominancia de evaluación de las propiedades biológicas con relación a las restantes regiones, exceptuando la Región Pampeana. Respecto a las restantes regiones, no se relevaron datos de estas propiedades, a excepción de la región del NOA que presentó menores relevamientos. Con relación a las propiedades químicas y físicas, también se observó una diferencia en el porcentaje de artículos referidos entre regiones (Cuadro 2).

Relación entre el tipo de fitosanitario, las propiedades y los servicios de los ecosistemas edáficos

En los artículos recopilados, se encontró una predominancia en la evaluación del efecto de los herbicidas sobre las propiedades biológicas y los SE de regulación (Cuadro 3), mientras que, en menor medida, se evaluó el impacto de los herbicidas sobre las propiedades químicas. La cantidad de artículos científicos que investigaron la relación entre el uso de insecticidas y su destino edáfico fue menor que aquellos que se centraron en el

destino edáfico de los herbicidas.

Respecto de la evaluación del destino de los insecticidas, los artículos se focalizaron en el estudio de las propiedades biológicas y de los SE de regulación, mientras que, en menor medida, evaluaron los SE de soporte. Por su parte, solamente uno de los artículos recopilados evaluó el destino de los fungicidas en el suelo (específicamente, sobre las propiedades biológicas).

En el caso de las combinaciones de fitosanitarios, los artículos evaluaron las propiedades biológicas y químicas, así como las propiedades físico-químicas y las tres propiedades juntas (biológicas, físicas y químicas) (Cuadro 3). La combinación de herbicidas e insecticidas se utilizó para evaluar, principalmente, su destino e impacto sobre las propiedades biológicas y los SE de regulación y, en menor medida, las propiedades físico-químicas y los SE de soporte. El estadístico Chi cuadrado de Pearson, que evaluó la relación entre las tres variables analizadas (*i.e.* aplicación de fitosanitarios, propiedades edáficas y SE), no fue significativo ($p = 0,86$).

Cuadro 2. Cantidad de artículos científicos (en porcentaje) según el tipo de fitosanitario y las propiedades edáficas, considerando las regiones geográficas argentinas bajo análisis (período 2010-2020). NEA: noreste de Argentina; NOA: noroeste de Argentina.

Región	Fitosanitario			Propiedades edáficas		
	Herbicidas	Insecticidas	Fungicidas	Biológicas	Químicas	Físicas
Pampeana	67	24	9	46	28	26
NEA	100	0	0	0	50	50
Cuyo	100	0	0	0	50	50
NOA	33	67	0	43	29	28
Patagónica	25	75	0	0	50	50

Cuadro 3. Cantidad de artículos científicos (en porcentaje) según el tipo de fitosanitario, las propiedades y los servicios de los ecosistemas edáficos en Argentina en el período 2010-2020. F: propiedades físicas; Q: propiedades químicas; B: propiedades biológicas; Q+B: propiedades químicas y biológicas; F+Q: propiedades físicas y químicas; F+Q+B: propiedades físicas, químicas y biológicas; H: herbicidas; F: fungicidas; I: insecticidas; H+I: herbicidas e insecticidas; H+I+F: herbicidas, insecticidas y fungicidas.

Fitosanitario	Propiedades edáficas					Servicios de los ecosistemas			
	Biológicas	Químicas	Q+B	F+Q	F+Q+B	Total	Regulación	Soporte	Total
Herbicidas	25	1	2	15	4	47	31	22	53
Insecticidas	7	0	0	3	2	12	9	5	14
Fungicidas	1	0	0	0	0	1	1	0	1
H+I+F	2	0	0	0	2	4	4	2	6
H+I	3	0	0	1	0	4	3	1	4
Total	38	1	2	19	8	68	48	30	78

DISCUSIÓN

Durante el período analizado (2010-2020), ha habido una mayor cantidad de artículos científicos enfocados en evaluar el efecto de los herbicidas sobre el ambiente edáfico y los servicios de los ecosistemas provistos por el suelo, en comparación con los restantes fitosanitarios (Figura 1; Cuadros 1, 2 y 3). La razón principal de esta tendencia se centra en que son los principales compuestos utilizados en Argentina, seguido por los insecticidas y, en menor medida, por los fungicidas (CASAFA, 2016; Caprile *et al.*, 2019a; Pérez *et al.*, 2021; Montoya *et al.*, 2022). La aplicación de insecticidas y fungicidas se requiere específicamente cuando se presentan ataques e infestaciones de artrópodos y enfermedades que, al estar regulados por condiciones climático-ambientales de cada ciclo agrícola, determina que el uso de insecticidas y fungicidas sea muy acotado en las producciones agrícolas, en comparación a los herbicidas (Bedmar, 2011; Angelini *et al.*, 2013; Montico *et al.*, 2015), siendo la cantidad de artículos que comparan el comportamiento de los fungicidas en el suelo muy escasa (Figura 1; Cuadros 1, 2 y 3). En este sentido, los cultivos extensivos requieren de una mayor cantidad y dosis de aplicación de herbicidas para el control de malezas en todos los cultivos, debido a que es la principal plaga agrícola (Bedmar, 2011; Chamorro y Sarandón, 2017) y por sus características físico-químicas y persistencia en el ambiente han merecido mayor atención pública en las publicaciones locales e internacionales (Priest *et al.*, 2017; Bernasconi *et al.*, 2021).

Los artículos científicos evaluaron, en mayor medida, el efecto de los fitosanitarios sobre las propiedades biológicas del suelo y, en menor medida, sobre las propiedades químicas y físicas (Figura 2; Cuadros 1 y 3). En este sentido, las propiedades biológicas y sus servicios asociados (*i.e.* SE de regulación) responden a cualquier alteración producida en el ambiente edáfico (Angelini *et al.*, 2013; Benito *et al.*, 2018; Boccolini *et al.*, 2019b); por esta razón, han sido utilizados como bioindicadores de la calidad del suelo (Angelini *et al.*, 2013; Di Ciocco *et al.*, 2014). Asimismo, se observaron menores porcentajes de artículos que evaluaron el efecto sobre las propiedades físico-químicas del suelo, así como sobre los SE de soporte (Figura 2; Cuadros 1 y 3). Las propiedades físico-químicas han sido ampliamente relevadas a nivel nacional e internacional (Aparicio *et al.*, 2015; Gómez Ortiz *et al.*, 2017; Montico *et al.*, 2021), debido a su influencia en el proceso de retención y transporte de fitosanitarios en el suelo, entre otras funciones

y servicios que proveen (*i.e.* SE de soporte).

La relación entre fitosanitarios y propiedades edáficas ha sido objeto de estudio de manera aislada, como resultado de investigaciones relacionadas a otras temáticas ambientales y agropecuarias (Aparicio *et al.*, 2015; Boccolini *et al.*, 2019a; Caprile *et al.*, 2019b; Bernasconi *et al.*, 2021; Pérez *et al.*, 2021). El análisis de la bibliografía permitió observar que los artículos científicos se han enfocado, en mayor medida, sobre las propiedades biológicas y fisicoquímicas en relación con los herbicidas (Cuadro 3). Esto puede deberse, como se mencionó anteriormente, al predominio de la utilización de herbicidas en Argentina (CASAFA, 2016). En los últimos años, se han registrado numerosos estudios realizados en el país sobre la biodegradación de los herbicidas en suelos, y su efecto negativo sobre los organismos edáficos (Bernasconi *et al.*, 2021). En este trabajo, se han recopilado artículos sobre las propiedades biológicas, evaluando el impacto sobre los microorganismos edáficos y la materia orgánica (Cuadro 3). En este sentido, las propiedades biológicas y los SE edáficos han sido evaluados considerando el tipo de suelo, así como su uso (López Ulloa, 2016; Bedoya-Gómez *et al.*, 2021; Montico *et al.*, 2021), permitiendo inferir que la relación con el uso de los fitosanitarios es tema de estudio de los últimos años. Asimismo, las propiedades y los SE edáficos asociados han sido reconocidos por diferentes actores sociales (Burbano-Orjuela, 2016; Montico *et al.*, 2021; Rositano y Civeira, 2023).

Las propiedades edáficas están involucradas en el comportamiento de los fitosanitarios al momento de ingresar al suelo; por lo tanto, es necesario evaluar estas propiedades en su conjunto con el fin de conocer el destino final en el ambiente (Okada *et al.*, 2016; Gómez Ortiz *et al.*, 2017; Caprile *et al.*, 2019a). En este sentido, las propiedades físicas y químicas del suelo intervienen en procesos de disipación de los fitosanitarios (Aparicio *et al.*, 2015; Caprile *et al.*, 2019a). En Argentina, los primeros trabajos sobre los procesos de retención de fitosanitarios comenzaron a realizarse en el año 2000 e incluyeron, en su mayor proporción, estudios sobre herbicidas y su efecto sobre las propiedades edáficas (Aparicio *et al.*, 2015). Durante el período que abarca este estudio (2010-2020), los resultados también conservan esta tendencia en la mayor representatividad de los herbicidas en comparación con los demás fitosanitarios (Figura 1; Cuadros 1 y 3). Es importante destacar la relevancia de los artículos menos representativos de la bibliografía que compararon el efecto de los fitosanitarios

sobre las propiedades edáficas (Figura 3). Estos artículos, a pesar de encontrarse en menor porcentaje, demostraron la variabilidad regional de las propiedades y el comportamiento diferencial de los productos fitosanitarios aplicados en el ambiente edáfico (Okada *et al.*, 2019).

La evaluación del efecto de los fitosanitarios combinados en el ambiente edáfico ha sido poco evaluada en los últimos años (Figura 1; Cuadros 1 y 3) (Aparicio *et al.*, 2018; Boccolini *et al.*, 2019; Allegrini *et al.*, 2020). La combinación de fitosanitarios tiene un efecto acumulativo, sinérgico o antagónico en la composición y función de las diferentes poblaciones y comunidades de organismos edáficos (Pérez *et al.*, 2021), vitales para el funcionamiento del ecosistema edáfico. Estos organismos participan en procesos de degradación de la materia orgánica y de los fitosanitarios, así como de la transformación bioquímica de sustancias que ingresan al suelo (Angelini *et al.*, 2013; Di Ciocco *et al.*, 2014).

El efecto de los herbicidas fue evaluado en todas las regiones argentinas (*i.e.* Pampeana, Patagónica, NEA, NOA y Cuyo), con menores relevamientos sobre insecticidas y fungicidas (Cuadro 2). Tal situación, reafirma lo mencionado previamente, dado que los herbicidas son los compuestos más utilizados en Argentina para controlar malezas, principalmente en sistemas extensivos (Bedmar, 2011; Sarandón *et al.*, 2015; Mac Loughlin *et al.*, 2020; Holzmann *et al.*, 2021). La Región Pampeana fue la única región que presentó la mayor cantidad de artículos sobre el efecto de los tres fitosanitarios en el suelo (Figura 3; Cuadro 2) debido, probablemente, a su nivel de difusión en los sistemas intensivos y extensivos (Sarandón *et al.*, 2015). En las regiones del NEA y Cuyo, se evaluó el efecto de herbicidas en combinación con otras regiones (Figura 3; Cuadro 2). En la región del NOA, se evaluaron herbicidas e insecticidas en conjunto y de manera individual (Figura 3; Cuadro 2). En este sentido, en la Región Patagónica, el estudio de los insecticidas fue predominante por sobre el resto de los fitosanitarios (Cuadro 2). Particularmente, esta región cuenta con un extenso historial de aplicación de insecticidas organoclorados para la producción de frutales y, aunque muchos compuestos han sido prohibidos, se ha encontrado evidencia de su presencia en suelo y agua, poniendo de manifiesto su persistencia en el ambiente (González *et al.*, 2010; Miglioranza *et al.*, 2013).

Finalmente, el estudio de fitosanitarios en las décadas pasadas estuvo asociado a investigaciones relacionadas con temáticas como salud y ambiente (Arregui *et*

al., 2010; Aparicio *et al.*, 2013; Villamil Lepori *et al.*, 2013; Aparicio *et al.*, 2015). Sin embargo, las investigaciones sobre el ambiente edáfico estuvieron enfocadas a estudios de calidad de suelos y productividad. Recién en los últimos años, se ha comenzado a difundir la necesidad del estudio del efecto de los fitosanitarios no solo sobre las propiedades edáficas sino también sobre aquellos servicios que los suelos proveen. Esta necesidad es una consecuencia directa del compromiso de los Estados con la Agenda 2030, en la cual el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 12: Producción y Consumo Responsable está íntimamente relacionado con el ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres. Por ejemplo, si los fitosanitarios se aplican de forma incorrecta o en dosis elevadas, pueden dañar los cultivos a los que se destinan, así como a otras especies de plantas y organismos no objetivo presentes en el entorno agrícola. De esta manera, se impactará negativamente en la biodiversidad local, así como en los SE asociados (*e.g.* polinización, control biológico de plagas). En Argentina, el efecto sobre el ambiente por la aplicación de los fitosanitarios aún está en desarrollo, siendo imperiosa la necesidad de incrementar estudios de este tipo para considerar prácticas agrícolas alternativas, como el uso de métodos de manejo integrado de plagas y el fomento de sistemas agrícolas más ecológicos y sustentables.

CONCLUSIONES

Los sistemas agrícolas argentinos dependen, en gran medida, de los fitosanitarios para combatir adversidades bióticas, lo que implica una liberación considerable de estos productos en el ambiente, especialmente en el suelo. La aplicación continua de fitosanitarios representa un riesgo para el suelo y los SE que este provee, destacando la importancia de evaluar su impacto. En base a una revisión bibliográfica, el trabajo se centró en analizar el destino e impacto de diferentes tipos de fitosanitarios (herbicidas, fungicidas, e insecticidas) en el suelo argentino y sus SE durante el período 2010-2020. Los fungicidas fueron el fitosanitario menos utilizado en las regiones estudiadas (1%), reflejando una tendencia al uso mayoritario de herbicidas en las prácticas agrícolas argentinas, con especial énfasis en la Región Pampeana. Los resultados de este estudio constituyen una base importante para fomentar futuras investigaciones sobre el comportamiento de los fitosanitarios en diferentes propiedades edáficas y SE en diversas regiones de Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la Escuela Superior de Ingeniería, Informática y Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Morón, principalmente a la Dra. Adriana De Caro, en donde este trabajo fue presentado como

tesina de grado de la primera autora (María Luján Soria Mirlhen). Asimismo, las autoras agradecen a dos revisores anónimos por sus valiosos comentarios que enriquecieron el presente trabajo, así como a la Oficina Editorial de la revista por su gestión.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, L. L., Demetrio, P. M., Etchegoyen, M. A. y Marino, D. J. (2018). Glyphosate and atrazine in rainfall and soils in agroproductive areas of the pampas region in Argentina. *Science of the Total Environment*, 645, 89-96.
- Allegrini, M., Gómez, E. y Zabalo, M. C. (2020). Acute glyphosate exposure does not condition the response of microbial communities to a dry-rewetting disturbance in a soil with a long history of glyphosate-based herbicides. *SOIL*, 6, 291-297.
- Angelini, J., Ghio, S., Taurian, T., Ibáñez, F., Tonelli, M. L., Valetti, L., Anzuay, M. S., Ludueña, L., Muñoz, V. y Fabra, A. (2013). The effects of pesticides on bacterial nitrogen fixers in peanut-growing area. *Archives of Microbiology*, 195(10-11), 683-692.
- Aparicio, V., De Gerónimo, E., Hernández Guijarro, K., Pérez, D., Portocarrero, R. y Vidal, C. (Comp.) (2015). *Los plaguicidas agregados al suelo y su destino en el ambiente*. Ediciones INTA.
- Arregui, M. C., Sánchez, D., Althaus, R., Scotta, R. R. y Bertolaccini, I. (2010). Assessing the risk of pesticide environmental impact in several Argentinian cropping systems with a fuzzy expert indicator. *Pest Management Science*, 66(7), 736-40.
- Bedmar, F. (2011). ¿Qué son los plaguicidas? *Ciencia Hoy*, 21(122), 10-16.
- Bedoya-Gómez, B. D., Dossman-Gil, M. Á. y Marín-Fernández, J. (2021). Valoración ecológica de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo en fincas cafeteras en Belén de Umbria, Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 160-181.
- Benito, N., Magnoli, C. E. y Barberis, C. L. (2018). Efecto de glifosato sobre la producción de aflatoxina B1 por cepas de *Aspergillus* sección Flavi aisladas de maíz. *Ab Intus*, 1(1), 92-105.
- Bernasconi, C., Demetrio, P.M., Alonso, L.L., Mac Loughlin, T.M., Cerdá, E., Sarandón, S.J. y Marino, D.J. (2021). Evidence of soil pesticide contamination of an agroecological farm from a neighboring chemical-based production system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 313, 107341.
- Boccolini, M., Cazorla, C. R., Galantini, J. A., Belluccini, P. A. y Baigorria, T. (2019a). Cultivos de cobertura disminuyen el impacto ambiental mejorando propiedades biológicas del suelo y el rendimiento de los cultivos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 45(3), 412-425.
- Boccolini, M. F., Moyano, S., Bonetto, M., Baigorria, T. y Cazorla, C. (2019b). Grupos bacterianos en un argiudol típico con aplicación de glifosato: influencia en bacterias del nitrógeno. *Ciencia del Suelo*, 37(2), 225-237.
- Bott, S., Tesfamariam, T., Candan, H., Cakmak, I., Römheld, V. y Neumann, G. (2008). Glyphosate-induced impairment of plant growth and micronutrient status in glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). *Plant & Soil*, 312, 185-194.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124.
- Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes (CASAFE) (2016). *Mercado argentino de productos fitosanitarios*. <https://www.casafe.org/publicaciones/datos-del-mercado-argentino-de-fitosanitarios/>
- Caprile, A. C., Colombini, D., Villalba, F. y Andriulo, A. (2019a). ¿Son suficientes nueve años sin aplicación de plaguicidas para que estos se disipen del suelo? *Revista de Tecnología Agropecuaria*, 10(39), 63-65.
- Caprile, A. C., Sasal, M. C., Repetti, M. R. y Andriulo, A. E. (2019b). Plaguicidas retenidos en el suelo y perdidos por escurrimiento en dos secuencias de cultivo bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 37(2), 338-354.
- Chamorro, A. M. y Sarandón, S. J. (2017). Análisis del impacto ambiental del cambio de secuencias de cultivo en el partido de Tres Arroyos (Buenos Aires, Argentina). *Revista de la Facultad de Agronomía de La Plata*, 116(1), 89-99.
- Dalpiaz, M. J. y Andriulo, A. (2017). Comparación de índices de lixiviación de plaguicidas. *Ciencia del Suelo*, 35(2), 365-376.
- Di Ciocco, C. A., Sandler, R. V., Falco, L. B. y Coviella, C. E. (2014). Actividad microbiológica de un suelo sometido a distintos usos y su relación con variables físico-químicas. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 46(1), 73-85.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. y Robledo, C. (2020). InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Durovic, R., Gajic, B. y Durovic, N. (2011). Pesticide residues in soils from conventional farming in Serbia: A survey. *Pesticidi i fitomedicina*, 26(4), 281-287.
- Flury, M. (1996). Experimental evidence of transport of pesticides through field soils—A review. *Journal of Environmental Quality*, 25(1), 25-45.
- Gómez Ortiz, A. M., Okada, E., Bedmar, F. y Costa, J. L. (2017). Sorption and desorption of glyphosate in mollisols and ultisols of Argentina. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36(10), 2587-2592.
- González, M., Miglironza, K. S., Aizpún, J. E., Isla, F. y Peña, A. (2010). Assessing pesticide leaching and desorption in soils with different agricultural activities from Argentina (Pampa and Patagonia). *Chemosphere*, 81(3), 351-358.
- GraphPad Prism version 9.0.0 for Windows, GraphPad Software, San Diego, California, Estados Unidos. <http://www.graphpad.com>
- Gunstone, T., Cornelisse, T., Klein, K., Dubey, A. y Donley, N. (2021). Pesticides and Soil Invertebrates: a Hazard Assessment. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 643847.

- Henry, R. S., Wise, K. A. y Johnson, W. G. (2011). Glyphosate's effect upon mineral accumulation in soybean. *Crop Management Research*, 10(1), 1-8.
- Holzmann, R., Sheridan, M., De Gerónimo, E., Aparicio, V. y Costa, J. L. (2021). *Presencia de Glifosato y AMPA en suelos de chacras y aguas en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén*. INTA Digital. https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/INTADig_3c1be563cda634b-7728be24c3cdc0018
- Jat, M., Dohling, P. N., Ahuja, A. y Singh, J. (2022). Effect of Pesticides on Soil Ecosystem Services and Processes. *Indian Journal of Entomology*, 84(4), 981-990.
- López Ulloa, R. M. (2016). Servicios ecosistémicos del suelo. *Revista Científica Ecuatoriana*, 10-12.
- Lupi, L., Bedmar, F., Wunderlin, D. A. y Miglioranza, K. S. (2016). Organochlorine pesticides in agricultural soils and associated biota. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-11.
- Luzzi, J. I., Aparicio, V. C., Ledda, A. R., De Gerónimo, E., Borrelli, V. y Costa, J. L. (2021). Degradación de atrazina en rotaciones agrícolas sobre suelos molisoles del sudoeste chaqueño. *Ciencia del Suelo*, 39(1), 183-189.
- Mac Loughlin, T. M., Peluso, M. L., Aparicio, V. C. y Marino, D. J. (2020). Contribution of soluble and particulate-matter fractions to the total glyphosate and AMPA load in matter bodies associated with horticulture. *Science of the Total Environment*, 703, 134717.
- Magnoli, C. E., Barberis, C. L., Chiacchiera, S. M., Monge, M., Carranza, C. S., Benito, N. y Aluffi, M. E. (2018). *Glyphosate and fungi in agricultural environments*. Nova Science Publishers.
- Miglioranza, K. S., González, M., Ondarza, P. M., Shimabukuro, V. M., Isla, F., Fillman, G., Aizpún, J. E. y Moreno, V. J. (2013). Assessment on Argentinean Patagonia pollution: PBDEs, OCPs, and PCBs in different matrices from the Río Negro basin. *Science of the Total Environment*, 452-453, 275-285.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Environmental Degradation and Human Well-Being. *Population and Development Review*, 31, 389-398.
- Montico, S., Magrí, L. y Denoia, J. (2015). Impacto ambiental del uso de pesticidas en la cuenca del Arroyo Ludueña (Santa Fe, Argentina). *Revista Ciencias Agronómicas*, 25, 07-17.
- Montico, S., Di Leo, N., Bonel, B. y Berardi, J. (2021). Servicios ecosistémicos provistos por los suelos en una cuenca de Santa Fe, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, 27, 1-8.
- Montoya, J., López, S. N., Salvaggiotti, F., Mitidieri, M., Cid, R., Sasal, C., Martens, S., Carrancio, L., Aparicio, V., Acciaresi, H., Papa, J. C., Vigna, M., Volante, J., Irurueta, M. y Trumper, E. (2022). *Mesa de análisis y propuestas para el abordaje integral del uso de productos fitosanitarios*. INTA Digital. https://inta.gob.ar/sites/default/files/los_productos_fitosanitarios_en_los_sistemas_productivos_de_la_argentina_una_mirada_desde_el_inta.pdf
- Okada, E., Costa, J. L. y Bedmar, F. (2016). Adsorption and mobility of glyphosate in different soils under no till and conventional tillage. *Geoderma*, 263, 78-85.
- Okada, E., Costa, J. L. y Bedmar, F. (2019). Glyphosate dissipation in different soils under no till and conventional tillage. *Pedosphere*, 29(6), 773-783.
- Okada, E., Pérez, D., De Gerónimo, E., Aparicio, V., Massone, H. y Costa, J. L. (2018). Non-point source pollution of glyphosate and AMPA in a rural basin from the southeast Pampas, Argentina. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 15120-15132.
- Pérez, D. J., Iturburu, F. G., Calderon, G., Oyesqui, L. A., De Gerónimo, E. y Aparicio, V. C. (2021). Ecological risk assessment of current-use pesticides and biocides in soils, sediments and surface water of a mixed land-use basin of the Pampas region, Argentina. *Chemosphere*, 263, 1-14.
- Primost, J. E., Marino, D. J., Aparicio, V. C., Costa, J. L. y Carriquiriborde, P. (2017). Glyphosate and AMPA, "pseudo-persistent" pollutants under real-world agricultural management practices in the Mesopotamic Pampas agroecosystem, Argentina. *Environmental Pollution*, 229, 771-779.
- Rositano, F. y Civeira, G. (2023). Servicios de los ecosistemas en áreas urbanas y periurbanas: su reconocimiento por distintos actores sociales. *Cuaderno Urbano*, 34, 31-44.
- Sarandón, S. J., Flores, C. C., Abbona, E., Iermanó, M. J., Blandi, M. L. y Oyhamburu, M. (2015). *Uso de agroquímicos en la Provincia de Buenos Aires, Argentina: las consecuencias de un modelo agropecuario*. V Congreso Latinoamericano de Agroecología-SOCLA, La Plata, Argentina.
- Spagnoletti, F. N. y Chiocchio, V. M. (2020). Tolerance of dark septate endophytic fungi (DSE) to agrochemicals in vitro. *Revista Argentina de Microbiología*, 52(1), 43-49.
- Suárez, R. P., Brodeur, J. C., Bernardos, J. y Zaccagnini, M. E. (2013). *Los fitosanitarios y el ambiente: módulo V*. Ediciones INTA.
- Villaamil Lepori, E. C., Bovi Mitre, G. y Nassetta, M. (2013). Situación actual de la contaminación por plaguicidas en Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(1), 25-43.
- Wauchope, R. D. (1978). The pesticide content of surface water draining from agricultural fields—A review. *Journal of Environmental Quality*, 7(4), 459-472.