



Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Económicas
Escuela de Estudios de Posgrado



Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Económicas
Escuela de Estudios de Posgrado
Maestría en Economía

TRABAJO FINAL DE MAESTRÍA

*Determinantes de la difusión tecnológica en el sector
agrícola argentino: el caso de la agricultura de precisión*

Autor: Sebastián Gómez Roca

Director: Andrés López

Codirectores: Gabriel Montes Rojas y Jeremías Lachman

2023

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a Mariana Santi, por todo lo que me brindó en estos años hermosos. Es una persona para quien no me alcanzarán jamás las palabras. Asimismo, agradezco a toda su familia, Adri y Oscar, Daney, Maxi y Luquitas, Lili y Julio, y Nona, por haber oficiado de segunda familia durante tanto tiempo. Todas estas admirables personas son de una calidad humana inconmensurable. El cariño y amor que les tengo es algo que no tiene nombre.

En siguiente instancia, agradezco inmensamente a Andrés López, quien dirigió esta tesis, así como resultó ser una de mis mayores guías en academia y con quien tuve el enorme gusto de haber trabajado por años. Andrés me formó bajo estándares excelentes y estoy enormemente agradecido por el hecho de haber caído bajo su tutela.

Agradezco también a Jeremías Lachman, que es un jefe y colega más que apreciable. Jere siempre me abrió puertas y potenció en todo lo posible. A su vez, es codirector de este trabajo y tuvo un rol en diversas instancias del mismo, de modo que nada de esto sería posible sin su enorme contribución.

A Gabriel Montes Rojas también le estoy muy agradecido. No solo codirigió este trabajo, si no que sus enseñanzas en diversos tópicos, no solo de econometría, son innumerables. Siempre me dio la oportunidad de contribuir en su curso y, definitivamente, el aprendizaje y crecimiento que logré gracias a él no lo habría logrado en ningún otro lugar.

Además, menciono especialmente a Gabriel Palazzo. Gabriel no es sólo una excelente persona a quien admiro superlativamente, si no que también me acompañó, formó, y orientó fuertemente en mis primeros pasos en academia. Gabriel me dio muchas oportunidades, incluso contribuir en su curso de macroeconomía.

Adicionalmente, me gustaría agradecer principalmente a Lucas Fernández, pero también a toda la gente que desde la secretaría de investigación de la Facultad de Ciencias Económicas de la UBA me orientaron y solventaron mis dudas durante tantos años.

A nivel institucional, agradezco a la Universidad de Buenos Aires, una institución de enorme calidad educativa, que me permitió cursar dos carreras de grado y una maestría, rodeado de grandes profesionales y colegas. Asimismo, estoy especialmente agradecido con el Instituto Interdisciplinario de Economía Política (IIEP), que me permitió desarrollarme académicamente, rodeado de excelentes profesionales.

Finalmente, quisiera aclarar que esta sección no pretende ser una declaración general de agradecimiento y cariño, si no que hay un conjunto de personas de inmensa importancia para mí y a quienes les guardo un enorme cariño y agradecimiento que no están aquí.

Resumen

El presente trabajo se dedica al estudio de los principales factores asociados a la adopción de agricultura de precisión en productores de Argentina. Existe una literatura extensa asociada al estudio de la adopción tecnológica en la agricultura cuyo foco se ubica en otros países. Este estudio consiste en una contribución en dos sentidos. En primer lugar, se genera evidencia novedosa utilizando una base de datos de productores de distinto tamaño de Argentina no explotada para este tipo de análisis. En segundo lugar, se extiende la metodología más usualmente utilizada al aplicar herramientas de econometría espacial, lo cual aporta nuevos resultados en términos de interacciones y efectos de derrame.

Palabras clave: Adopción tecnológica, Agricultura de Precisión, Difusión, Econometría espacial

Códigos JEL: C21, O13, Q12

Índice

Índice	1
Índice de figuras	2
Índice de tablas	2
1. Introducción	3
2. Estado de la cuestión y marco de análisis	4
2.1. La agricultura de precisión: definiciones y patrones de adopción a nivel global . . .	4
2.1.a. La difusión de la AP en la Argentina	8
2.1.b. La oferta local de tecnologías de AP en la Argentina	11
2.2. Difusión y adopción de tecnologías	13
2.2.a. Marco conceptual	13
2.2.b. Evidencia Empírica	17
3. Metodología	21
3.1. Enfoque metodológico	21
3.1.a. Motivación	21
3.1.b. Econometría espacial	23
3.2. Datos utilizados: fuentes y análisis	27
3.3. Análisis exploratorio	29
4. Estimaciones y resultados	32
4.1. Principales resultados	32
4.2. Controles de robustez	36
4.2.a. Omisión de controles irrelevantes	36
4.2.b. Alternativas para la matriz W	37
5. Conclusiones	38
6. Bibliografía	41
A. Anexo: Unidades aisladas	47
B. Anexo: Mapa LISA	48
C. Anexo: Ilustración de las relaciones de vecindad	49
D. Anexo: Ilustración de efectos directos e indirectos	50

Índice de figuras

1.	Proporción de vendedores que ofrecen tecnologías de AP en EE. UU.	6
2.	Adopción según tipo de plantación	7
3.	Adopción por tamaño de explotación en el momento de la encuesta (2012) y proyectado	9
4.	Ventas acumuladas de equipos de AP	10
5.	Correlación lineal entre adopción AP y tipo de cultivo	12
6.	Patrón de adopción en forma de S	16
7.	Mapa de adopción de AP en Argentina	30
8.	Frecuencia relativa del número de conexiones	32
9.	Residuos de la regresión no espacial	34
10.	Mapa LISA	48
11.	Relaciones de vecindad	49
12.	Primer derrame	50
13.	Segundo derrame	50
14.	Tercer derrame	51

Índice de tablas

1.	Adopción promedio 2016-2018 según tamaño de explotación	11
2.	Resumen de estudios y principales variables para explicar la adopción de tecnologías	19
3.	Variables incorporadas al estudio	28
4.	Correlación entre variables	31
5.	Resultados principales	35
6.	Desagregación de efectos	36
7.	Estimación omitiendo variables de control	37
8.	Tests con matrices de distancia alternativa	37
9.	Modelos espaciales utilizando distintas matrices de distancia	38

1. Introducción

Una vez escogido el cultivo, la producción agrícola requiere una serie de decisiones adicionales. Ejemplos de estas incluyen la intensidad de siembra o del uso de otros productos como fertilizantes y agroquímicos. En el esquema productivo tradicional, estas decisiones se aplican en forma homogénea al interior de un lote. No obstante, puede ser que haya una heterogeneidad en el terreno que resulte aprovechable. Por ejemplo, la distribución de nutrientes, inclinaciones y niveles de hidratación puede variar de forma tal que en determinadas zonas la intensidad de siembra óptima resulte menor. Esta variabilidad invita a adoptar prácticas productivas más eficientes.

La agricultura de precisión (AP) comprende un conjunto de herramientas amplio que tienen por objetivo la aplicación variable de insumos en un lote (Ortega *et al.*, 1999). A modo ilustrativo, la herramienta de mayor difusión son los monitores de rendimiento. Estos permiten tener un registro de los resultados en el terreno con una referencia espacial, lo cual permite en una siguiente instancia rediseñar la estrategia productiva. Las oportunidades tecnológicas y productivas abiertas por este nuevo paradigma dieron lugar al surgimiento de innovaciones en diversas áreas. Gebbers y Adamchuk (2010) identifican las distintas dimensiones donde se ubicaron los avances, las cuales abarcan la forma en que se capta información y las fuentes de esta (*e.g.*, nuevos dispositivos, o información satelital), y de qué manera se aprovecha la misma para lograr mejores retornos (*i.e.*, cómo se incorpora la información a las decisiones productivas).

Las ventajas que la AP trae aparejadas pueden distinguirse en dos sentidos. En primer lugar, gracias a las ganancias de eficiencia, su aprovechamiento redundará en un mayor beneficio para los productores. En segundo lugar, debido a la menor demanda de insumos, la AP también contribuye a una producción más ecológica y sustentable (Van der Wal, 2019).

En principio, esto podría conducir a que estas tecnologías tengan un nivel de difusión elevado. No obstante, por el momento esto no está ocurriendo, al menos, en Argentina. A nivel nacional, el Censo Nacional Agropecuario 2018 (INDEC, 2020) encontró que en torno a un 4% de los establecimientos era adoptante de alguna tecnología de AP. En tanto, Lachman y López (2018) utilizan datos de productores medianos y grandes obtenidos por la empresa Map of Agriculture para Argentina y encuentran niveles de adopción de alguna tecnología de AP en torno al 15%. Tal como destacan los autores, existe una oferta desarrollada de tecnologías de AP disponible en Argentina, de modo que la adopción, a priori, no se vería limitada por problemas de disponibilidad de productos (aunque estos pueden no siempre ser funcionales a las necesidades del productor).

Cabe destacar, por otro lado, que la problemática de la adopción de tecnologías de AP no es exclusiva del caso argentino. De hecho, existe una extensa y madura literatura, la cual ha sido revisada de forma exhaustiva para este trabajo, abocada al estudio de la difusión tecnológica en la agricultura, que en años recientes ha estudiado la adopción de tecnologías de AP en particular. Si bien esta literatura es heterogénea y analiza una gran abundancia de atributos (Tey y Brindal, 2012), permite identificar un conjunto de factores que se supone están asociados con mayor frecuencia al uso de tecnologías de AP, así como las herramientas metodológicas estándar para analizarlos.

Partiendo de esta literatura, y aprovechando una base de datos aún no explotada para este tipo

de análisis, este trabajo se propone estudiar los factores asociados a la adopción de tecnologías de AP en Argentina. Al enfoque predominante en la literatura examinada, basado en características individuales de cada unidad observacional (*e.g.*, el productor), en este estudio se presenta una extensión, implementando herramientas de econometría espacial, lo cual permite explorar factores adicionales asociados a las interacciones entre las unidades productivas bajo análisis.

Los principales resultados se encuentran en línea con los hallazgos de la literatura preexistente. Un mayor tamaño de los lotes productivos, y una mayor especialización en cultivos extensivos (maíz, soja o trigo), se ven asociados con mayores niveles de adopción. Por otra parte, la diversidad de actividades de los productores (*i.e.*, mayor participación en actividades de ganadería) se asocia a menores niveles de adopción. Por último, también se encuentra evidencia sugerente de la relevancia de interacciones espaciales, de modo que la adopción en un departamento se relaciona positivamente con la mayor adopción en departamentos vecinos.

El cuerpo principal del trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera. El Capítulo 2 presenta el estado de la cuestión y el marco de análisis. Aquí se presenta una revisión de los trabajos que han estudiado la problemática de la adopción tecnológica en la agricultura y en otras áreas, así como en particular los que se centran en la agricultura de precisión. A continuación, en el Capítulo 3 se presenta y discute la metodología empleada en este estudio, así como los datos empíricos utilizados, su fuente y tratamiento. Subsiguientemente, en el Capítulo 4 se realizan diversos ejercicios econométricos y chequeos de robustez, y se presentan e interpretan los principales resultados obtenidos. Por último, el Capítulo 5 concluye.

2. Estado de la cuestión y marco de análisis

2.1. La agricultura de precisión: definiciones y patrones de adopción a nivel global

La Agricultura de Precisión (AP) refiere a un grupo de tecnologías que permiten la aplicación de insumos agrícolas, tales como fertilizantes, semillas, plaguicidas, en forma variable dentro de un lote de campo, de acuerdo a los requerimientos y/o potencial productivo del mismo (Ortega *et al.*, 1999). Esto es, al incorporar información sitio y tiempo específica de diversas fuentes (*e.g.*, satelitales, climatológicas históricas, tomadas en el terreno) se identifican las heterogeneidades presentes en una unidad productiva de modo tal de lograr ganancias de eficiencia a la hora de la aplicación de insumos. El componente principal de la AP es efectivamente la variabilidad espacial y temporal (Pierce y Nowak, 1999). Las ventajas derivadas de la aplicación de estas tecnologías se asocian tanto a disminución de costos, como a sustentabilidad y cuidado del medio ambiente (Van der Wal, 2019) –fundamentalmente por el menor uso de insumos (Gebbers y Adamchuk, 2010). Por otra parte, se trata de un conjunto de tecnologías altamente dinámico: las herramientas utilizadas y la utilidad de estas varían fuertemente a través del tiempo (se encuentran aún en desarrollo) y el espacio (utilizar una tecnología hoy disponible en el mercado puede ser conveniente en un ambiente y no en otro).

Avances de la AP pueden encontrarse desde la década de 1960 (Pierce y Nowak, 1999), aunque generalmente el origen es asociado a las primeras aplicaciones civiles de tecnología GPS en Estados Unidos a fines de la década de 1980 (Lowenberg-DeBoer, 2019). Desde entonces, se han

utilizado distintos términos para referirse al tema, como agricultura por suelo (Carr *et al.*, 1991), producción espacialmente variable (Schueller, 1991) o administración sitio-específica (Pierce y Sadler, 1997), entre otros (Pierce y Nowak, 1999). En dicho período, el espectro de tecnologías utilizadas ha crecido. En la actualidad, la AP combina sensores, sistemas de información, maquinaria mejorada y herramientas de gestión informada para optimizar la producción teniendo en cuenta variabilidad e incertidumbre (Gebbers y Adamchuk, 2010).

Inspirado en el esquema presentado por Gebbers y Adamchuk (2010), los progresos de la AP pueden ser divididos en categorías. La primera es la forma en que se capta la información. En este sentido, hay un gran número de alternativas con respecto a sensores. Por ejemplo, algunos vienen incorporados en maquinaria, otros se insertan en drones utilizados exclusivamente para el relevamiento de información. Estos avances son complementados con otras fuentes de información, como las imágenes satelitales de precisión creciente con el paso del tiempo. La segunda categoría se corresponde con la interpretación de esa información. En este punto, a partir de la información ya obtenida, se desprenden niveles óptimos de utilización de insumos —*e.g.*, la implementación de una estrategia de densidad de siembra variable ajustada a las condiciones del ambiente¹.

En tercer lugar, se tiene la categoría gerencial. Aquí, se procede a la toma de decisiones a partir de los dos puntos previos, procedimiento que puede categorizarse en dos enfoques: reactivo, donde con el avance del tiempo se revisa la información para la aplicación variable de insumos, o predictivo, donde la información es utilizada en un primer momento y las decisiones se toman en función de los pronósticos obtenidos. La última categoría se corresponde con la trazabilidad y estandarización de la información. En este caso, herramientas como sistemas de información permiten compartir datos de la producción.

En definitiva, el objeto de estudio implica un avance tecnológico aplicado sobre recursos naturales renovables basado en la digitalización y transformación en datos de fenómenos de la naturaleza, lo cual permite adaptar el proceso productivo a las múltiples características puntuales de cada micro-ambiente (Lachman y López, 2018). En este sentido, es menester destacar que el desarrollo y perfeccionamiento de estas tecnologías es a su vez un proceso dinámico, ya que debe generar soluciones para problemas que también tienen su propia trayectoria evolutiva. La estrategia óptima no será necesariamente la misma para el mismo período en distintos campos, ni para el mismo campo en distintos períodos. Lo cual lleva a que se trate de un paquete tecnológico con características y requerimientos diferentes a lo largo del tiempo y del mundo. Por ejemplo, Griffin y Lowenberg-DeBoer (2005) señalan que la aplicación de fertilización variable podía ser sumamente rentable en algunas partes del mundo y en otras difícilmente superar los costos. Por estas cuestiones, autores como Lowenberg-DeBoer y Erickson (2019) identifican a la AP como una gran caja de herramientas en continuo desarrollo de donde un productor puede seleccionar y aplicar únicamente las que considere convenientes.

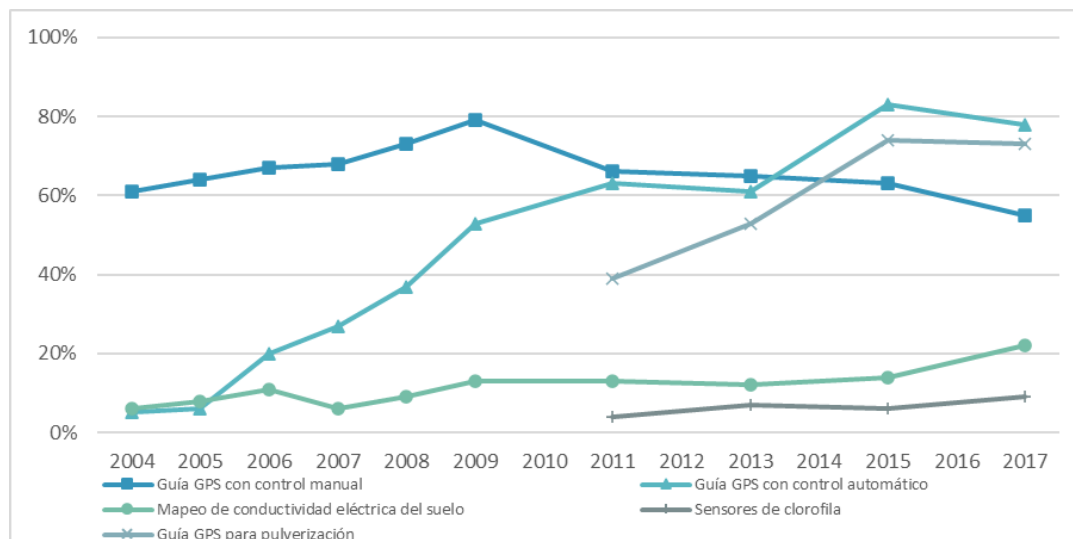
Como consecuencia, esto se traduce en una adopción variable a lo largo del mundo. No hay disponible una base de datos que abarque un gran número de regiones y que a la vez permita identificar tendencias; consecuentemente, la información agregada suele devenir de diversas fuentes.

¹Algunas propiedades que hacen a la productividad y necesidades del suelo y que son tenidas en cuenta son la humedad, el contenido de arcilla, el contenido de materia orgánica o el pH.

En primer lugar, la AP se ha venido desarrollando principalmente en Estados Unidos, por ejemplo, en dicho país se encontraba aproximadamente el 90 % de los monitores de rendimiento en 2005; de hecho, la utilización de esta y otras tecnologías similares presentó en general un crecimiento en la utilización, por lo menos entre fines de los 1990 y principios de los 2000 (Griffin y Lowenberg-DeBoer, 2005). No obstante, a principios de los 2000 un gran número de países utilizaba tecnologías de AP. Por ejemplo, la cantidad de monitores de rendimiento por país era elevada en América (donde lideraban los EE. UU., Argentina y Brasil) y Europa (donde Alemania, Dinamarca y Reino Unido se destacaban), así como en otras regiones (Australia y Sudáfrica). Si se toma esta métrica en relación a la cantidad de hectáreas cultivables, el ranking era liderado por algunos países europeos como Alemania (523 monitores por millón de hectáreas) y EE. UU. (335), mientras que Argentina no se encontraba cerca de esos niveles (64).

A pesar de la falta de datos actualizados, de acuerdo con Lowenberg-DeBoer y Erickson (2019) pueden detectarse ciertos patrones. En Asia y África los niveles de adopción parecen encontrarse más acotados, y particularmente en África limitados a grandes productores. En Europa uno de los mayores adoptantes es Alemania. En Sudamérica, Argentina y Brasil son líderes en el sector, en parte gracias a una adopción temprana de varias tecnologías. En tanto, EE. UU., como ya se dijo, es el país más avanzado en esta dimensión y las aplicaciones se han intensificado en general. Un ejemplo del comportamiento de la integración de ciertas tecnologías en EE. UU. por parte de empresas a sus productos en venta puede observarse en la Figura 1.

Figura 1: Proporción de vendedores que ofrecen tecnologías de AP en EE. UU.



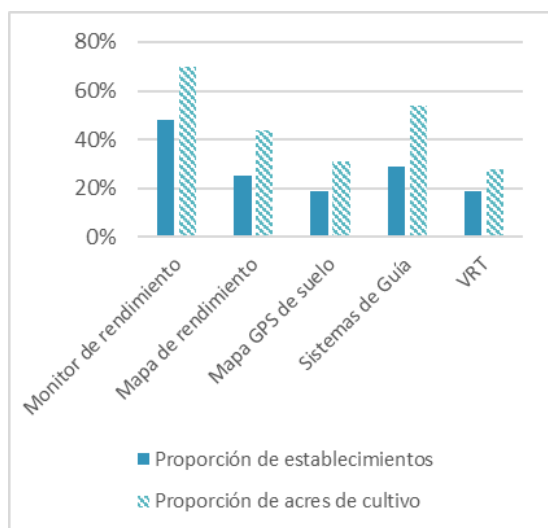
Fuente: Elaboración propia en base a Lowenberg-DeBoer (2019)

Adicionalmente, estimaciones del United States Department of Agriculture (2016) (Schimmelpfennig, 2016) apuntan en direcciones similares. A principios de la década de 2010 la difusión de algunas tecnologías ya era sumamente elevada en los EE. UU., donde aproximadamente en el 70 % de la superficie cultivada de soja y maíz se utilizaron monitores de rendimiento. Estos datos, junto a la utilización de otras tecnologías y distintos criterios de agregación se presentan en la Figura 2. Si se observa, la proporción que adopta es sistemáticamente mayor cuando la medida se toma en función de la superficie cultivada en lugar del número de establecimientos; esto se condice

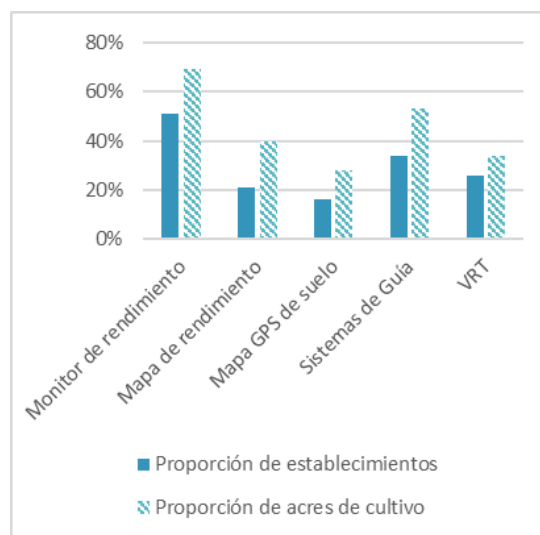
con el hecho de que la adopción de AP es más común en establecimientos de mayor dimensión, dada la inversión inicial que demandan algunos equipos.

Figura 2: Adopción según tipo de plantación

(a) Adopción de AP en establecimientos de plantaciones de maíz, 2010



(b) Adopción de AP en establecimientos de plantaciones de soja, 2012



Fuente: elaboración propia en base a Schimmelpfennig (2016)

Si bien la tendencia se observa a nivel general, no es uniforme para todos los cultivos (Schimmelpfennig, 2016). El arroz, el maíz y la soja presentan un incremento en la adopción en la década del 2000 para todas las tecnologías medidas en las figuras anteriores. El trigo presenta incrementos generalizados en adopción en la mayoría de estas, pero no en todas. Por otra parte, uno de los cultivos menos dinámicos ha sido el algodón, con incrementos leves y tasas de adopción bajas.

De lo dicho se desprende que, si bien se ha observado que la utilización de estas tecnologías ha sido creciente a nivel global, esta tendencia presenta una heterogeneidad elevada. Una primera fuente de variabilidad se vincula con que la AP comprende un abanico amplio de tecnologías. Un productor puede optar por la adopción de una o varias herramientas del paquete tecnológico, de modo que se pueden encontrar tendencias distintas según cada instrumento (*e.g.*, una herramienta con una difusión muy acelerada y otra cuyo avance es más lento). Lowenberg-DeBoer (2019) destaca la veloz difusión de guías por Global Navigation Satellite Systems (GNSS), pero un menor ritmo en tecnologías de tasa variable (VRT)² donde se adapta la aplicación de insumos como fertilizantes o herbicidas frente a condiciones del suelo o cultivo.

Por otra parte, se tienen diferencias a nivel geográfico. Lowenberg-DeBoer y Erickson (2019) destaca la menor difusión en países subdesarrollados. Una de las explicaciones que propone para esto último es que muchas veces la tecnología no se adapta a las necesidades de cada país, de modo que el productor debe llevar a cabo adaptaciones por sí mismo. Consecuentemente, hay tecnologías que aún no resultan rentables en ciertos mercados. De modo similar, Van der Wal (2019) señala dos típicas restricciones que son el costo y la complejidad del paquete tecnológico,

²Algunas propiedades que hacen a la productividad y necesidades del suelo y que son tenidas en cuenta son la humedad, el contenido de arcilla, el contenido de materia orgánica o el pH.

de modo que poblaciones con menor disponibilidad de recursos económicos o menor capacitación tendrían una menor probabilidad de adopción.

El costo elevado se vincula también con el tamaño de los establecimientos, dado que los productores de mayor tamaño generalmente tienen mayor capacidad de inversión. La vinculación positiva entre tamaño y adopción es algo usual en la literatura. Lowenberg-DeBoer y Erickson (2019) señalan este patrón en África, así como EIP-AGRI (2015) en Europa, Banerjee *et al.* (2008) en EE. UU. o Lachman y López (2018) en Argentina. Sobre este punto se profundiza en la siguiente subsección.

Otros elementos sitio-específicos también pueden influir. Griffin y Lowenberg-DeBoer (2005) enfatizan que factores culturales y socioeconómicos son relevantes. Un ejemplo de esto es que productores de Sudáfrica adoptan la guía automática por razones muy diferentes a las de los productores de Brasil. En Sudáfrica, a raíz del síndrome de inmunodeficiencia adquirida (sida) se perdió la vida de muchos trabajadores agrícolas especializados en operar cosechadoras y tractores. En respuesta, varios productores invierten en tecnologías de autoguía. En Brasil, se dispone de mano de obra abundante y salarios relativamente bajos, de modo que allí la motivación principal de la inversión sería el ahorro de tiempo y químicos.

A modo de conclusión, la AP comprende un paquete tecnológico que permite mejoras de eficiencia, traducidas en mayor retorno para el productor, así como en un menor impacto ambiental. Su emergencia podría asociarse a la década de 1980 y desde entonces ha tenido una difusión creciente, aunque con diferencias en las tasas de adopción por regiones y tipos de tecnología. Los factores que aportan a la comprensión de las diferencias en niveles de adopción pueden incluir la disponibilidad de recursos económicos o el capital humano de los productores o trabajadores, el tipo de cultivo, el tamaño de los establecimientos y otros aspectos específicos como el costo de la mano de obra.

2.1.a. La difusión de la AP en la Argentina

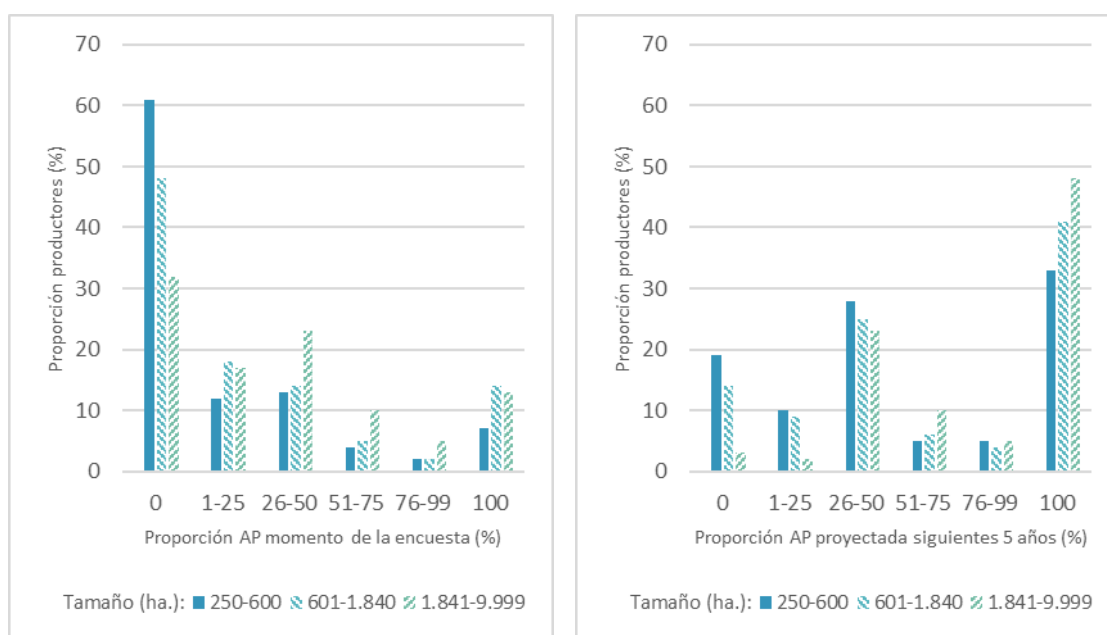
En Argentina la AP comienza a utilizarse a mediados de la década de 1990 (Bragachini *et al.*, 2004). Ya en el nuevo siglo diversos datos sugieren una tendencia a su mayor difusión. Por ejemplo, en 2009, en una serie de encuestas de la Universidad Austral a 502 productores con superficies explotadas de más de 250 ha. en Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe, se consultó de forma abierta cuáles consideraban que serían los principales desafíos de gestión que las empresas agropecuarias debían enfrentar de cara a los subsiguientes cinco años. La AP no fue mencionada frecuentemente (Feeney *et al.*, 2010), resultado diferente al encontrado en una segunda edición de esta encuesta, en el 2012, donde su relevancia tuvo un notorio incremento (Feeney *et al.*, 2012)³.

Otro aspecto observado en la encuesta del 2009, en consonancia con lo señalado por la literatura internacional, es la mayor intensidad de adopción en productores de mayor tamaño. Si bien los productores que proyectaban adoptar al menos una herramienta de AP representaron más del 70 % en todos los grupos, la proporción de productores que efectivamente utilizaban al menos una herramienta de este tipo era del 59 % en grandes productores, mientras que en los comerciales y

³Este incremento es destacado en el documento de la encuesta. No obstante, dado que los datos no son abiertos, no se puede precisar aquí de qué magnitud fue dicho aumento.

medianos caía al 36 % y 23 % respectivamente⁴. En la segunda edición de la encuesta, los tres grupos aumentaron sus niveles de adopción (68 % de los productores grandes, 52 % de los comerciales, y 39 % de los medianos) y, a su vez, en general se proyectaba incrementar estos niveles –ver Figura 3. Con respecto a los limitantes de la adopción para distintos tipos de productores, en el informe se señalan factores tales como las restricciones financieras o el desconocimiento de las tecnologías.

Figura 3: Adopción por tamaño de explotación en el momento de la encuesta (2012) y proyectado



(a) Niveles de adopción por tamaño de explotación en el momento de la encuesta

(b) Niveles de adopción por tamaño de explotación proyectado por productores

Fuente: elaboración propia en base a Feeney et al. (2012)

En la edición del 2012 también se cuenta con una apertura con respecto a si los productores son miembros de alguna cooperativa o no. Los productores no asociados a cooperativas presentaban niveles de adopción mayores, al mismo tiempo que los productores que sí integraban estos espacios proyectaban incrementar fuertemente la utilización de estas tecnologías en los 5 años subsiguientes.

En consonancia, publicaciones del INTA dan cuenta de tendencias similares. Méndez *et al.* (2014) destacan que ya existían segmentos consolidados en el mercado local, entre ellos los monitores de rendimiento, monitores de siembra, banderilleros satelitales y equipos de dosificación variable, y, más recientemente, equipos de guía automática y sensores de malezas, entre otros. Los segmentos ya consolidados reflejaban una elevada capacidad instalada con relación a la superficie cultivable nacional⁵. En tanto, de acuerdo con Scaramuzza *et al.* (2016), desde fines de la

⁴Clasificado de forma que los productores medianos tienen superficies de entre 250 y 600 ha., los comerciales desde 601 hasta 1.840 ha., y los grandes desde este último límite hasta las 9.999 ha. En la encuesta también se tiene la categoría de “mega-productores”, de superficies de explotación superiores a las 9.999 ha., pero dado que tan solo se cuenta con 9 observaciones fue omitida del análisis.

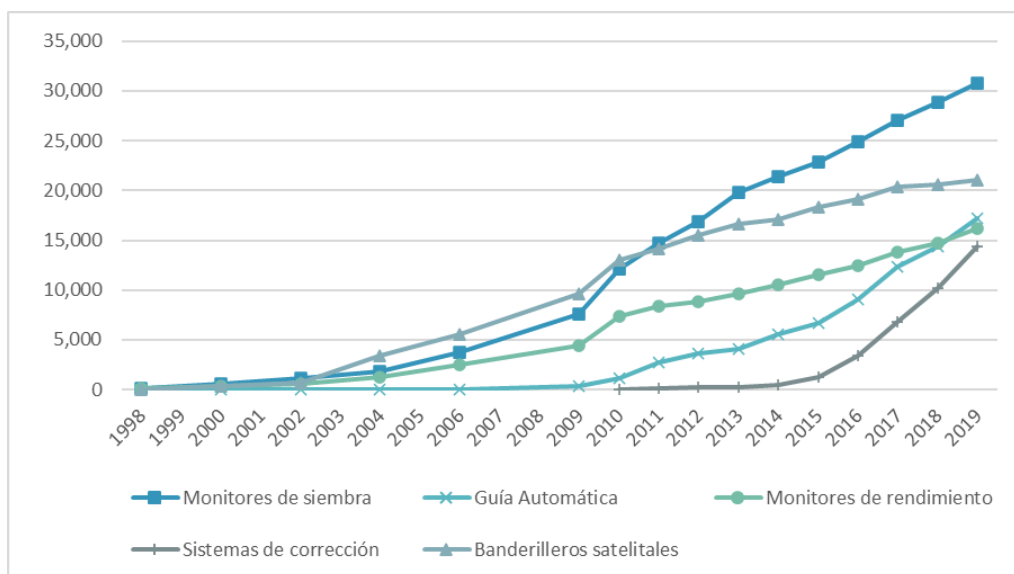
⁵A modo ilustrativo, los autores comentan que, tomando como referencia las ventas, si cada monitor de rendimiento se instalara en una cosechadora y esta se utilizara al nivel de su amortización “adecuada” estimada (3.000 ha. anuales), se podrían realizar mapas de rendimiento para el 70 % de la superficie cultivada nacional (para el período el 2012/2013).

década de 1990 hasta 2015 había crecido sostenidamente la utilización de tecnologías AP, aunque en el último período se había observado una desaceleración debido a trabas a las importaciones y cuestiones vinculadas a controles de cambios. Por otra parte, los autores señalan que en algunas tecnologías es esperable cierta volatilidad, como sucedió con la utilización de drones. Esta comenzó generando un interés elevado, pero el costo de los equipos y la falta de capacidades de procesamiento de la información generada pusieron un límite; no obstante, proyectaban una masificación en la utilización de esta herramienta conforme se lograran avances que reduzcan el umbral tecnológico necesario para poder aprovecharla.

Incorporando información hasta el 2019, Villarroel *et al.* (2020) también señalan que la tendencia a la adopción de la AP es creciente. Las tecnologías de mayor crecimiento en la década de 2010 son las herramientas de guía automática, monitores de siembra, monitoreo de rendimiento y sensores para aplicación selectiva en el control de malezas. Asimismo, señalan que ya desde fábrica es elevado el número de sembradoras que traen incorporada tecnología de dosificación variable. Por otra parte, los sistemas de telemetría, que permiten incorporar información y tomar decisiones en tiempo real, también se destacan como una tecnología con velocidad de difusión muy elevada, aunque en una etapa inicial (en 2013 solo se vendieron 37 equipos que tenían incorporado un sistema de telemetría, mientras que en 2019 este número ascendía a 519, acumulando un total de 1.877 unidades para el período en conjunto).

Combinando la información presentada por Scaramuzza *et al.* (2016) y Villarroel *et al.* (2020) se construyen series de ventas de largo plazo, cuya dinámica se presenta en la Figura 4. Las series -que representan una subselección del conjunto de tecnologías enmarcadas dentro de la AP- muestran que, en términos generales, la tendencia fue positiva denotando una creciente tecnificación del agro en Argentina. Varias herramientas presentan tendencias similares, aunque por una cuestión ilustrativa no fueron incluidas en la figura.

Figura 4: Ventas acumuladas de equipos de AP



Fuente: elaboración propia en base a Scaramuzza *et al.* (2016) y Villarroel *et al.* (2020)

Finalmente, Lachman y López (2018) en base a registros de la empresa Map of Agriculture⁶, presentan datos que sugieren una tendencia creciente en la adopción de AP entre 2016 y 2018 en base a datos de utilización (en lugar de los de ventas antes presentados). Según esta fuente, la proporción de productores adoptantes subió aproximadamente de un 11 % a un 16 % entre dichos años. A la vez, en consonancia con lo ya mencionado, se observan mayores niveles de adopción en los grandes productores (ver Tabla 1).

Tabla 1: Adopción promedio 2016-2018 según tamaño de explotación

Tamaño	% de Adopción
< 300 ha.	3,9
300 a 500 ha.	10,6
500 a 1.000 ha.	10,9
> 1.000 ha.	24,5

Fuente: elaboración propia en base a Lachman y López (2018)

Otras dos fuentes de diferencias han sido la localización geográfica y el tipo de cultivo. En el NOA y el NEA la adopción es mayor, aunque esto en parte podría ser explicado porque el tamaño de las explotaciones suele ser mayor que en la región pampeana. La adopción de AP fue del 11 % y 15 % en Santa Fe y Buenos Aires respectivamente, mientras que para Salta esta fue del 36 % y del 22 % en Chaco. Según el tipo de cultivo, la utilización de estas tecnologías depende de distintos factores. Inicialmente, a mayor nivel de complejidad del cultivo, más se justifica la adopción, ya que permite obtener un rendimiento diferencial mayor. Paralelamente, el tipo de cultivo también se relaciona con el tamaño de cada explotación. En esta dimensión, se observan mayores niveles de utilización de estas tecnologías en cultivos de maíz y soja principalmente, y en tercer lugar de trigo. Esto puede observarse en la Figura 5.

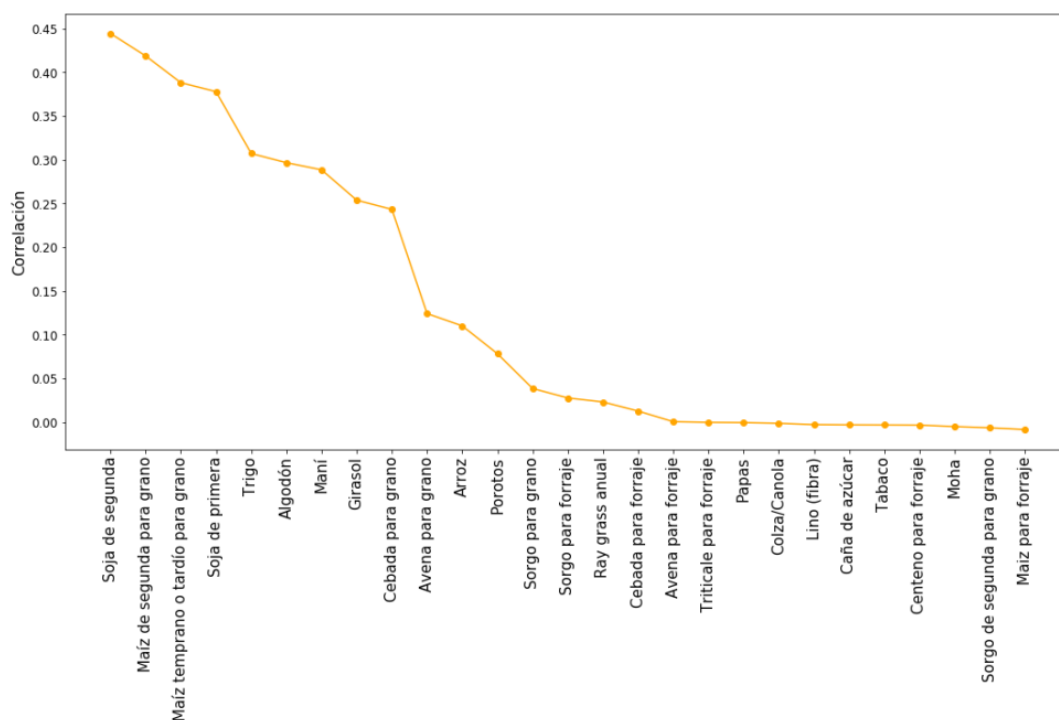
2.1.b. La oferta local de tecnologías de AP en la Argentina

A fin de entender cómo se compone el ecosistema de firmas proveedoras de bienes y servicios de AP, Lachman y López (2018) realizaron en 2017 y 2018 un relevamiento de 77 empresas, que fueron clasificadas en tres grupos. El primero, se compone por empresas dedicadas al desarrollo de equipos e instrumentos. El segundo está conformado por proveedoras de servicios basados en conocimiento para procesos de base biológica. Finalmente, el tercer grupo se corresponde con firmas que ofrecen servicios para diversos eslabones de la cadena agropecuaria por fuera de las tareas que son realizadas directamente en el campo (*e.g.*, servicios de logística, e-commerce, servicios para pos-cosecha).

En el primer grupo, el colectivo de empresas es heterogéneo. Hay una gran variabilidad en la edad de las firmas y sus orígenes, siendo algunas más ligadas a ramas mecánicas mientras que otras se asocian más a desarrollos electrónicos. En el segundo y tercer grupo, en general las empresas son jóvenes, prestan sus servicios en forma virtual y tienen un alto potencial para ser escaladas. El segundo grupo se destaca por las actividades de captura y procesamiento de datos, mientras que el tercero presenta características más específicas según el eslabón de la cadena sobre

⁶Map of Agriculture es una empresa originada en Nueva Zelanda que tuvo posteriormente operaciones en Argentina. El foco de su trabajo es generar información especializada de agricultura y ganadería a partir de encuestas a productores.

Figura 5: Correlación lineal entre adopción AP y tipo de cultivo



Fuente: Lachman y López (2018)

el cual se posiciona. Este último grupo podría no corresponderse en su totalidad con la definición de AP aquí utilizada, ya que contempla, por ejemplo, empresas que se dedican a la asistencia en la obtención de financiamiento para firmas. No obstante, son firmas que necesariamente interactúan con el ecosistema en su conjunto, favoreciendo una retroalimentación positiva, y forman parte activa en la tecnificación del agro argentino. Los autores destacan las complementariedades de las firmas estudiadas con el entramado productivo de la Argentina y la región, lo cual hace de este un segmento prometedor.

Las empresas de estos sectores son principalmente PyMES argentinas (aunque en el primer grupo también hay presencia de firmas extranjeras). Estas presentan niveles de sofisticación elevados, interactúan con diversos agentes (*e.g.*, instituciones técnicas de sector, otras firmas, clientes) y se caracterizan por una elevada dinámica y capacidad de innovación, lo cual refiere tanto a avances incrementales como a innovaciones disruptivas.

Para describir con mayor precisión los resultados del estudio, se simplificará la clasificación a dos categorías, donde se diferenciarán las firmas de agropartes (primer grupo) y las de servicios (segundo y tercer grupo). El grupo de empresas de equipos e implementos en promedio tenía una mayor edad, siendo que fueron creadas en promedio en 1989 y con participación en AP desde 1998. Por otra parte, la mayoría de las firmas de servicios nacieron luego de 2013.

Estas diferencias también se observan en otros indicadores. Un 70 % de las firmas de agropartes tuvo ingresos superiores al millón de pesos, proporción que se reduce al 50 % de las firmas de servicios. En forma similar, el nivel de empleo es claramente superior en las empresas de agropartes. La cantidad de empleados promedio de este grupo de empresas superó las 30 personas, valor que se ubica por debajo de la mitad para las firmas de servicios. No obstante, lo que es homogéneo

es que se registró una tendencia creciente entre 2015 y 2017, ya que el empleo promedio creció en todos los grupos de empresas.

Estas empresas tenían distintos tipos de clientes, aunque la venta directa a productores fue el segmento compartido más amplio. Las ventas a productores, en el caso de empresas de servicios basados en conocimiento, representaron un 80 % del total. Entre otros tipos de clientes, los contratistas fueron una fuente de ingresos relevantes (aproximadamente 10 % de las ventas totales). No obstante, señalan los autores, muchos contratistas también son productores; consecuentemente, podría señalarse que los productores realmente representaron entre un 80 % y un 90 % de las ventas totales. Paralelamente, en el segmento de empresas de agropartes, productores y contratistas acumularon un 63 %, siendo importantes también las ventas a fabricantes de maquinaria agrícola (22 % aproximadamente). Se han encontrado también otros tipos de clientes relevantes según el tipo de empresa (*e.g.*, empresas de genética vegetal y animal, traders de granos, logística). Esto refleja la creciente tecnificación del agro en su conjunto más allá de la producción a campo, dado que se observan avances tanto aguas arriba (*e.g.*, acceso a financiamiento) como aguas abajo (*e.g.*, distribución y trazabilidad de la producción).

El estudio mencionado también aporta evidencia sobre los obstáculos a la difusión de las tecnologías de AP desde el punto de vista de los oferentes. En este sentido, las firmas encuestadas destacaron los costos (*e.g.*, financiamiento y carga tributaria), la volatilidad económica, la desconfianza/desconocimiento de los productores respecto de las nuevas tecnologías⁷ y la falta de capacidades de absorción en usuarios (Lachman y López, 2018). En una encuesta similar realizada entre el 2019 y el 2020, Lachman *et al.* (2021) encontraron que las principales dificultades enfrentadas por empresas Agtech se ubicaban dentro del mismo dominio, con la adición de problemas de infraestructura (*e.g.*, la falta de cobertura de internet en ciertas zonas hace que determinados servicios no se puedan proveer). En conjunto, a las complejidades propias de un sector en desarrollo (*e.g.*, consolidación de firmas, formación de mercados, perfeccionamiento de tecnologías), se suman otras cuestiones propias del entramado de la producción agropecuaria local y de la economía argentina. Asimismo, también aparecen dificultades debidas al hecho de que no siempre los servicios que se desarrollan desde el lado de la oferta son percibidos como útiles por parte de los productores.

2.2. Difusión y adopción de tecnologías

2.2.a. Marco conceptual

La agricultura y la ganadería son actividades económicas crecientemente cuestionadas por su impacto ambiental a partir de las emisiones de gases de efecto invernadero⁸ y la deforestación, entre otros factores (Tilman, 1999; Grau *et al.*, 2005). En este marco, la AP se inscribe como un conjunto de tecnologías y prácticas productivas que pueden contribuir a la sustentabilidad ambiental de estas actividades, al tiempo que también aumentan los rendimientos, tal como lo vienen

⁷Por ejemplo, una de las firmas estudiadas por los autores (Frontec) tuvo dificultades para penetrar el mercado local por las malas experiencias de productores con servicios similares a los que ofrecía.

⁸Por ejemplo, se ha estimado que un 10,5 % de las emisiones totales de los EE.UU. provino de la agricultura (NCA4, 2018).

señalando diversos autores (Van der Wal, 2019; Triguero *et al.*, 2013; Bröring *et al.*, 2020). La adopción de equipos y/o servicios ligados a la AP es considerada como una innovación de proceso, al representar estos una mejora del método productivo (Ortega *et al.*, 1999), la cual puede tener incidencia en diversos eslabones de la cadena de valor agroalimentaria (Lachman y López, 2018). Alternativamente, se la podría denominar como una innovación de eco-proceso, dadas sus implicancias ambientales (Triguero *et al.*, 2013).

Las particularidades tecnológicas de la AP le dan un dinamismo singular. En primer lugar, se trata de paradigma tecno-productivo en etapa de formación. Ilustrativo de esto es lo mencionado por Lowenberg-DeBoer y Erickson (2019), quienes señalan que la tecnología de “aplicaciones variables” de insumos –*e.g.*, en herbicidas aplicados exclusivamente sobre las malezas en lugar de ser vertidos en todo el campo- en realidad tiene mucho por progresar, y que incluso podría tratarse de un primer paso para eventualmente ser reemplazada por otras alternativas, como robots autónomos que mediante algoritmos de inteligencia artificial tomen gran parte de las decisiones productivas. Del mismo modo, los modelos utilizados y el procesamiento de imágenes se encuentran en un proceso de constante mejora.

En paralelo, otro factor que le aporta dinamismo al desarrollo de tecnologías de AP se basa en que su aplicación es sobre un objeto heterogéneo geográficamente y a su vez variable a lo largo del tiempo (Bisang *et al.*, 2008; Bisang, 2017). La especificidad ambiental (*e.g.*, los tipos de suelo, diferencias climáticas) genera la necesidad de adaptar estas tecnologías, demandando nuevos desarrollos. Adicionalmente, en un mismo ambiente biológico se da un proceso de mutación (*e.g.*, cambio en los nutrientes disponibles en el suelo, evolución de malezas). Esto implica que aun si el paquete estuviera totalmente formado y adaptado a ese espacio, con el paso del tiempo deben lograrse nuevas adaptaciones.

Considerando estos antecedentes, se entiende que la AP no es un paquete tecnológico cerrado, sino que se trata de un paradigma tecno-productivo en formación que involucra la aplicación de diversos equipos y servicios, los cuales están en constante avance y requieren consideraciones sitio-específicas para su aplicación (Bisang, 2017; Lachman y López, 2018; Lachman *et al.*, 2021). La interacción entre estos complejos fenómenos indudablemente afectará el patrón de adopción de esta tecnología por parte de los usuarios, donde, por ejemplo, factores espaciales, características de las explotaciones agropecuarias, o inclusive rasgos de quienes tomen las decisiones productivas incidirán en la difusión del paradigma de AP.

Por último, la AP se enmarca en dos categorías distintas ya que comprende tanto innovaciones disruptivas como incrementales. Se considera la primera categoría en tanto implica la emergencia de nuevo paradigma tecno-productivo en el sector agropecuario, basado en nuevas tecnologías, variables de decisión y fuentes de información, que altera las rutinas en los campos de la innovación, la producción y la gestión dentro del sector (Carraresi *et al.*, 2018; Bröring *et al.*, 2020). Ejemplos en este sentido son el desarrollo de sensores que se instalan en cosechadoras que permiten generar mapas de rendimiento, o drones que capturan nuevas imágenes o incluso pueden aplicar productos como pesticidas. El uso de estas nuevas herramientas puede transformar radicalmente el modo en cómo se toman las decisiones productivas, con impactos aguas arriba y aguas debajo de la cadena. Asociado a la segunda categoría, se observan también, para ciertas tecnologías más consolidadas

dentro del paradigma AP, senderos de mejoras incrementales, tales como en los casos de los dispositivos para la toma de imágenes o los desarrollos en el procesamiento de dichas imágenes, para lograr una mayor precisión en estas últimas.

En conclusión, la AP consiste en un paquete tecnológico que representa una innovación de proceso dentro de una cadena de base biológica. A su vez, no se trata de un paquete tecnológico cerrado, sino que se encuentra en pleno proceso de desarrollo. Finalmente, este paquete involucra una disrupción en toda la cadena de valor agroindustrial, pero a su vez también ha comenzado a incorporar innovaciones incrementales en algunos de sus componentes.

Como sucede con toda innovación, hay dos procesos separados relevantes, el de su creación y el de su difusión, y este estudio se centra en el segundo. Siguiendo a Stoneman y Battisti (2010), la difusión tecnológica se define como el proceso a través del cual se difunde una tecnología o conjunto de tecnologías, lo cual requiere el desarrollo tanto de una oferta como una demanda. Desde el lado de la oferta, las capacidades productivas se expanden, permitiendo abastecer el creciente mercado. Desde la demanda, que es el foco de este trabajo, se tienen dos dimensiones para el crecimiento: el margen extensivo y el intensivo. Desde el punto de vista de la geografía, el margen extensivo implica que la innovación pasa a ser demandada en un creciente número de regiones, mientras que el intensivo sugiere el aumento en la utilización o adopción en una misma región.

El estudio del proceso de difusión de innovaciones ha sido materia de exhaustivo estudio en el campo teórico de la economía que estudia el cambio tecnológico; las primeras publicaciones iniciaron en la década de 1940, y el tema fue ganando terreno con mayor fortaleza a partir de la siguiente década. Estudios empíricos y modelos teóricos alternativos continúan desarrollándose hasta la actualidad. Consecuentemente, podría afirmarse que se trata de una literatura madura, aunque no agotada, sino, más bien continuamente revisitada.

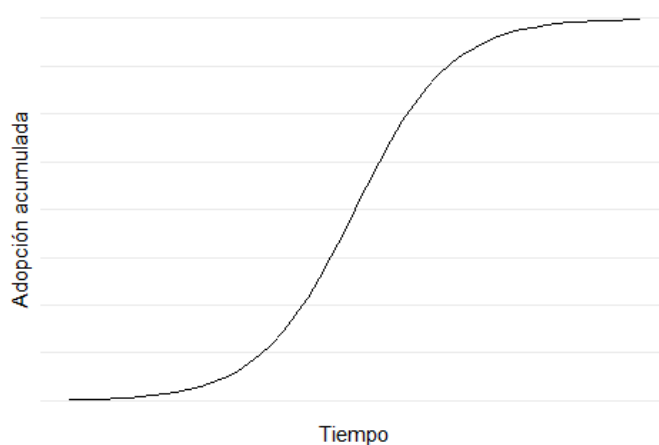
Rao y Kishore (2010) postulan que la adopción tecnológica puede ser considerada como un proceso de cinco etapas: conocimiento (se da a conocer la innovación), interés (se comprenden las potenciales ventajas de la adopción), evaluación (se contemplan factores tales como costos para considerar la conveniencia de adopción), prueba (se utiliza la innovación para constatar la conveniencia de adopción) y adopción (etapa final). Este proceso no sucede en simultáneo para todo potencial adoptante. Consecuentemente, según el momento de entrada se clasifica a los consumidores como: innovadores, adoptantes tempranos, mayoría temprana, mayoría tardía y rezagados⁹. Los retornos de la adopción pueden depender del momento; por ejemplo, un adoptante temprano puede beneficiarse de la llamada “ventaja del primero en mover” (Fudenberg y Tirole, 1985; Ireland y Stoneman, 1985; Camerani *et al.*, 2016).

La modelización de la difusión tecnológica fue inicialmente derivada de teorías de crecimiento biológico en un espacio, el cual está limitado por cuestiones de nutrientes o factores territoriales, lo cual terminaría resultando en un patrón de adopción con forma de S (Rao y Kishore, 2010), como el presentado en la Figura 6, en donde se observa una dependencia temporal. Según el caso, también podría caer esta curva con el avance del tiempo, si luego se abandonara esta tecnología

⁹Como referencia, Roger (2002) señala que los innovadores son el primer 2.5 % de individuos que adoptan, los adoptantes tempranos son el siguiente 13.5 %, la mayoría temprana el subsiguiente 34 %, la mayoría tardía comprende otro 34 % y los rezagados el 16 % final.

(e.g., si fuera reemplazada por otra).

Figura 6: Patrón de adopción en forma de S



Fuente: elaboración propia

Por otra parte, Sunding y Zilberman (2001) destaca en la literatura de difusión tecnológica lo que llama “modelos de límites”. Este enfoque se caracteriza por la presencia de una barrera que puede ser originada por distintas causas. Un ejemplo de esto es un umbral tecnológico, donde el capital humano puede establecer límites a la adopción, ya sea porque no resulta posible la adopción, o porque esta se torna muy costosa. Otro caso podría estar dado por costos, de modo tal que características (riqueza o ingreso) que refieran a la capacidad de afrontar gastos pueden establecer un límite.

Adicionalmente, el autor discute otros tipos de factores. A nivel institucional, refiere a la restricción de acceso al crédito, que también es destacada por autores como Besley y Case (1993) como limitante a la adopción. Como otros factores señala el análisis costo-beneficio, de modo que la percepción subjetiva del productor también es un factor relevante. Por último, la disponibilidad de insumos complementarios puede resultar una restricción no menor que puede condicionar el retorno de la adopción.

Por otra parte, el factor geográfico juega un rol relevante (Rogers, 1962; Diamond y Orduño, 1999; Sunding y Zilberman, 2001), de modo que la distancia puede generar obstáculos a la difusión y hacer que individuos lejanos a centros regionales adopten en forma tardía con mayor probabilidad. Esto puede darse por distintos motivos, como menor fluidez comunicacional o costos de transporte.

Por último, otros factores relevantes son la incertidumbre y el riesgo. La conveniencia de la adopción puede no ser evidente, lo cual se torna en un limitante mayor cuando esta requiere una inversión inicial elevada y trae consecuencias irreversibles (e.g., que lleven a la toma de decisiones de siembra, sobre lo cual no se podrá volver). Estos factores pueden paliarse muchas veces desde el lado de la oferta a través de herramientas como garantías y soporte técnico. Otro elemento que puede facilitar la adopción es la disponibilidad de proveedores especializados que “alquilen” la tecnología, aminorando el obstáculo que representa realizar una inversión inicial elevada y asumir su correspondiente nivel de riesgo. En el caso de la producción agropecuaria, los contratistas de servicios son actores de la cadena que justamente adquieren este rol (Bisang *et al.*, 2008) --e.g.,

brindan servicios de siembra, cosecha, fertilización, a partir de maquinaria propia la cual puede incorporar tecnologías ligadas a la AP.

2.2.b. Evidencia Empírica

2.2.b.1 Evidencia empírica sobre difusión en agricultura

Para comenzar, uno de los trabajos seminales en la literatura que estudia la difusión tecnológica en agricultura es el de Griliches (1957). En su trabajo, el autor estudia la difusión de una variedad de maíz (maíz híbrido) en Estados Unidos para el período 1932-1956. El autor identifica un concepto central en la literatura actual: “la forma de S” de la adopción de la tecnología, estudiando el tema a través de un modelo como función del tiempo, aunque sin dejar de identificar la influencia de factores estructurales –por ejemplo, encuentra evidencia a favor de la entrada más temprana de regiones con mejor calidad del suelo. El trabajo podría señalarse como un primer impulso de la literatura especializada, la cual luego ha ganado en sofisticación metodológica y ha incluido otras dimensiones analíticas, incluidas las vinculaciones sociales.

Stoneman y Battisti (2010) mencionan algunos hechos estilizados respecto al funcionamiento del proceso de difusión. Entre estos se encuentran la elevada dispersión regional y la verificación de convergencia en la adopción entre distintos lugares. Por otra parte, el modelo de límite (threshold model) permite identificar variables que pueden resultar excluyentes en la adopción de una innovación (*e.g.*, tamaño del terreno¹⁰). Asimismo, se incorpora la dimensión geográfica, si bien en cierto punto podría argumentarse que ya Griliches (1957) utiliza esta dimensión al analizar los impactos según regiones; en la literatura este factor se vincula frecuentemente a la dimensión social –considerando que a mayor proximidad se esperaría una mayor vinculación. En esencia, se considera que la cercanía a quienes adoptan se relacionaría positivamente con que el individuo/la firma pase a adoptar la innovación¹¹.

A nivel de aplicaciones econométricas sobre el tema, existe un gran número de trabajos que investigan la probabilidad de adopción de tecnologías (de AP, así como otras herramientas) en agricultura. En general, como metodología se emplean modelos de regresión no lineal, tales como los modelos binarios probit y logit (English *et al.*, 2000; Banerjee y Martin, 2008; Tey y Brindal, 2012), aunque también hay trabajos donde se aplican modelos multinomiales en los que se evalúan distintos motivos para no adoptar la nueva tecnología (Paudel *et al.*, 2011; Pandit *et al.*, 2012) o modelos de probabilidad lineal (Skreli *et al.*, 2011).

Generalmente, las variables incorporadas refieren principalmente a características del productor y del establecimiento, aunque según el trabajo se pueden encontrar varias alternativas. Entre estas se tienen variables de capital humano (*e.g.*, educación, antigüedad en el sector), de integración financiera, acceso a información y a tecnología (*e.g.*, disponer de una computadora), características del terreno (*e.g.*, tamaño y calidad de la tierra), tipos de cultivos utilizados, valor derivado de las actividades vinculadas a ganadería y ubicación geográfica.

Al analizar en profundidad la literatura, se encuentra una alta variedad de factores estudiados,

¹⁰Este ejemplo es tomado de David (1969), donde se vincula el uso de maquinarias al tamaño de las granjas.

¹¹Esto puede también vincularse con literatura de otros campos. La llamada primera ley de geografía (Tobler, 1970), postula que la relación entre dos unidades es mayor a mayor proximidad en el espacio.

así como de métricas para una misma variable. Tey y Brindal (2012) estudian un conjunto de 10 trabajos empíricos que estiman modelos para explicar la adopción de AP, y señalan que más de 30 factores han sido señalados como significativos. Los autores los agrupan como factores (1) socioeconómicos, (2) agroecológicos, (3) institucionales, (4) informacionales, (5) de percepción, (6) de comportamiento y (7) tecnológicos. A continuación, se comentan sus hallazgos, donde se podrá apreciar que la categorización es útil pero que algunas variables pueden referir a distintos aspectos¹².

Como factores socioeconómicos en general se estudian variables vinculadas con el capital humano, ya que esto incidiría positivamente en la probabilidad de adopción; como variables relevantes suele tenerse la edad, la educación y la experiencia en el sector. Entre los factores agroecológicos se destacan variables vinculadas con el margen de decisión sobre el terreno y su potencial para ser explotado, ya que esto también podría tener un efecto positivo; aquí se incluyen variables como la propiedad (propia o rentada) y la calidad del suelo. Los autores también incluyen en este grupo variables vinculadas al estado económico, como los ingresos, el ratio de apalancamiento o la dimensión de la propiedad. Como aspectos institucionales se suelen tomar la ubicación y el avance cercano de la urbanización. En términos de percepción, se encuentran variables relacionadas con la percepción de las innovaciones, como expectativas de retornos. Sobre el comportamiento, se tienen variables vinculadas a la intencionalidad de adoptar. Finalmente, como factores tecnológicos se toman variables vinculadas a decisiones de inversión y de umbral tecnológico, como la posesión de ciertas herramientas (*e.g.*, sistemas de irrigación) o la utilización de computadoras.

Cabe comentar algunos trabajos recientes que aportan evidencia empírica relevante sobre la influencia de los factores mencionados más arriba. Por ejemplo, al estudiar a nivel agregado por condado la adopción de distintas AP en Tennessee, EE. UU., usando un modelo logit, English *et al.* (2000) estudian la relevancia de distintas variables. Así, encuentran que la proporción de productores dueños de la tierra que trabajan y la dimensión de estos terrenos (medida como proporción de terrenos de 260 acres o más, o como total de superficie cultivada) están asociadas positivamente con los niveles de adopción. Los ingresos por ganadería medidos en dólares fueron considerados dada su potencial vinculación negativa con la adopción, pero la evidencia empírica no apoyó esta hipótesis.

A nivel productor existen varios trabajos sobre el tema. A continuación, se comentan los resultados principales de un conjunto de estudios que usan modelos logit -una presentación esquemática de aquellos se incluye en la Tabla 2-. Banerjee *et al.* (2008) estudian la adopción de tecnología GPS en productores de algodón de Estados Unidos. Sus resultados indican que la edad se vincula negativamente con la probabilidad de adopción -aunque no fue incorporado un término con el cuadrado de la edad que permita saber si esta relación tiene un punto de inflexión. Por otra parte, la utilización de computadoras en el entorno laboral, el tamaño de la explotación, el ingreso anual (medido en dummies que reflejan distintos tramos) y el rinde están asociados positivamente. Finalmente, no encuentran que la educación sea un factor relevante.

Por su parte, al estudiar la adopción de algodón genéticamente modificado en Estados Unidos,

¹²Ejemplo de esto es la localización. Esta variable puede reflejar factores institucionales como diferencias en la regulación, así como aspectos agroecológicos.

Banerjee y Martin (2008) llegan a resultados similares. Los autores encuentran que la localización y la especialización (cuánto de la producción destina el productor a algodón) son factores relevantes. No obstante, no encuentran que la educación y la experiencia en el sector sean factores importantes. Adicionalmente, en contraposición al trabajo anterior, la edad tampoco resulta estar asociada a la probabilidad de adopción en forma estadísticamente significativa.

Pandit *et al.* (2012) estiman un modelo para la adopción de AP de productores de algodón de Estados Unidos. Los autores encuentran que la educación y la superficie son relevantes para explicar la adopción. La edad es relevante y se asocia negativamente con la probabilidad de adopción, en sintonía con lo señalado por Banerjee *et al.* (2008); no obstante, también sus resultados indicaron que el ingreso del productor no es una variable significativa para explicar la adopción, a diferencia de estos últimos autores.

Finalmente, utilizando datos de productores en Ghana, Akudugu *et al.* (2012) también estiman un modelo para la adopción de tecnologías en agricultura. Sus resultados indican que la educación del productor y el tamaño del establecimiento son variables relevantes para explicar la mayor adopción. A su vez, encuentran una mayor propensión a la adopción en productores de sexo masculino. Por otra parte, la edad y su cuadrado son estadísticamente significativas, pero solo al 10 % de significación. Por último, no encuentran una vinculación significativa con la presencia de actividades fuera del establecimiento (para estudiar la dedicación parcial).

Tabla 2: Resumen de estudios y principales variables para explicar la adopción de tecnologías

	Banerjee y Martin (2008)	English <i>et al.</i> (2000)	Pandit <i>et al.</i> (2012)	Akudugu <i>et al.</i> (2012)	Banerjee <i>et al.</i> (2008)
Explicada	Algodón genéticamente modificado	AP	AP	Adopción de tecnologías	Adopción de GPS
Explicativas significativas de interés	Especialización	Propiedad vs. Alquiler	Superficie	Superficie	Superficie
	Localización	Proporción de grandes productores	Educación	Educación	Rinde
			Edad		Edad

En resumen, el espectro de variables utilizado en la literatura para explicar la adopción de tecnologías en agricultura abarca un amplio abanico, y la evidencia sobre la relevancia de estas es mixta. Entre los factores utilizados se encuentran variables que refieren a características del productor como la edad y la educación. También son consideradas otras vinculadas con la utilización de tecnologías complementarias, como el uso de computadoras en la actividad agrícola. Asimismo, las características de la localización del establecimiento pueden ser influyentes en las decisiones de adopción.

Desde una lectura crítica, un rasgo general de la literatura es la baja incidencia de estudios del estilo de “experimentos naturales” o aleatorizados, abundantes hoy en la disciplina económica. Consecuentemente, los estudios empíricos hasta aquí presentados son susceptibles a las clásicas

críticas de endogeneidad. Yang *et al.* (2008) realiza un estudio que busca sortear este problema. Se presta un tipo de capacitación especial a granjeros en China y se observan los resultados en comparación con granjeros que recibieron un tipo de capacitación tradicional. Las capacitaciones tienen el objetivo de mejorar el manejo integral de plagas (Integrated Pest Management, IPM), el cual demanda la aplicación de métodos específicos a las características del campo. Al aplicar la metodología de Diferencias en Diferencias encuentra que, si bien el conocimiento genérico respecto de plagas entre los granjeros es similar, el curso permitió una mejora del conocimiento complejo requerido para la toma de decisiones. Los autores concluyen que este tipo de capacitación es un enfoque apropiado para superar las limitaciones en la adopción de IPM.

En paralelo, se han identificado trabajos que utilizan herramientas de econometría espacial para evaluar las ventajas de la AP (Florax *et al.*, 2002; Bongiovanni, 2009) a nivel productivo. No obstante, no se han encontrado estudios que exploren esta metodología para explicar la decisión de adopción del paquete tecnológico de interés.

Finalmente, no se han encontrado trabajos cuantitativos recientes sobre causas/limitaciones de la difusión de tecnología en el sector agropecuario en la región sudamericana. Como estudio cercano se tiene el trabajo de Petry *et al.* (2019) para una región de Brasil. El trabajo estudia la problemática de la difusión tecnológica entre pequeños productores en tierras de baja fertilidad, utilizando encuestas semiestructuradas. Se trata de una investigación relevante y con sugerencias de política, pero no realiza un estudio cuantitativo específico validando sus conclusiones, ya que se trata de una investigación cualitativa cercana a un estudio de caso. Entre sus conclusiones se puede destacar que podrían facilitar la adopción de tecnologías factores tales como un entorno competitivo en el lado de la oferta, la disponibilidad de servicios de soporte técnico, y proyectos universitarios con finalidad de adaptación de tecnologías al entorno local, entre otros. A su vez, se encuentra que otro facilitador podría ser incorporar prácticas que no requieran la adquisición de tecnología adicional.

2.2.b.2 Otros trabajos empíricos relevantes

La literatura sobre difusión de innovaciones comprende trabajos donde se estudia la difusión de tecnologías diversas. Si bien los estudios del sector de interés son indispensables, para el presente trabajo se toman como referencia trabajos adicionales que se consideran relevantes. En este trabajo, una dimensión novedosa que se propone incorporar al análisis es el efecto de las interacciones, de modo tal que se postula como escenario posible que la probabilidad de adopción puede verse influenciada por el comportamiento o las características de unidades observacionales cercanas. En los estudios previamente mencionados, el tratamiento es tal que cada observación es independiente del resto. Por ello, se añaden al análisis trabajos que estudian la difusión de tecnologías fuera del sector agropecuario, pero que incorporan algún tratamiento de esta dependencia.

En primer lugar, Angst *et al.* (2010) realizan un estudio de adopción tecnológica en hospitales de Estados Unidos para el período 1975-2005. En la aplicación se estima un modelo donde se incluyen variables explicativas que reflejan aspectos individuales (como tamaño y antigüedad del hospital), así como efectos de contagio. Los efectos de contagio se toman a partir de dos medidas de proximidad: una geográfica (utilizando la distancia euclidiana) y una social (a partir de

indicadores derivados del sistema de salud). Entre sus resultados, se encuentra la relevancia de las medidas de proximidad mencionadas.

Por otra parte, Comin *et al.* (2012) se enfocan en 20 innovaciones distintas para 161 países durante 140 años. Los autores estudian la vinculación entre la distancia con otros agentes que adoptan la tecnología y el hecho mismo de adoptar la tecnología. Para ello, construyen un índice de distancia tecnológica, el cual consiste en un indicador que refleja cuán distante se encuentra un país del resto, en interacción con qué nivel de adopción tienen estos otros países. Los autores realizan chequeos de robustez utilizando especificaciones alternativas para el indicador, a partir de lo que se verifican resultados similares. Lo que los autores encuentran, entre otras cuestiones que exceden la finalidad puntual de este trabajo, es que el factor geográfico se vincula con la adopción; en otras palabras, encontrarse situado en cercanía a países con elevados niveles de adopción de una cierta tecnología, aumenta el nivel de adopción en el país respectivo.

Finalmente, el enfoque de Camerani *et al.* (2016) será una referencia para este trabajo. Los autores utilizan cuatro grupos conceptuales para estudiar las causas potenciales de la adopción de dispositivos MP3, utilizando una encuesta realizada a estudiantes en distintos países. Esto son: (i) efecto epidemia, donde el tiempo juega un rol; (ii) efecto de rango, donde las características individuales definen la probabilidad de adopción; y los efectos de (iii) stock, donde la adopción depende de la adopción de otras personas, y (iv) orden, donde se vincula la difusión previa de la tecnología con el incentivo a adoptarla. Para medir los efectos de contagio, los autores utilizan dos preguntas donde se consulta sobre la importancia de la adopción por distintas personas de la tecnología en cuestión. En sus resultados, encuentran que estos efectos influyen positivamente en la probabilidad de adopción.

3. Metodología

3.1. Enfoque metodológico

3.1.a. Motivación

Los enfoques frecuentemente utilizados, como los señalados en la Sección 2, presentan estimaciones sumamente útiles. No obstante, se considera que el método más conveniente debería tener en cuenta efectos espaciales. En el esquema tradicional, las unidades observadas son independientes e idénticamente distribuidas, un supuesto que es aún más difícil de sostener cuando se usa información por regiones delimitadas políticamente y no por características de las unidades¹³ (Kmenta y Klein, 1971, p. 512). Muchas de las propiedades asintóticas derivadas de dichos métodos requieren la validez de este supuesto, lo cual lo hace particularmente relevante. Si los errores distribuyeran en forma aleatoria respecto al espacio, no debería haber presencia de *clusters* (LeSage y Pace, 2009), lo cual difícilmente se verifica, como se mostrará en la siguiente sección.

LeSage y Pace (2009) señalan dos motivos por los cuales puede ser preferible usar econometría espacial. Estos son especialmente relevantes para el caso aquí estudiado. Por un lado, el proceso

¹³Un ejemplo de esto es cuando regiones delimitadas políticamente son distintas a las que podrían surgir por atributos como distribución étnica, religiosa, o incluso geográfica.

generador de datos puede ser espacialmente autorregresivo, y por otro, la omisión de variables explicativas relevantes podría tener estructura espacial. Esto es relevante ya que, en primer lugar, se abre la posibilidad de que las características de una unidad influyan en el nivel de adopción de otras unidades. En segundo lugar, la base de datos a utilizar presenta ciertas limitaciones y, como se ha mencionado, en la literatura un abanico amplio de variables explicativas es utilizado, lo cual hace ganar relevancia al problema de variables relevantes omitidas que sigan un patrón espacial (*e.g.*, alguna variable no incluida en el modelo que sigue un patrón espacial, como podría ser la accesibilidad a las tecnologías o servicios de posventa). En este marco, la dependencia entre unidades vecinas puede ser incorporada al modelo e influencias inobservables latentes que afectan a la variable dependiente pueden ser –en alguna medida– captadas.

Finalmente, y desde un punto de vista econométrico, es conveniente incorporar la dimensión espacial antes que asumir que la relación entre las unidades es nula (Griffith, 1995, p. 67). Este supuesto representa el caso más extremo de subidentificación de la matriz de pesos espaciales. Este camino llevaría a mayores errores estándar en un análisis de regresión. En conjunto, estos puntos dan sustento a la conveniencia de utilizar una estrategia que incorpore la dimensión espacial al análisis. Esta estrategia permitirá incorporar al estudio la vinculación entre unidades, lo cual es un factor relevante, como se analizó en el capítulo anterior.

La forma en la cual se incorporarán efectos espaciales al análisis es a través de la llamada “dependencia espacial”. La intuición de este fenómeno es que una unidad es influenciada por las unidades vecinas, ya sea por uno o más canales. Dado que una particularidad del espacio es la multidireccionalidad, también una unidad puede ejercer influencia sobre sus vecinos. En definitiva, lo destacable es que se considera que el problema bajo estudio está compuesto por un conjunto de entes que interactúan. Siguiendo a Anselin (2002), la justificación de la incorporación de la dependencia espacial podría descomponerse en tres vías. Las dos primeras comprenden la presencia de externalidades globales o locales, lo cual se puede asociar a dimensiones sociales. Esto puede darse, en primer lugar, de modo que, al tomar la decisión sobre la adopción de AP (variable dependiente en este estudio), un productor tome en cuenta la adopción de los vecinos como parte de su función objetivo. En segundo lugar, al tomar decisiones sobre variables como el tipo de cultivo o integrarse al sistema bancario (variables independientes), el productor tenga en consideración qué tipos de cultivo utilizan los vecinos (*e.g.*, al ver que el vecino produce soja, decide producir soja) o si estos se encuentran bancarizados.

Finalmente, la tercera alternativa se configura por la presencia de variables omitidas relevantes con estructura espacial. En el caso del modelo planteado en este trabajo, una variable que potencialmente se esté omitiendo serían los umbrales tecnológicos de los productores (parte del término de error, ya que, como se mencionó, no es incorporado en el modelo); si esta variable tuviera estructura espacial (es decir, si el umbral tecnológico de los productores no fuera independiente e idénticamente distribuido en el espacio) también justificaría la incorporación de dependencia espacial en la estimación.

3.1.b. Econometría espacial

La econometría espacial comprende un subconjunto de métodos econométricos donde se incorporan explícitamente efectos espaciales (Anselin *et al.*, 2008). En este análisis, el valor esperado de una variable para una unidad observacional puede depender de otras unidades. Consecuentemente, un primer interrogante es cómo aproximar esta vinculación, ya que dos unidades pueden estar fuertemente relacionadas o incluso no tener dependencia alguna. En este sentido, la primera ley de geografía (Tobler, 1970) postula que todas las unidades están relacionadas, pero que las más próximas están más relacionadas que las lejanas. En la disciplina, esta noción tiene un rol central y es llamada decaimiento en la distancia.

Por otra parte, corresponde identificar cómo medir la distancia, ya que las unidades se encuentran distribuidas en un espacio, que no necesariamente es geográfico, sino que podría ser un espacio político o de redes, donde la proximidad entre unidades podría, por ejemplo, estar dada por alguna medida de la intensidad de la vinculación político-económica (Anselin, 2017a; Beck *et al.*, 2006). No obstante, el criterio geográfico continúa siendo uno de los más utilizados.

Para incorporar este factor al análisis, se define una matriz de pesos espaciales W de dimensión $n \times n$. Cada elemento de la matriz define la relación de vecindad entre las regiones, donde estos elementos son no negativos. Si la región i es considerada vecina de la región j , w_{ji} (o peso espacial) será positivo; en caso contrario, el valor será cero. A mayor valor, se representa una mayor proximidad y, consecuentemente, una mayor intensidad en la relación. A su vez, las unidades no son consideradas vecinas de sí mismas, de modo que los elementos de la diagonal principal son todos iguales a cero.

La matriz W conlleva dos supuestos: el criterio que define qué unidades se relacionan (de modo que son consideradas vecinas) y el que define cómo se afectan (es decir, los pesos espaciales). Una primera distinción válida sería utilizar criterios estrictamente geográficos o indicadores de otro tipo como socioeconómicos (*e.g.*, alguna medida que refleje flujos comerciales entre regiones). Un problema que puede derivarse de la utilización de estos indicadores alternativos es la endogeneidad de la matriz W (la cual debe ser exógena para asegurar la consistencia de las estimaciones). Por esto, en primera instancia se restringirá la elección a criterios estrictamente geográficos.

Al interior de los criterios geográficos para definir qué unidades son vecinas, hay tres variantes ampliamente difundidas. Utilizar un criterio de contigüidad (son vecinas las regiones contiguas a la región en cuestión), un criterio de radio de distancia (son vecinas las regiones en un radio menor a un cierto umbral) o un criterio de cierta cantidad de vecinos (son vecinas la cantidad especificada de unidades más cercanas). Aquí se tienen ciertas características deseables. No deberían quedar unidades aisladas y, si sucediera, estas se deberían conectar manualmente para lo cual hace falta una justificación para forzar dicha relación de vecindad, o alternativamente omitir del análisis (Anselin, 2017a); de este primer punto se desprende que la matriz W debe estar totalmente conectada. A su vez, la cantidad de vecinos promedio no debería ser demasiado elevada a fines de no incorporar conexiones irrelevantes. Finalmente, la cantidad de vecinos de cada unidad no debería tener un comportamiento errático (*e.g.*, la distribución de esta variable no debería ser bimodal).

Para reflejar la intensidad de la vinculación entre vecinos se puede recurrir a un criterio binario

o una función de distancia. El criterio binario asigna un 1 a las unidades vecinas y un 0 a aquellas que no lo son. Por otra parte, una función de distancia asigna el resultado de una función (e.g., $1/\text{distancia}_{ij}$) de modo que las unidades más cercanas presenten una ponderación mayor. Dado que el criterio binario es de amplia utilización se optará por conducir principalmente el estudio de este modo. A su vez, debido a que mejora las propiedades estadísticas de los estimadores y facilita la interpretación y comparación de parámetros entre modelos (Sarrias, 2020), se realizará la normalización de los pesos por filas (se dividen los elementos por la suma de estos a nivel fila, de modo que finalmente la suma de los elementos por fila resulta igual a 1). Finalmente, cabe notar que puede suceder que la región i sea vecina de la j pero no viceversa, esto dependerá del criterio utilizado para definir la matriz de pesos espaciales¹⁴.

Como señala Anselin (2017a), un problema aquí es que se está frente a un modelo con interacciones sin información sobre las interacciones. Consecuentemente, el enfoque consiste en una aproximación donde se toman decisiones sobre qué criterio utilizar sin ser obvia la superioridad de una sobre otra. Como complemento y fuente de sustento, algunos lineamientos presentados por Herrera-Gómez (2018) en base a Griffith (1995) resaltan que: (i) es conveniente utilizar una matriz de pesos espaciales que no usarla; (ii) son preferibles matrices de menor orden; y, (iii) en general son superiores las matrices de pesos subidentificadas por encima de sobreidentificadas.

Ya definida la matriz W , se puede desarrollar el concepto de rezago espacial. El producto entre la matriz W y un vector columna x de dimensión n se denomina rezago espacial, de modo que cada elemento resultante es un promedio ponderado de los valores de x de los vecinos de cada región. Dado que los no vecinos de la unidad i tienen ponderación 0 en W , estos no influyen en el rezago espacial.

A modo ilustrativo, un modelo espacial básico podría incluir solamente rezagos de la variable dependiente. Esto puede escribirse como:

$$y_i = \rho \underbrace{\sum_{j=1}^n w_{ij} y_j}_{\text{rezago espacial}} + \varepsilon$$

O, en notación matricial:

$$y = \rho W y + \varepsilon; \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma_N^2)$$

En este contexto, el rezago espacial representa una combinación lineal de valores de la variable dependiente y construida a partir de observaciones vecinas a la observación i . $\sum_{j=1}^n w_{ij} y_j$ da como resultado un escalar que representa una combinación lineal de valores tomados por observaciones vecinas. Dado que la matriz W es estandarizada por fila, esto es un promedio ponderado.

En el caso presentado, solo se incluyó el rezago de la variable dependiente. No obstante, los rezagos espaciales pueden incorporarse al modelo de tres formas distintas: a través de la variable dependiente, de las explicativas o de los errores. En cada caso, el valor esperado de la variable dependiente sería una función del valor de la variable dependiente de los vecinos, del valor de las

¹⁴Por ejemplo, utilizando el criterio de vecinos más cercanos, podría una primera unidad no tener a una segunda como más cercana pero la segunda sí. En el Anexo C se incluye un ejemplo ilustrativo de cómo puede suceder esto.

variables independientes de los vecinos o del shock presentado en los vecinos.

Manski (1993) asocia estas alternativas a distintos efectos. En el contexto de este trabajo estos son los efectos endógenos, donde la propensión de una unidad a adoptar tecnologías de agricultura de precisión varía con el comportamiento de las vecinas; efectos exógenos (también llamados contextuales), en los que la propensión a adoptar varía con las características exógenas de las vecinas (*e.g.*, tipos de cultivos); y, efectos correlacionados, en los que hay similitudes de comportamiento por características individuales similares no observadas por similares ambientes (*e.g.*, contexto institucional).

Cuando un modelo incluye más de un tipo de rezago espacial se lo suele llamar modelo mixto. La especificación espacial más general se denomina modelo de Cliff-Ord, el cual es un modelo mixto ya que incorpora dependencia espacial por las tres vías. La forma funcional es la siguiente:

$$y = 1\alpha + \rho W_1 y + x\beta + W_2 x\gamma + u,$$

$$u = W_3 u\lambda + \varepsilon$$

donde ε es un vector de errores idiosincráticos *i.i.d.*($0, \sigma_\varepsilon^2 I$). Las matrices de pesos espaciales generalmente son coincidentes, de modo que $W_1 = W_2 = W_3 = W$. ρ es un parámetro que representa la autocorrelación espacial endógena de la variable dependiente, y expresa el efecto endógeno en términos de Manski (1993). γ refleja la autocorrelación espacial en las variables independientes, y es asociado a efectos de derrame y expresa el efecto exógeno. Finalmente, λ representa los efectos espaciales en el término de error, y es asociado al efecto correlacionado. Siguiendo las denominaciones presentadas por Herrera-Gómez (2018), el parámetro ρ es el coeficiente de rezago espacial, γ son los coeficientes espaciales de dependencia local y λ es el coeficiente de autocorrelación espacial de los errores.

En este sentido, son relevantes las distintas implicancias con respecto al patrón global según se incorpora un rezago de la variable dependiente o de variables independientes. Si se tiene un modelo sin dependencia espacial y se incorpora el rezago de la variable dependiente, hay derrames globales. La intuición es que un shock al valor de una variable independiente de una unidad i genera un impacto en el valor esperado de y_i ; lo cual impacta en el valor esperado de las unidades de las que es vecina y estas afectan nuevamente a la unidad i así como a sus respectivas vecinas y así sucesivamente. Consecuentemente, un shock en una unidad afecta al sistema completo. Alternativamente, en el caso de incluir solo el rezago de variables independientes, los efectos son únicamente locales. La mecánica es que el shock afectaría el valor esperado de y_i , al mismo tiempo que el de las unidades de las que i es vecina. No obstante, el efecto del shock se limita y no continúa esparciéndose¹⁵.

De estas nociones surge una complejidad dentro de la metodología. El impacto de un shock no es idéntico en cualquier unidad en contraposición a un análisis con datos de corte transversal tradicional. Dado que las unidades pueden estar conectadas de forma distinta (*e.g.*, distinta cantidad de vecinos), los derrames consecuentes pueden variar¹⁶. En el modelo donde se incluye dependencia

¹⁵Esto se encuentra ilustrado en el Anexo D

¹⁶Entre los trabajos que han estudiado esto se pueden señalar: Le Gallo *et al.* (2003), Baumont *et al.* (2003), y

en la variable dependiente (usualmente denominado SLM), esto se puede ilustrar de la siguiente forma. Tómesese la expresión del valor esperado de la variable dependiente:

$$E(y) = (I - \rho W)^{-1} x \beta$$

Esto, se puede reexpresar como:

$$y = (I - \rho W)^{-1} \beta_0 + \sum_{r=1}^k S_r(W) x_r + \varepsilon$$

Donde $S_r(W) = (I - \rho W)^{-1} \beta_r$ es una matriz $n \times n$ que se corresponde con la variable explicativa r . Al elemento ij -ésimo de esta matriz se lo define como $S_r(W)_{ij}$. Así, $S_1(W)_{1,1}$ es el impacto que la variable x_1 de la primera observación tiene en la primera observación (e.g., impacto que tiene shock a la conexión a internet en el departamento 1, sobre la adopción de AP en el departamento 1). Si hay un shock en x_1 en la región i , el impacto esperado en la variable dependiente de dicha región sería de $S_1(W)_{(i,i)}$. Se destaca entonces que el efecto que tiene x_1 sobre y no es homogéneo; es decir, no es (necesariamente) lo mismo que el shock a x_1 ocurra en la región 1 o en la región n .

Fuera de la diagonal principal, se tiene el efecto que ejerce un shock de x_1 en una región sobre y en otras regiones. Así, $S_1(W)_{1,2}$ es el impacto que un shock a la variable x_1 de la primera observación tiene en la segunda observación (e.g., impacto que tiene un shock a la conexión a internet en la región 1, sobre la adopción de AP en la región 2).

Se desprende entonces que:

$$\frac{\partial E(y_i)}{\partial x_{jr}} = S_r(W)_{ji}$$

Cabe notar cómo $S_r(W)_{ij}$ contiene los tres elementos involucrados en el análisis:

- Impacto en la observación i
- De un shock en la observación j
- A la variable explicativa r

Los efectos directos e indirectos se calculan para cada variable explicativa. Los efectos directos se calculan como la suma de los elementos de la diagonal principal de $S_r(W)$ dividida por n , el efecto total surge de la suma de todos los elementos de dicha matriz dividida por n , y los indirectos resultan de la diferencia entre los dos anteriores. Entonces, la medición de los efectos de la variable explicativa x_r :

- Efecto Medio Directo:

$$EMD = n^{-1} tr(S_r(W)) = \sum_{i=1}^n \frac{S_r(W)_{i,i}}{n}$$

Dall'Erba y Le Gallo (2008), donde se explota este aspecto al analizar los distintos impactos de shocks por región.

- Efecto Medio Total¹⁷:

$$EMT = n^{-1}(1'S_r(W)1) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{S_r(W)_{i,j}}{n}$$

- Efecto Medio Indirecto:

$$EMD = EMT - EMD$$

Para la selección del modelo adecuado, existen tests de especificación. Para decidir si incluir alguna forma de dependencia espacial los más difundidos son tests de multiplicadores de Lagrange (LM)¹⁸. De estos se tienen, primeramente, dos variantes. Una se utiliza para estudiar la presencia de efectos endógenos y otra para la presencia de efectos correlacionados. Estos tests tienen como posible falencia, sugerir la presencia de un tipo de dependencia espacial por la presencia de otro tipo (*e.g.*, ambos tests rechazan la hipótesis nula, pero en realidad solo corresponde incorporar efectos correlacionados). Complementariamente, se tienen versiones robustas de estos tests frente a esta posibilidad; de modo que se dispone de cuatro tests LM. De acuerdo con Anselin (2017c), al partir de un modelo sin dependencia espacial, lo apropiado es controlar el resultado de las versiones no robustas de los tests, y únicamente en caso de rechazar ambos realizar los tests robustos.

3.2. Datos utilizados: fuentes y análisis

Si bien no es la única, la encuesta de Map of Agriculture (MoA) es la fuente de información principal utilizada en el estudio. La base aquí utilizada consiste en encuestas que alcanzaron a 5.895 productores entre febrero de 2017 y agosto de 2018. A nivel complementario, se utilizaron dos fuentes adicionales. Para variables de control se incorporaron datos de ENACOM (2023) y del Censo Nacional Agropecuario 2018 (INDEC, 2020). El resumen de las variables tenidas en cuenta y su fuente se describe en la Tabla 3.

En primer lugar, será relevante el estudio de las potenciales fuentes de dependencia espacial, contextualizado en el entorno del problema bajo estudio. Asimismo, será de particular interés estudiar la compatibilidad entre los resultados sobre la vinculación de variables con la adopción en el plano local, y lo que sugiere la literatura previa. En este sentido, la adopción debería estar asociada a la superficie promedio en forma positiva, de modo que un aumento en el tamaño de las explotaciones debería vincularse a una mayor adopción. En forma secundaria, también se estudia la condición de alquiler y los ingresos por ganadería, que deberían tener un impacto negativo (English *et al.*, 2000). A su vez, siguiendo lo mencionado por Lachman y López (2018), será de interés detectar si el cultivo de variantes difundidas (soja, maíz y trigo) es una variable relevante para explicar niveles de adopción diferentes.

Como variables de control se incorporan la proporción de productores cooperativos, ya que a partir de los resultados de la Feeney *et al.* (2012) esta variable podría ser relevante para explicar

¹⁷Donde 1 representa un vector de unos $\frac{1}{n \times 1}$, utilizado para expresar la sumatoria de todos los elementos de la matriz $S_r(W)$.

¹⁸Un desarrollo de estos puede encontrarse en Anselin (1988, cap. 6).

Tabla 3: Variables incorporadas al estudio

Variable	Nombre en modelo	Fuente	Definición
Adopción de AP	prm_prp	MoA	Promedio de utilización de AP por cada productor
Superficie	sup_med	MoA	Tamaño total promedio de las explotaciones de los productores
Alquila	alquila	MoA	Proporción de productores que alquila (ya sea parcial o totalmente) la superficie explotada
Soja, trigo o maíz	sojtrigmai	MoA	Proporción de productores que cultiva soja, trigo o maíz
Actividad ganadera	gan	MoA	Proporción de productores que tiene animales de ganado
Productor cooperativo	coop	MoA	Proporción de productores que pertenecen a un grupo de compra o cooperativa
Experiencia	exper	MoA	Años promedio de experiencia en el sector
Banco	banco	MoA	Proporción de productores que se encuentra bancarizado
Sistema de control	comput	MoA	Proporción de productores que utilizan como sistema para control del campo una alternativa computacional (<i>e.g.</i> , excel)
Conexión	conexin	ENACOM	Proporción de localidades del departamento que tienen cobertura 3G o 4G
Educación	educ	INDEC	Proporción de productores con estudios secundarios completos

diferencias en adopción. A su vez, las restricciones financieras no pueden ser incorporadas, pero a modo de proxy sí se incorpora la proporción de productores bancarizados¹⁹. El sistema de control es incluido como variable de control dada su utilización en el estudio de Banerjee *et al.* (2008). Lachman *et al.* (2021) señalan los problemas de infraestructura en su estudio, entre los cuales se menciona la falta de conectividad a internet. A partir de la base de ENACOM se incorpora una variable que refleja la conectividad del departamento en general; no obstante, esta variable es un proxy, ya que no necesariamente refleja la conectividad puntualmente en la localización de los establecimientos de los productores encuestados. A nivel de capacidad individual se incorporan dos variables adicionales. Siguiendo a Banerjee y Martin (2008) se tendrá en cuenta la experiencia en el sector, y, en línea con literatura ya citada (English *et al.*, 2000; Banerjee *et al.*, 2008; Banerjee y Martin, 2008; Akudugu *et al.*, 2012; Pandit *et al.*, 2012), se incluye la educación. Esta última variable en realidad también es una aproximación. La encuesta de MoA no tiene información de esta variable, por lo que se utilizó como variable de control la información del CNA 2018, de modo que en realidad es la educación de productores agropecuarios de otra muestra.

Hay limitaciones que se deben destacar. En primer lugar, problemas potenciales pueden encontrarse en el registro de los datos durante la realización de la encuesta. De este modo, errores de registro pueden llevar a conclusiones erradas. Por otra parte, también pueden encontrarse proble-

¹⁹La elección de esta variable como proxy se fundamenta en el trabajo de Khera *et al.* (2021) donde, en un contexto distinto, se la menciona como una medida de inclusión financiera.

mas en la naturaleza de la encuesta, dado que se realizaba por vía telefónica por una institución privada sin alcance totalmente nacional. Esto lleva a que la muestra sea limitada y que no se tengan observaciones para varios departamentos, a la vez que podría existir un sesgo de selección (dado el método de contacto). Por otra parte, los datos de conectividad y educación reflejan promedios a nivel departamento, de modo que son variables proxys, y pueden no ser fielmente representativas para los productores efectivamente observados en la encuesta de MoA.

3.3. Análisis exploratorio

A nivel regional, puede observarse cierta autocorrelación espacial positiva en la adopción de la agricultura de precisión a nivel departamento. Esto se puede observar en la Figura 7²⁰. Se verifica allí también la presencia de algunas unidades aisladas en términos de contigüidad. Para desarrollar el análisis posterior, esto no debe suceder. Una alternativa para resolver esta situación consiste en manualmente conectar las unidades, aunque esto debería tener un fundamento apropiado. Si bien varias unidades son vecinas de segundo orden, de modo que podrían conectarse, se optó por la alternativa más conservadora y se descartaron las unidades desconectadas del resto del sistema en un siguiente paso. Esto implicó un recorte de un 3,7 % de la base; en el Anexo A se especifican cuáles fueron estas unidades.

Para la detección de outliers, se procedió a un análisis de clusters utilizando un mapa LISA basado en I's de Moran locales (Anselin *et al.*, 1996)²¹. Para este ejercicio se utilizó una matriz de contigüidad de tipo reina. Mediante esta herramienta se detectan cuatro tipos de clusters, para un determinado nivel de significancia, según si el nivel de adopción en un departamento es alto o no, y si el de sus vecinos es alto o no. Así, se identifican clusters: Alto-Alto, Bajo-Bajo, Alto-Bajo y Bajo-Alto. Por ejemplo, un clúster Alto-Alto es un conjunto de departamentos tal que el nodo del clúster tiene un nivel de adopción elevado, al mismo tiempo que sus vecinos tienen un nivel alto (de allí, Alto-Alto). Los clusters de tipo Alto-Bajo y viceversa refieren a casos atípicos.

A los fines de este trabajo, los tests se realizaron con un nivel de significancia del 0,1 %. Los resultados de este ejercicio sugirieron la existencia de cuatro clusters, con nodos en: Patiño (Formosa), Santo Tomé (Corrientes), Rosario de Lerma (Salta) y Banda (Santiago del Estero), los cuales fueron removidos de la base de datos. Así, el número de departamentos remanentes es de 252.

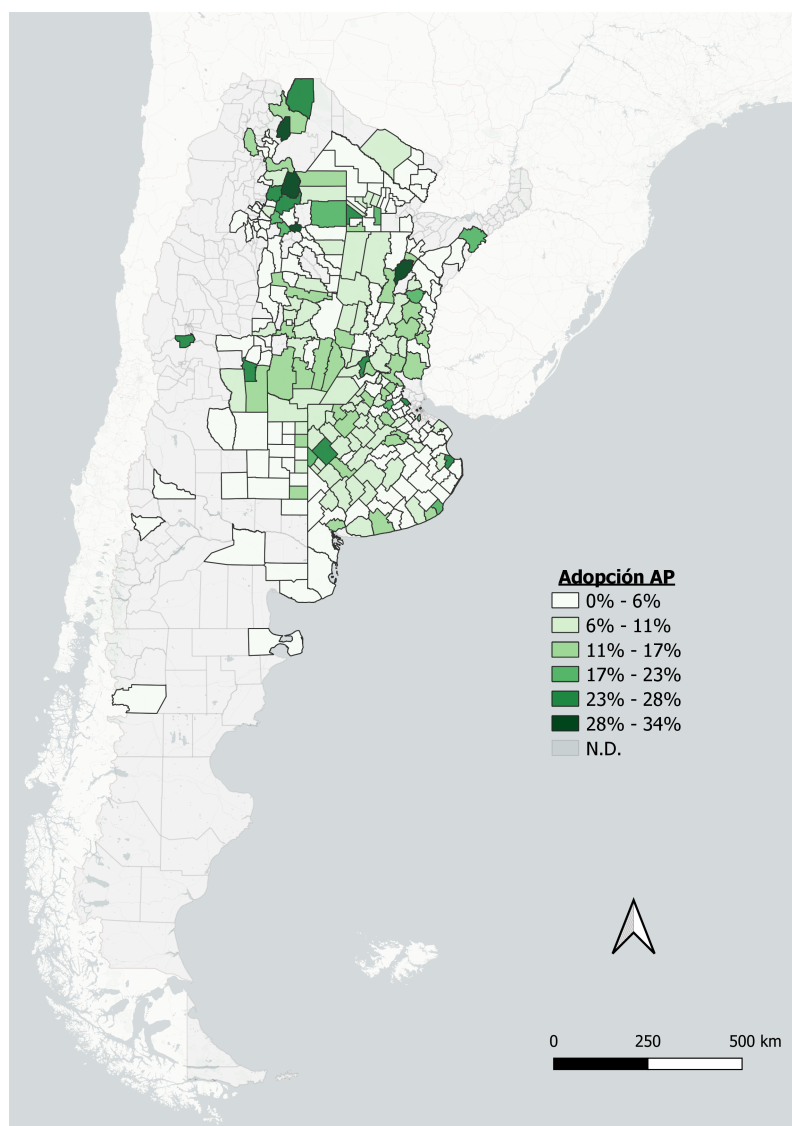
En base a esta última muestra, se presentan algunas estadísticas descriptivas. De los productores encuestados, un 12,4 % utilizó tecnologías de AP en alguna parte de su explotación. Si bien una proporción no menor de productores aplicaron estas tecnologías en la totalidad de su explotación, no fue el caso general. Consecuentemente, la cobertura promedio de estas tecnologías es de un 8,3 % de la superficie explotada por los productores.

El productor encuestado más pequeño tenía una explotación de 100 ha. Esta variable presenta una distribución asimétrica, lo cual se ve reflejado en que la mediana de la superficie es de 440 ha. y la media es de 923 ha. Por otra parte, un 84,4 % de los productores tenían entre sus cultivos alguna variedad de maíz, soja o trigo, y un 57 % realizaba actividades de ganadería.

²⁰Por cuestiones ilustrativas no se incluye parte de la provincia de Tierra del Fuego.

²¹En el Anexo B se encuentran precisiones adicionales sobre este procedimiento.

Figura 7: Mapa de adopción de AP en Argentina



Entre rasgos más asociados al perfil de los productores, un 59,1 % de ellos alquilaba por lo menos una porción de la explotación. A su vez, un 26,6 % pertenecía a un grupo de compra o cooperativa, y un 94 % se encontraba bancarizado. La experiencia promedio en el sector es de 31 años, lo cual refleja la extensa trayectoria de una parte importante de la muestra. Adicionalmente, se consultó por el principal sistema utilizado para el control del campo, donde un 43 % mencionó alguna alternativa computacional y un 53 % afirmó que su principal sistema de control era en papel²².

A nivel departamental, el comportamiento de estas variables es similar al encontrado a nivel productor. En este sentido, una limitación es la cantidad de observaciones por departamento. En promedio se tienen entre 22 y 23 observaciones por departamento; sin embargo, un 27 % de los departamentos cuenta con tres observaciones o menos. Este aspecto es una limitación que cabe señalarse dado que es más probable que la selección de productores de estos departamentos sea poco representativa del comportamiento generalizado allí.

²²Una porción de productores declaró no haber utilizado ninguna alternativa de control.

A su vez, en esta agregación se incorporan dos variables adicionales: la conectividad y la educación. En promedio, los departamentos tienen conexión a 3G o 4G en un 73 % de sus localidades. Además, 79 departamentos tienen conexión en todas sus localidades, mientras que uno no tiene en ninguna. Con respecto a la educación, se encuentra que el nivel de finalización secundario promedio es del 48 %. Los departamentos con menores niveles de educación promedio se encuentran en Santiago del Estero, donde la proporción de productores por departamento que terminó el secundario es baja, con un mínimo de 6,6 %. En el otro extremo, los departamentos con mayores niveles de educación son principalmente de Buenos Aires, donde el máximo es de 78,7 %.

Cabe destacar que estas últimas dos variables son de distintas fuentes y no reflejan datos a nivel establecimiento. Por ejemplo, podría no tenerse conexión en el establecimiento, a pesar de haber cobertura en otras localidades del departamento. Por eso, esta variable se define como el grado de cobertura dentro del departamento, ya que se considera que es la mejor aproximación (a mayor cobertura generalizada, más probable es que la haya donde se encuentran los productores encuestados)²³. Por otra parte, la educación proviene de una muestra de productores agropecuarios realizada por el INDEC, de modo que esta puede diferir de la educación de los productores observados en la encuesta de MoA (si los participantes de esta encuesta no son una muestra representativa de los productores del departamento).

Extendiendo el análisis anterior, en general las variables no están fuertemente correlacionadas a nivel individual con la adopción a nivel departamento. Esto resulta en línea con lo esperable dada la gran amplitud de factores señalados en el Capítulo 2 que determinan las decisiones de adopción a nivel establecimiento. En la Tabla 4 se presentan los coeficientes de correlación donde se observa que solo dos variables tienen un coeficiente estadísticamente significativo, utilizando un test de correlación al 1 % de significancia²⁴. Así, el cultivo de las variedades más difundidas y la actividad en ganadería además de tener coeficiente significativo, tienen una correlación con el signo esperado (positivo y negativo respectivamente).

Tabla 4: Correlación entre variables

Variable	Correlación empírica
Sojtrgm	0,284***
Coop	0,082
sup_med	0,079
Banco	0,066
Alquila	0,064
Conexin	0,021
expersq	0,019
compu	0,011
educ	-0,029
exper	-0,130**
gan	-0,279***

*** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$

²³Cabe recordar que no se dispone de la localización de los productores a nivel localidad, y por eso la aproximación se realiza a nivel departamento.

²⁴El test realizado es el sugerido por Bacchini *et al.* (2018, p. 205)).

4. Estimaciones y resultados

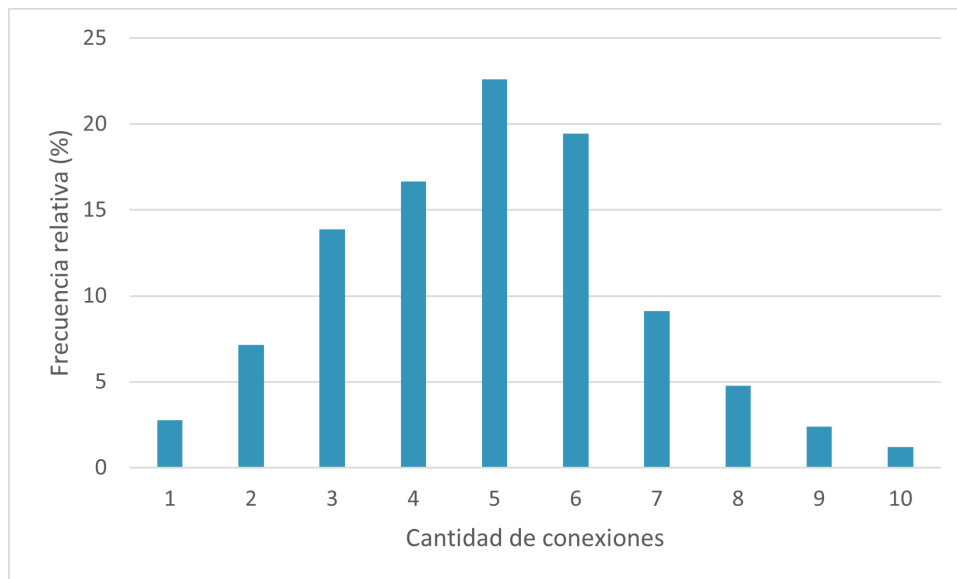
En la presente sección, en primer lugar se presentan los resultados de los ejercicios utilizando las especificaciones de base. En segundo lugar, también se incorporan resultados de controles de robustez.

4.1. Principales resultados

La matriz de contigüidad utilizada en el ejercicio es de tipo reina de primer orden y es estandarizada por filas. Si bien este tipo de matriz es estándar en la literatura, caben algunos comentarios. En primer lugar, se realizarán posteriormente controles de robustez usando criterios alternativos, donde la evidencia permanece estable. En segundo lugar, una alternativa para esta primera decisión podría ser utilizar una matriz de tipo torre. Esta variante es fuertemente similar a la aquí utilizada: la correlación entre el número de vecinos resultante de una matriz y otra es de 99.6 %, cambiando la cantidad de vecinos para tan solo 8 departamentos.

Dada la elección del criterio de reina, se puede observar que no hay departamentos que no tengan conexiones. A su vez, el número promedio de conexiones es de 4,9 y la mediana es de 5. En la Figura 8 se observa la distribución de la cardinalidad de vecinos. Allí se aprecia que tiene un comportamiento en línea con lo deseable por la disciplina (Anselin, 2017): no es fuertemente asimétrica y no es multimodal. Esto evita que haya demasiada heterogeneidad en la construcción del rezago espacial. Sobre esta matriz de contigüidad se trabajará inicialmente, aunque también se presentarán alternativas como control de robustez de los resultados obtenidos.

Figura 8: Frecuencia relativa del número de conexiones



El primer modelo se corresponde con una regresión tradicional por mínimos cuadrados ordinarios. Esta regresión asume implícitamente la ausencia de correlación espacial. Un 98 % de los valores predichos por el modelo se encuentran dentro del intervalo [0;1] lo cual sugiere la consistencia del método de estimación aquí utilizado (Friedman, 2012; Wooldridge, 2010, p. 545). El

signo de los parámetros estimados se encuentra, generalmente, dentro de los valores esperados. Estos resultados pueden observarse en la Columna 1 de la Tabla 5.

La superficie y que se cultiven soja, trigo o maíz son variables que se encuentran vinculadas positivamente y, adicionalmente, son estadísticamente significativas para pronosticar la adopción promedio en cada departamento. El indicador de conectividad utilizado y la integración al sistema financiero no resultan estadísticamente significativas, a pesar de que el signo encontrado aquí es el esperado. Por otra parte, las actividades en ganadería presentan una asociación negativa y estadísticamente significativa; lo mismo sucede con el alquiler de una porción del terreno donde se produce, aunque esta no es significativa. Finalmente, frente a la experiencia se observa una relación no lineal, pero esta tampoco es estadísticamente significativa ya que no se puede rechazar la hipótesis nula para un test de significatividad individual, ni para uno de significatividad conjunta para esta variable y su cuadrado.

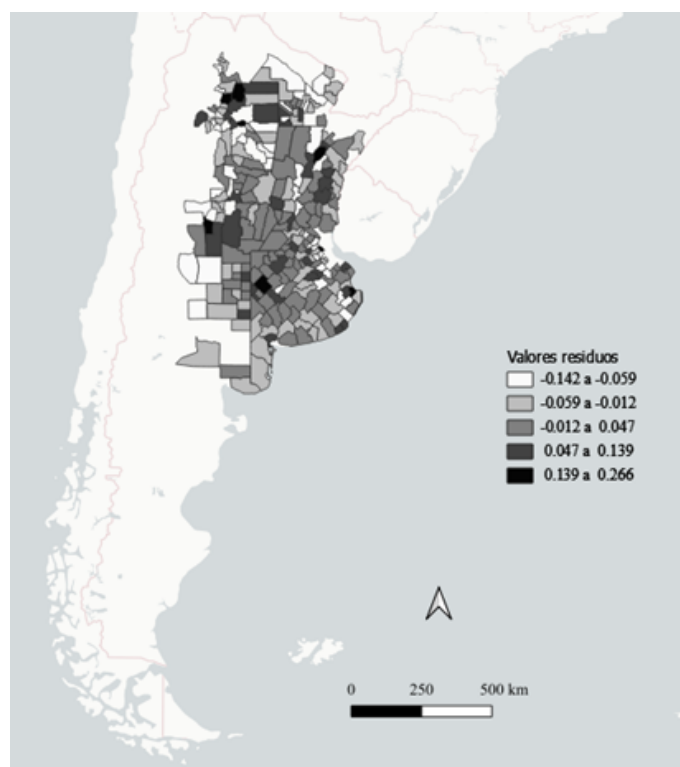
En contraposición, la pertenencia a cooperativas, la utilización de sistemas computacionales de control y la educación presentan signos contrarios a lo esperado, pero ninguna de estas es estadísticamente significativa para explicar los niveles de adopción. Respecto a esto, cabe destacar que la pertenencia a cooperativas no es un aspecto profundamente estudiado o destacado en la revisión bibliográfica realizada. Por otra parte, debe recordarse que la educación es una variable utilizada en forma auxiliar, como una variable de control, ya que es obtenida a partir de otra muestra. En ese mismo sentido, la conectividad presenta la misma debilidad de modo que tampoco sería recomendable extraer conclusiones anticipadas.

Los residuos de esta regresión son presentados en la Figura 9, la cual pareciera sugerir la presencia de efectos espaciales que deberían ser tenidos en cuenta en el modelo. Para analizar si corresponde incluir en la especificación estos efectos se realizaron una serie de tests. En primer lugar, se utilizó el test valiéndose de la I de Moran desde un enfoque de permutaciones (Anselin, 2020). En este test, la hipótesis nula se condice con la ausencia de autocorrelación espacial y un pseudo p-valor de 0,001. Si bien es una herramienta ampliamente utilizada y aporta evidencia a la hipótesis de la presencia de efectos espaciales, es un test que es sensible a otros problemas, como la presencia de heterocedasticidad o problemas de mala especificación (Anselin, 2017b).

A su vez, no resulta claro qué tipo de efectos espaciales deberían ser incluidos en el modelo. Por ello, se utilizan tests alternativos sugeridos por Elhorst (2014) que permiten distinguir si deben incluirse efectos endógenos o correlacionados. Los primeros dos tests a considerar son los propuestos por Anselin (1988), aquí denominados LM-Lag y LM-Error. La hipótesis nula en el primer test implicaría la ausencia de efectos endógenos, mientras que en el segundo esta refiere a la ausencia de efectos correlacionados.

Estos tests, no obstante, se pueden ver afectados por la presencia de otros tipos de efectos espaciales (*e.g.*, es posible rechazar la hipótesis nula del test LM-Lag ante la presencia de efectos correlacionados). Por ello, son utilizadas frecuentemente versiones robustas propuestas por Anselin *et al.* (1996), que aquí se denominarán RLM-Lag y RLM-Error. No obstante, Anselin (2005, p. 197) menciona que estas alternativas deberían utilizarse solo cuando el estadístico de los tests LM-Lag y LM-Error sean significativos, ya que las propiedades de los tests robustos dependen de esto.

Figura 9: Residuos de la regresión no espacial



Los resultados obtenidos al realizar estos tests sugieren la necesidad de incorporar rezagos espaciales de la variable dependiente, o efectos endógenos, de acuerdo con la taxonomía de Manski (1993). Esto es así porque el p-valor en el caso del test LM-Lag es de 0,03 mientras que en el test LM-Error es de 0,23. Esto sugiere que se debería estimar un modelo de lag espacial (SLM), cuyos resultados son incluidos en la Columna 2 de la Tabla 5. Allí se puede observar el signo positivo y la significatividad estadística del parámetro ρ , que refleja el efecto endógeno. Esto añade evidencia a la relevancia de los efectos contagio en la adopción de tecnologías en agricultura.

Complementariamente, puede observarse que las estimaciones puntuales de los parámetros del modelo que incorpora el rezago espacial son de menor magnitud (*e.g.*, la estimación puntual del parámetro que acompaña a la superficie es 0,015 en el primer modelo y 0,013 en el segundo). Esto, no obstante, no presenta una interpretación directa a modo definitivo ya que sería necesario incorporar el efecto indirecto, lo cual puede observarse en la Tabla 6, donde la significatividad estadística se obtuvo mediante un proceso de simulación (LeSage y Pace, 2009; Bivand *et al.*, 2021). En ellas se puede apreciar que, a la vez que el efecto directo es menor, el efecto medio total estimado de las variables es en realidad mayor que el obtenido mediante una regresión que no incorpora dependencia espacial.

No obstante, cabe señalar que el efecto total de una variable se debe al resultado de interacciones. Por ello, el efecto esperado total sobre la adopción no se asocia con una reacción inmediata, si no con el resultado final de largo plazo de interacciones entre agentes.

En conclusión, la evidencia aquí se encuentra, en primer lugar, en línea con lo que sugiere la literatura en otros países. Esta sugiere que la mayor escala conduce a una mayor adopción. En línea con un mayor beneficio a obtener por utilización de este tipo de tecnologías. Asimismo, la menor

Tabla 5: Resultados principales

	<i>Modelo clásico</i>	<i>SLM</i>
	(1)	(2)
sup_med	0,015*** (0,005)	0,013*** (0,005)
alquila	-0,003 (0,018)	-0,001 (0,017)
compu	-0,011 (0,016)	-0,011 (0,016)
sojtrgm	0,057*** (0,015)	0,047*** (0,015)
gan	-0,045** (0,017)	-0,041** (0,017)
coop	0,014 (0,020)	0,015 (0,019)
banco	0,021 (0,030)	0,021 (0,029)
exper	-0,001 (0,001)	-0,001 (0,001)
expersq	0,00000 (0,00000)	0,00000 (0,00000)
educ	-0,014 (0,031)	-0,013 (0,029)
conexin	0,014 (0,018)	0,015 (0,017)
Constante	-0,041 (0,055)	-0,042 (0,053)
ρ	- -	0,205** (0,081)
Observaciones	252	252
R ²	0,158	0,184

Nota: *p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01

Tabla 6: Desagregación de efectos

Variable	Efecto medio directo	Efecto medio indirecto	Efecto medio total
sup_med	0,014***	0,003	0,017***
Alquila	-0,001	0	-0,001
Compu	-0,011	-0,003	-0,014
Sojtrgm	0,048***	0,012*	0,06***
Gan	-0,041**	-0,01	-0,051**
Coop	0,015	0,004	0,019
Banco	0,021	0,005	0,027
Exper	-0,001	0	-0,001
expersq	0	0	0
educ	-0,015	-0,004	-0,019
conexin	0,015	0,004	0,018

Nota: *p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01

especialización se ve asociada con una menor adopción. Adicionalmente, en donde se realizan cultivos extensivos de gran difusión (soja, trigo y maíz) con mayor intensidad se observa una mayor adopción. Finalmente, y en línea con la literatura citada de adopción de otras tecnologías, se encontró evidencia de la relevancia de los derrames mediante la interacción entre unidades.

4.2. Controles de robustez

En el presente apartado se presentan controles de robustez por dos vías. En primer lugar, se expone la estabilidad de los resultados frente especificaciones alternativas del modelo. En segundo lugar, se realiza un ejercicio similar cambiando la elección de la matriz de pesos espaciales.

4.2.a. Omisión de controles irrelevantes

En los ejercicios presentados, se utiliza un gran número de variables, de las cuales pocas presentan un poder explicativo estadísticamente significativo sobre la adopción de tecnologías. Esto podría traer aparejadas inquietudes sobre la eficiencia del proceso de estimación. Dada la cantidad limitada de observaciones, se presentan aquí resultados omitiendo estas variables. Aquí se presenta la omisión de todas, pero el proceso de depuración del modelo fue gradual y no se obtuvieron resultados diferentes en estos casos. A su vez, cabe señalar que la experiencia se omite ya que ni esta, ni su cuadrado resultaron significativas ni a nivel individual, ni en conjunto.

En la Tabla 7 se puede observar nuevamente la estabilidad de los resultados. Las Columnas 1 y 2 ya fueron presentadas en la Tabla 5, pero se incluyen aquí para facilitar la comparación. En las Columnas 3 y 4 se añaden los resultados de la estimación de los modelos sin incluir las variables de control que no resultaron estadísticamente significativas.

En la Columna 3 se puede observar el resultado de la estimación del modelo sin incorporar efectos espaciales. Al realizar los tests de especificación, se obtienen resultados en línea con lo encontrado previamente. Hay evidencia de autocorrelación espacial y se deberían incorporar efectos espaciales endógenos. Más precisamente, la hipótesis nula del test LM-Error no se puede rechazar con un nivel de significancia menor al 20 %, mientras que la del test LM-Lag sí, con un p-valor de

2,5 %.

Tabla 7: Estimación omitiendo variables de control

Variable	Sin efectos	SLM	Sin efectos	SLM
	Original (1)	Original (2)	Alternativo (3)	Alternativo (4)
sup_med	0.015*** (0.005)	0.013*** (0.005)	0.016*** (0.005)	0.014*** (0.005)
sojtrgm	0.057*** (0.015)	0.048*** (0.015)	0.054*** (0.014)	0.046*** (0.014)
gan	-0.045** (0.017)	-0.041** (0.017)	-0.051*** (0.016)	-0.047*** (0.016)
Constante	-0.04 (0.055)	-0.042 (0.053)	-0.044 (0.036)	-0.042 (0.035)
ρ	-	0.205** (0.081)	-	0.206** (0.081)
Otros controles	Sí	Sí	No	No
Observaciones	252	252	252	252
R2	0.158	0.184	0.143	0.17

4.2.b. Alternativas para la matriz W

En el apartado anterior se mostraron los resultados de diversos ejercicios econométricos, donde se aportó evidencia en favor de la relevancia de la dependencia espacial. La estrategia sugirió la conveniencia de utilizar un modelo SLM. No obstante, todos los resultados se encuentran sujetos a la forma de la matriz W . En este trabajo, se utilizó la matriz más usual en la literatura (*i.e.*, tipo reina). A modo de control, a continuación, se presentan los resultados utilizando matrices de distancia alternativas.

Las alternativas que se escogieron fueron de k vecinos cercanos, donde se comprobaron los resultados para $k = \{4, 5\}$. Estas dos alternativas se probaron en su versión estándar, en la cual una unidad puede ser vecina de otra, sin ser esta una relación recíproca²⁵. A estas alternativas se las denotará como nn4 y nn5, respectivamente. A su vez, se introdujo la transformación simétrica de estas, aquí llamadas nn4_sim y nn5_sim. Los resultados de los tests espaciales se pueden observar en la Tabla 7.

Tabla 8: Tests con matrices de distancia alternativa

Test	nn4	nn4_sim	nn5	nn5_sim
LMerr	0,082	0,069	0,167	0,142
LMlag	0,009	0,004	0,017	0,016
RLMerr	0,014	0,005	0,006	0,019
RLMlag	0,002	0,000	0,001	0,003

En el caso de las matrices de 5 vecinos cercanos se deriva de los tests que se debería estimar un modelo SLM. Para los casos donde se utilizan matrices de 4 vecinos cercanos, se observa que

²⁵Una ilustración de esto se incluye en el Anexo C.

el p-valor del test LM-Error es superior a 0,05, de modo que la intuición dependería en mayor medida de qué nivel de significancia crítico se escogiera. De acuerdo a Anselin (2017c), en estos casos es sugerible utilizar los tests robustos y, en caso de ser necesario, elegir el de menor p-valor. Siguiendo esta línea, las distintas alternativas también conducen a la estimación de SLM.

Consecuentemente, se procedió a la estimación de los modelos SLM utilizando las distintas matrices de distancia propuestas. En la Tabla 9 se pueden ver estos resultados, donde en la Columna 1 se incorporan nuevamente los resultados de la Columna 2 de la Tabla 5 para facilitar la comparación. De esta tabla se puede observar la estabilidad de las estimaciones frente a cambios en la matriz de distancias utilizada.

Tabla 9: Modelos espaciales utilizando distintas matrices de distancia

	Reina (1)	nn4 (2)	nn4_sim (3)	nn5 (4)	nn5_sim (5)
sup_med	0,013*** (0,005)	0,013*** (0,005)	0,013*** (0,005)	0,014*** (0,005)	0,014*** (0,005)
alquila	-0,001 (0,017)	-0,001 (0,017)	-0,002 (0,017)	-0,001 (0,017)	-0,001 (0,017)
compu	-0,011 (0,016)	-0,008 (0,016)	-0,011 (0,016)	-0,01 (0,016)	-0,012 (0,016)
sojtrgm	0,048*** (0,015)	0,046*** (0,015)	0,045*** (0,015)	0,048*** (0,015)	0,047*** (0,015)
gan	-0,041** (0,017)	-0,042** (0,017)	-0,040** (0,017)	-0,043** (0,017)	-0,042** (0,017)
coop	0,015 (0,019)	0,012 (0,019)	0,012 (0,019)	0,012 (0,019)	0,013 (0,019)
banco	0,021 (0,029)	0,018 (0,029)	0,018 (0,029)	0,017 (0,029)	0,017 (0,029)
exper	-0,001 (0,001)	-0,001 (0,001)	-0,001 (0,001)	-0,001 (0,001)	-0,001 (0,001)
expersq	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
educ	-0,015 (0,029)	-0,015 (0,029)	-0,014 (0,029)	-0,015 (0,03)	-0,014 (0,029)
conexin	0,015 (0,017)	0,014 (0,017)	0,013 (0,017)	0,013 (0,017)	0,012 (0,017)
Constante	-0,042 (0,053)	-0,035 (0,053)	-0,035 (0,053)	-0,038 (0,053)	-0,038 (0,053)
ρ	0,205** (0,081)	0,223*** (0,081)	0,249*** (0,082)	0,231*** (0,089)	0,239*** (0,091)
Observaciones	252	252	252	252	252
R2	0,184	0,189	0,195	0,184	0,185

5. Conclusiones

Este trabajo estudió la adopción de la Agricultura de Precisión (AP) en Argentina. En primer lugar, se definió precisamente a la AP como un paradigma tecno-productivo en etapa de formación. La AP abarca un número amplio de tecnologías y comprende innovaciones de proceso y

de producto sobre bienes de base biológica. Asimismo, engloba tanto innovaciones incrementales como disruptivas.

El origen de la AP no es un evento discreto, pero generalmente se lo asocia con los finales de la década de 1980 en EE. UU. (Lowenberg-DeBoer, 2019). Sin embargo, su difusión comienza a ser notable en la década de 1990. A partir de aquí, la difusión de estas tecnologías se torna creciente y, adicionalmente, comienza a ganar terreno en varios países, entre ellos, Argentina.

Si bien la escasez e incompatibilidad de los datos dificultan un análisis de largo plazo y comparativo a escala internacional, emergen algunos aspectos destacables. EE. UU. es el país que lidera tanto en desarrollo como en adopción de estas tecnologías, y dentro de la región sudamericana, Argentina y Brasil serían los países donde se observa una mayor difusión (Lowenberg-DeBoer y Erickson, 2019).

Si bien creciente en el tiempo, y como se mencionó con liderazgo en la región latinoamericana, la difusión de estas tecnologías en Argentina se encuentra todavía acotada. En este contexto, el objetivo del presente trabajo es analizar los determinantes de la adopción de tecnologías de AP en el país. A nivel internacional existe ya una abundante literatura que intenta identificar dichos determinantes, la cual se construye sobre una tradición previa de estudios sobre adopción de tecnologías agropecuarias en general. Este trabajo replica algunos de los análisis presentes en dicha literatura, con la adición de un análisis espacial.

En forma resumida, se observa que la superficie del terreno y el hecho de que se cultiven soja, trigo o maíz son variables que se encuentran vinculadas positivamente a la adopción de AP en Argentina. Por otra parte, las actividades en ganadería presentan una asociación negativa. Estos resultados se encuentran en línea con la literatura, así como con algunas hipótesis previas. Así, a mayor tamaño de la explotación, podemos suponer que habrá mayor variabilidad de condiciones y características dentro del lote respectivo, lo cual aumenta el atractivo y los retornos potenciales de la adopción de tecnologías de AP. A su vez, los cultivos extensivos no sólo suelen ocupar extensiones mayores de terreno, sino que a su vez son producciones ya altamente tecnificadas en general, con lo cual resulta más factible esperar que la adopción de un nuevo paradigma sea más fluida. Finalmente, donde se encuentra una menor focalización en agricultura o mayor diversidad de actividades, puntualmente, donde se observa mayor injerencia de la ganadería, los niveles de especialización y, por ende, de adopción, son menores.

Por otra parte, no se observa una asociación positiva con otros factores que en trabajos previos fueron identificados como relevantes para la adopción de tecnologías de AP. Estos incluyen la inserción en el sistema financiero, el uso de dispositivos computacionales, el nivel educativo y los años de experiencia del productor y el acceso a Internet en el establecimiento. En paralelo, tampoco se encontró evidencia significativa en torno a otras variables identificadas en la literatura disponible como negativas para la adopción de AP, incluyendo la pertenencia a cooperativas o la situación de arrendatario de tierras (*vis a vis* propietario).

Por último, la explotación de herramientas de econometría espacial permitió generar evidencia adicional. Esta rama de la econometría contempla distintos tipos de relaciones entre unidades. En primera instancia, podría existir un patrón espacial en los residuos. A modo ilustrativo, se observaría un mayor nivel de adopción concentrado en una zona como consecuencia de variables

no observadas (*e.g.*, características propias del suelo o el clima). Pero también podrían observarse otro tipo de interacciones, donde lo que sucede en una unidad afecta (en valor esperado) a sus vecinas, de modo que, ante un aumento de la adopción en un determinado lugar, esto conduzca a aumentos similares en las áreas circundantes. Este tipo de dependencia sugiere la presencia de interacciones y es lo que Manski (1993) llama efectos espaciales endógenos.

El trabajo encuentra evidencia del segundo tipo de interacción, lo cual indica que ante un cambio que promueva la adopción de tecnologías de AP en una determinada localización geográfica, se esperaría que las unidades productivas más cercanas también eleven sus niveles de adopción. Esta interdependencia positiva entre unidades vecinas puede explicarse, por ejemplo, por el accionar de organizaciones como CREA, el Polo Tecnológico de Rosario y el INTA, que facilitan la vinculación y el flujo de información entre productores, así como entre productores y empresas (Lachman *et al.*, 2022).

Por último, cabe destacar que, si bien este trabajo aporta avances y evidencia novedosa utilizando enfoques e información no explorados previamente en la literatura, se trata apenas de un nuevo insumo dentro de una agenda de investigación amplia en torno a la difusión del emergente paradigma de AP. Esta agenda incluye el uso de nuevas fuentes de datos, en la medida en que estas emerjan, así como el examen más sistemático de los mecanismos subyacentes en las decisiones de adopción. En este sentido, se requiere asimismo complementar los estudios econométricos con otro tipo de investigaciones, como entrevistas o estudios de caso.

6. Bibliografía

- Akudugu, M. A., Guo, E., y Dadzie, S. K. (2012). Adoption of modern agricultural production technologies by farm households in Ghana: What factors influence their decisions. *UDSspace*.
- Angst, C. M., Agarwal, R., Sambamurthy, V., y Kelley, K. (2010). Social contagion and information technology diffusion: The adoption of electronic medical records in us hospitals. *Management Science*, 56(8), 1219–1241.
- Anselin, L. (1988). Model validation in spatial econometrics: a review and evaluation of alternative approaches. *International Regional Science Review*, 11(3), 279–316.
- Anselin, L. (2002). Under the hood issues in the specification and interpretation of spatial regression models. *Agricultural economics*, 27(3), 247–267.
- Anselin, L. (2005). Exploring spatial data with geodtm: a workbook. *Center for spatially integrated social science*.
- Anselin, L. (2017a). *Intro & review*. YouTube. Descargado de <https://www.youtube.com/watch?v=50kc3F0aE6Y&list=PLzREt6r1Nenkk7x197-CKPFZ0BuAOCRGT>
- Anselin, L. (2017b). *Spatial regression*. Slide show. Descargado de https://spatial.uchicago.edu/sites/spatial.uchicago.edu/files/10_specification_tests_2_slides.pdf
- Anselin, L. (2017c, May). *Specification tests 2*. YouTube. Descargado de <https://www.youtube.com/watch?v=8bmQhiKG6oc&list=PLzREt6r1Nenkk7x197-CKPFZ0BuAOCRGT&index=13>
- Anselin, L. (2020, Sep). *Global spatial autocorrelation (1)*. GeoDa. Descargado de https://geodacenter.github.io/workbook/5a_global_auto/lab5a.html#fnref2
- Anselin, L., Bera, A. K., Florax, R., y Yoon, M. J. (1996). Simple diagnostic tests for spatial dependence. *Regional science and urban economics*, 26(1), 77–104.
- Anselin, L., Gallo, J. L., y Jayet, H. (2008). Spatial panel econometrics. *The econometrics of panel data: Fundamentals and recent developments in theory and practice*, 625–660.
- Bacchini, R., Vázquez, L. V., Bianco, M. J., y García Fronti, J. (2018). Introducción a la probabilidad ya la estadística. *Buenos Aires: Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Buenos Aires*.
- Banerjee, S., y Martin, S. (2008, 02). A binary logit analysis of factors impacting adoption of genetically modified cotton. *AgBioForum*, 12.
- Banerjee, S., Martin, S. W., Roberts, R. K., Larkin, S. L., Larson, J. A., Paxton, K. W., ... Reeves, J. M. (2008). A binary logit estimation of factors affecting adoption of GPS guidance systems by cotton producers. *Journal of agricultural and applied economics*, 40(1), 345–355.

- Baumont, C., Ertur, C., y Le Gallo, J. (2003). Spatial convergence clubs and the european regional growth process, 1980–1995. *European regional growth*, 131–158.
- Beck, N., Gleditsch, K. S., y Beardsley, K. (2006). Space is more than geography: Using spatial econometrics in the study of political economy. *International studies quarterly*, 50(1), 27–44.
- Besley, T., y Case, A. (1993). Modeling technology adoption in developing countries. *The American economic review*, 83(2), 396–402.
- Bisang, R. (2017). Problemas actuales y perspectivas futuras de la producción y comercialización de granos. En (p. 143-159).
- Bisang, R., Anlló, G., y Campi, M. (2008). Una revolución (no tan) silenciosa. claves para repensar el agro en Argentina. *Desarrollo económico*, 165–207.
- Bivand, R., Millo, G., y Piras, G. (2021). A review of software for spatial econometrics in R. *Mathematics*, 9(11). Descargado de <https://www.mdpi.com/2227-7390/9/11/1276> doi: 10.3390/math9111276
- Bongiovanni, R. (2009). Econometría espacial aplicada a la agricultura de precisión. *Actualidad Económica*, 19(67).
- Bragachini, M., Méndez, A., Scaramuzza, F., y Progetti, F. (2004). *Historia y desarrollo de la agricultura de precisión en Argentina* (Inf. Téc.). INTA. Descargado 2021-09-09, de <http://www.ciacabrera.com.ar/docs/JORNADA%2021/5-Trabajo%20Bragachini.pdf>
- Bröring, S., Laibach, N., y Wustmans, M. (2020). Innovation types in the bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121939.
- Camerani, R., Corrocher, N., y Fontana, R. (2016). Drivers of diffusion of consumer products: empirical evidence from the digital audio player market. *Economics of Innovation and New Technology*, 25(7), 731–745.
- Carr, P., Carlson, G., Jacobsen, J., Nielsen, G., y Skogley, E. (1991). Farming soils, not fields: A strategy for increasing fertilizer profitability. *Journal of Production Agriculture*, 4(1), 57–61.
- Carraresi, L., Berg, S., y Bröring, S. (2018). Emerging value chains within the bioeconomy: Structural changes in the case of phosphate recovery. *Journal of Cleaner Production*, 183, 87–101.
- Comin, D. A., Dmitriev, M., y Rossi-Hansberg, E. (2012). *The spatial diffusion of technology* (Inf. Téc.). Cambridge: National Bureau of Economic Research.
- Dall’Erba, S., y Le Gallo, J. (2008). Regional convergence and the impact of european structural funds over 1989–1999: A spatial econometric analysis. *Papers in Regional Science*, 87(2), 219–244.

- David, P. A. (1969). *A contribution to the theory of diffusion*. Research Center in Economic Growth Stanford University.
- Diamond, J. M., y Ordunio, D. (1999). *Guns, germs, and steel*. Books on Tape.
- EIP-AGRI. (2015). *Eip-agri focus group: Precision farming* (Inf. Téc.). European Commission. Descargado 2021-09-09, de <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/default/files/eip-agri-focus-group-on-precision-farming-final-report-2015.pdf>
- Elhorst, J. P. (2014). *Spatial econometrics from cross-sectional data to spatial panels*. Springer.
- ENACOM. (2023). *Catálogo de datos*. Descargado 2022-11, de <https://datosabiertos.enacom.gob.ar/search/?category=Acceso%20a%20Internet&resource=ds>
- English, B. C., Roberts, R. K., y Larson, J. A. (2000). A logit analysis of precision farming technology adoption in Tennessee. *Knoxville: The University of Tennessee Agricultural Experiment Station, Department of Agricultural Economics*, 1–22.
- Feeney, R., Berardi, M., Bertossi, O., Steiger, C., Piazzardi, B., Colombo, M., y Preumayr, F. (2010). Encuesta sobre las necesidades del productor agropecuario argentino. *Rosario: Universidad Austral*.
- Feeney, R., Mac Clay, P., Piazzardi, B., Steiger, C., y Mandrile, J. (2012). Encuesta sobre las necesidades del productor agropecuario argentino. *Rosario: Universidad Austral*.
- Florax, R. J., Voortman, R. L., y Brouwer, J. (2002). Spatial dimensions of precision agriculture: a spatial econometric analysis of millet yield on sahelian coversands. *Agricultural Economics*, 27(3), 425–443.
- Friedman, J. (2012, Jul). *Whether to probit or to probe it: In defense of the linear probability model*. World Bank. Descargado de <https://blogs.worldbank.org/impac-tevaluations/whether-to-probit-or-to-probe-it-in-defense-of-the-linear-probability-model>
- Fudenberg, D., y Tirole, J. (1985). Preemption and rent equalization in the adoption of new technology. *The Review of Economic Studies*, 52(3), 383–401.
- Gebbers, R., y Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831.
- Grau, H. R., Gasparri, N. I., y Aide, T. M. (2005). Agriculture expansion and deforestation in seasonally dry forests of north-west argentina. *Environmental Conservation*, 32(2), 140–148.
- Griffin, T. W., y Lowenberg-DeBoer, J. (2005). Worldwide adoption and profitability of precision agriculture implications for brazil. *Revista de Política Agrícola*, 14(4), 20–37.

- Griffith, D. A. (1995). Some guidelines for specifying the geographic weights matrix contained in spatial statistical models. *Practical handbook of spatial statistics*.
- Griliches, Z. (1957). Hybrid corn: An exploration in the economics of technological change. *Econometrica, Journal of the Econometric Society*, 501–522.
- Herrera-Gómez, M. H. (2018). Fundamentos de econometría espacial aplicada. En *Una nueva econometría: Automatización, big data, econometría espacial y estructural* (pp. 107–155). Universidad Nacional del Sur.
- INDEC. (2020). *Censo nacional agropecuario 2018*. Descargado 2022-11, de <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-8-87>
- Ireland, N. J., y Stoneman, P. L. (1985). Order effects, perfect foresight and intertemporal price discrimination. *Recherches Économiques de Louvain/Louvain Economic Review*, 51(1), 7–20.
- Khera, P., Ng, S., Ogawa, S., y Sahay, R. (2021). Measuring digital financial inclusion in emerging market and developing economies: A new index. *IMF Working Paper*.
- Kmenta, J., y Klein, L. R. (1971). *Elements of econometrics* (Vol. 655). Macmillan New York.
- Lachman, J., Braude, H., Monzón, J., López, S., y Gómez-Roca, S. (2022). El agro 4.0:¿ cómo puede argentina transformarse en líder del nuevo paradigma tecnoproductivo? *Cuyonomics. Investigaciones en Economía Regional*, 6(10).
- Lachman, J., y López, A. (2018). Nuevas oportunidades y desafíos productivos en la Argentina: Resultados de la primera encuesta nacional a empresas de agricultura y ganadería de precisión. *IIEP-BAIRES, Serie Documentos de Trabajo*, 38.
- Lachman, J., López, A. F., Tinghitella, G., y Gómez Roca, S. (2021). Las agtech en argentina: desarrollo reciente, situación actual y perspectivas. *IIEP-BAIRES, Serie Documentos de Trabajo*, 57.
- Le Gallo, J., Ertur, C., y Baumont, C. (2003). A spatial econometric analysis of convergence across european regions, 1980–1995. *European regional growth*, 99–129.
- LeSage, J. P., y Pace, K. (2009). An introduction to spatial econometrics. *Revue d'économie industrielle*(123), 19–44.
- Lowenberg-DeBoer, J. (2019). The economics of precision agriculture. En *Precision agriculture for sustainability* (pp. 481–502). Burleigh Dodds Science Publishing.
- Lowenberg-DeBoer, J., y Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*.
- Manski, C. F. (1993). Identification of endogenous social effects: The reflection problem. *The review of economic studies*, 60(3), 531–542.

- Méndez, A., Vélez, J., Villarroel, D., y Scaramuzza, F. (2014). Evolución de la agricultura de precisión en Argentina en los últimos 15 años. *Red Agric. Precis*, 13(09).
- Ortega, R., Flores, L., INIA, C. Q., de Recursos Naturales, D., y Ambiente, M. (1999). Agricultura de precisión: Introducción al manejo sitio-específico. *Ministerio de Agricultura, Instituto de investigaciones agropecuarias. CRI Quilamapu.(Chile)*, 13–46.
- Pandit, M., Paudel, K. P., Mishra, A. K., y Segarra, E. (2012). *Adoption and nonadoption of precision farming technologies by cotton farmers* (Inf. Téc.). Seattle, Washington: Agricultural & Applied Economics Association.
- Paudel, K. P., Pandit, M., Mishra, A. K., y Segarra, E. (2011). *Why don't farmers adopt precision farming technologies in cotton production?* (Inf. Téc.). Pittsburgh, Pennsylvania: Agricultural & Applied Economics Association.
- Petry, J. F., Sebastião, S. A., Martins, E. G., y Barros, P. B. d. A. (2019, 10). Innovation and the diffusion of technology in agriculture in floodplains in the state of Amazonas. *Revista de Administração Contemporânea*, 23, 619 - 635. Descargado de http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-65552019000500619&nrm=iso
- Pierce, F. J., y Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Advances in agronomy*, 67, 1–85.
- Pierce, F. J., y Sadler, E. J. (1997). *The state of site-specific management for agriculture*. SSSA.
- Rao, K. U., y Kishore, V. (2010). A review of technology diffusion models with special reference to renewable energy technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 1070–1078.
- Rogers, E. M. (1962). Diffusion of innovations. *Free Press of Glencoe, NY*, 32, 891–937.
- Sarrias, M. (2020). *Notes on spatial econometrics* (Inf. Téc.). Mimeo. Descargado de <https://www.msarrias.com/uploads/3/7/7/8/37783629/spatialeconometrics.pdf>
- Scaramuzza, F., Vélez, J., y Villarroel, D. (2016). Adopción de agricultura de precisión en Argentina: Evolución en los principales segmentos. *Agricultura y Ganadería de precisión y agregado de valor en origen*.
- Schimmelpfennig, D. (2016). *Farm profits and adoption of precision agriculture* (Inf. Téc.). Descargado 2021-09-09, de <https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/80326/err-217.pdf?v=0>
- Schueller, J. K. (1991). In-field site-specific crop production. *ASAE*.
- Skreli, E., Kola, R., y Osmani, M. (2011). Factors determining collective action in Albanian agriculture: case of apple producers in Albania. *Albanian Journal of Agricultural Sciences*, 10(3), 35–41.

- Stoneman, P., y Battisti, G. (2010). The diffusion of new technology. En *Handbook of the economics of innovation* (Vol. 2, pp. 733–760). Elsevier.
- Sunding, D., y Zilberman, D. (2001, 12). The agricultural innovation process: Research and technology adoption in a changing agricultural sector. *Handbook of Agricultural Economics*, 1, 207-261. doi: 10.1016/S1574-0072(01)10007-1
- Tey, Y. S., y Brindal, M. (2012). Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications. *Precision agriculture*, 13(6), 713–730.
- Tilman, D. (1999). Global environmental impacts of agricultural expansion: the need for sustainable and efficient practices. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(11), 5995–6000.
- Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the detroit region. *Economic geography*, 46(sup1), 234–240.
- Triguero, A., Moreno-Mondéjar, L., y Davia, M. A. (2013). Drivers of different types of eco-innovation in european SMEs. *Ecological economics*, 92, 25–33.
- Van der Wal, T. (2019). *Why is adoption of precision ag so slow?* Descargado 2021-09-09, de <https://www.futurefarming.com/smart-farming/why-is-adoption-of-precision-ag-so-slow/>
- Villarroel, D. D., Scaramuzza, F. M., y Melchiori, R. J. (2020). *Estimación de la evolución en la adopción de componentes de agricultura de precisión de cara al inicio de una década de agricultura digitalizada* (Inf. Téc.). INTA. Descargado 2021-09-09, de <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/9513>
- Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric analysis of cross section and panel data*. MIT press.
- Yang, P., Liu, W., Shan, X., Li, P., Zhou, J., Lu, J., y Li, Y. (2008). Effects of training on acquisition of pest management knowledge and skills by small vegetable farmers. *Crop Protection*, 27(12), 1504–1510.

A. Anexo: Unidades aisladas

En total, se cuenta con información para 266 departamentos. Los departamentos que se deben excluir por encontrarse aislados son:

- Buenos Aires, Ezeiza
- Buenos Aires, Hurlingham
- Buenos Aires, Vicente López
- Chubut, Biedma
- Jujuy, Santa Bárbara
- Neuquén, Pehuenches
- Neuquén, Picunches
- Salta, General José de San Martín
- Salta, Orán
- San Juan, Sarmiento

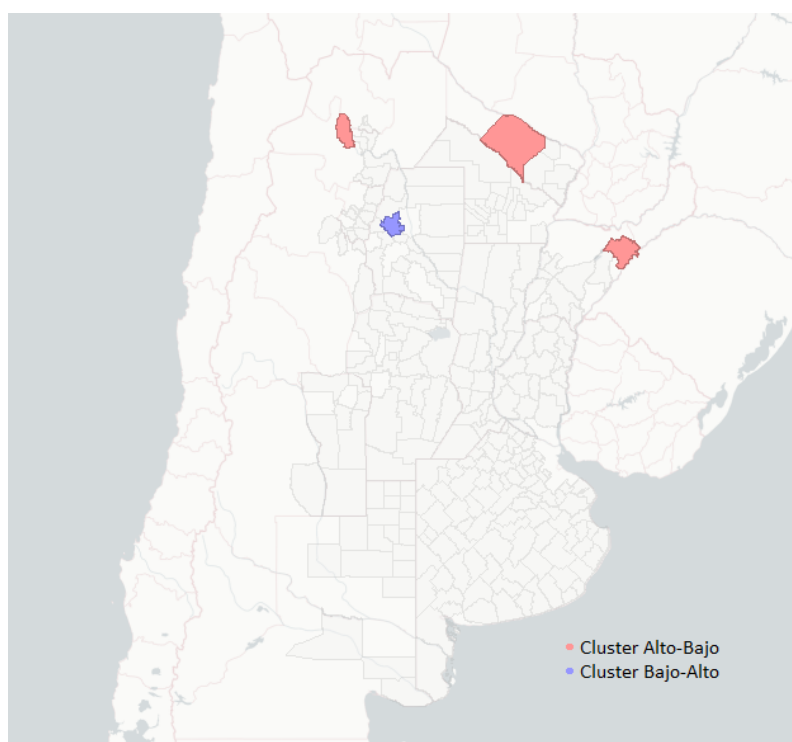
Este filtro implica un filtro de un 3,7 % de la muestra; de modo que finalmente se dispone de información de 256 departamentos, distribuidos entre las siguientes ocho provincias:

- Buenos Aires (96)
- Córdoba (23)
- Chaco (20)
- Santa Fe (19)
- Santiago del Estero (19)
- Entre Ríos (16)
- La Pampa (16)
- Corrientes (10)
- Tucumán (9)
- San Luis (7)
- Salta (6)
- Formosa (5)
- Catamarca (4)
- Río Negro (3)
- Jujuy (2)
- Mendoza (1)

B. Anexo: Mapa LISA

En la Figura 10 se presenta el Mapa LISA utilizado en la Subsección 3.3 para la detección de outliers. Se observa que los departamentos de Patiño (Formosa), Santo Tomé (Corrientes) y Rosario de Lerma (Salta) son nodos de clusters Alto-Bajo. Esto refleja que son departamentos con valores de adopción particularmente elevados, mientras que sus vecinos tienen valores bajos. Por otra parte, el departamento de Banda (Santiago del Estero) es el nodo de un cluster Bajo-Alto, lo cual se condice con la situación inversa.

Figura 10: Mapa LISA

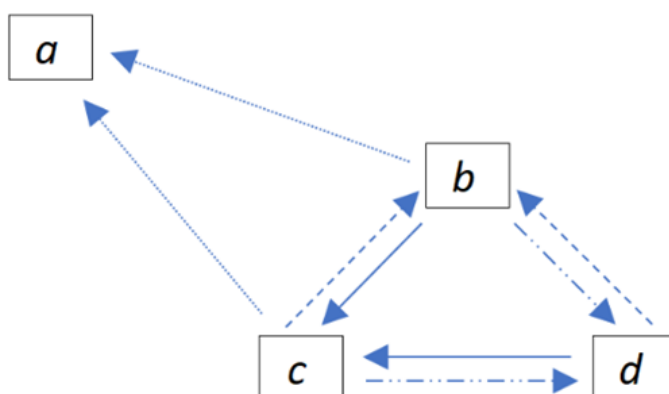


Este análisis es particularmente relevante dado el conjunto acotado de información utilizado. Por ejemplo, los departamentos de Santo Tomé y Rosario de Lerma tienen únicamente una unidad vecina con información disponible. Para estudiar el patrón completo sería conveniente tener información de todos sus departamentos vecinos para verificar si efectivamente se trata de unidades atípicas. En parte, esto motiva la elección de un nivel de significancia particularmente bajo en los tests (0,01 %).

C. Anexo: Ilustración de las relaciones de vecindad

Para comprender las relaciones de vecindad no necesariamente simétricas se presenta en la Figura 11 un ejemplo utilizando el criterio de dos vecinos más cercanos, donde cada unidad observacional se indica con una letra y las relaciones de vecindad de cada unidad se representan con una flecha con un tipo de guion diferenciado. En la figura se observa que b y c son vecinos de a (líneas de punteado fino), pero no es un vínculo recíproco, ya que los dos vecinos más cercanos de b son c y d (líneas en rayas), y los de c son b y d (líneas sólidas). Consecuentemente, a no es vecino de b ni c. Por otra parte, b y c son vecinos de d (líneas que intercalan rayas y punteado).

Figura 11: Relaciones de vecindad



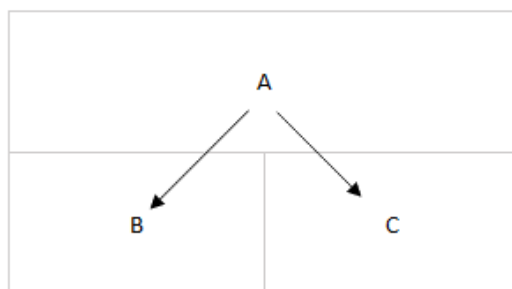
Es posible extrapolar este ejemplo a un criterio de otro número de cantidad de vecinos más cercanos, así como también a otros criterios como el de distancia donde se establece un umbral (*e.g.*, en kilómetros) a partir del cual una observación deja de considerarse vecina.

D. Anexo: Ilustración de efectos directos e indirectos

Este anexo pretende ilustrar claramente la diferencia entre efectos directos e indirectos en un modelo que incluye efectos endógenos y la diferencia con el modelo de regresión clásico. En un modelo clásico, el efecto directo equivale al total, ya que, si hay un cambio en una variable explicativa, esto afecta la unidad observacional en la que se da este efecto. Asimismo, el efecto directo equivale al valor del parámetro, ya que un shock no se esparce hacia unidades vecinas para luego volver a impactar en la unidad original.

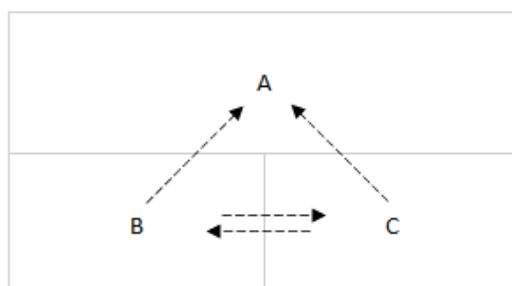
Para ejemplificar, tómesese un caso donde hay tres unidades: A, B y C, donde todas estas son vecinas. Un cambio en A, tenderá a generar un impacto en B y C. Esto se puede observar en la Figura 12. Cabe destacar que el efecto del derrame estará mediado por el parámetro de autocorrelación espacial (ρ), el cual es inferior a la unidad en el caso de este trabajo.

Figura 12: Primer derrame



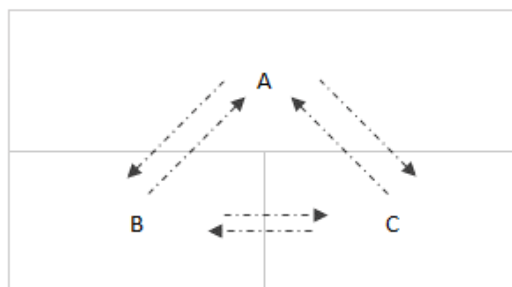
Al verse afectadas estas dos unidades, los cambios en A y B tendrán un impacto sobre el valor esperado en sus unidades vecinas, como ilustra la Figura 13. Es decir, en forma subsecuente habrá un impacto sobre el valor esperado de A, del mismo modo que esto también implica un impacto resultante de la interacción entre B y C. Estos derrames nuevamente se ven condicionados por el parámetro de autocorrelación espacial.

Figura 13: Segundo derrame



En una siguiente instancia, se ilustra en la Figura 14 las interacciones entre las distintas unidades del sistema. Aquí se puede ver cómo continúan interactuando las distintas unidades del sistema. Este proceso resultante continúa en forma iterativa.

Figura 14: Tercer derrame



Los efectos directos resultan de la acumulación de efectos sobre la misma unidad, mientras que los indirectos reflejan el impacto sobre el resto del sistema. La combinación de estos dos es el efecto total. No obstante, estos efectos no son homogéneos para todas las unidades.

El resultado de la heterogeneidad del impacto según en dónde se da un cambio en una variable también es intuitivo. Hágase una extensión al ejemplo anterior como si hubiera adicionalmente una unidad D, la cual estuviera aislada y no interactuara con ninguna otra unidad. Si hubiera un shock sobre la unidad D, este no se esparciría sobre otras unidades, ni tampoco habría un retorno sobre sí misma. Consecuentemente, el efecto de un shock en esta unidad será, en valor absoluto, de menor magnitud. Es por esto que, a modo de resumen, se toman los valores medios (efecto medio directo, efecto medio indirecto y efecto medio total).