

Título: Optimización de la Productividad Total de los Factores en el Sector Agrícola Argentino (1913-2020) mediante Machine Learning: Un Enfoque Innovador en la Estimación de Crecimiento

Introducción

Estimar la producción agropecuaria es uno de los mayores desafíos de los gobiernos. La razón de ello es que asegurar la provisión de alimentos a la población es un factor clave en temas de seguridad nacional. La producción de alimentos depende directamente del desarrollo de nuevas tecnologías e innovaciones que mejoren el índice de productividad total de los factores. **La productividad total de los factores (PTF)** es la relación (o diferencia) entre la producción y los factores agregados utilizados, o también el crecimiento en el producto que no es explicado por el crecimiento en los insumos, considerándosela como un residuo. Es decir, la PTF explica la variación no factorial¹ del crecimiento del producto agropecuario y por tanto hace que exista un gran debate sobre el impacto de las políticas, el cambio tecnológico, y otras cuestiones, sobre ella. Aunque la revisión de antecedentes ha sido extensa a nivel mundial, regional y nacional, son acotados los trabajos actualizados referentes a América Latina y el Caribe (ALC) y en especial en Argentina. Algunos trabajos enfocan el tema de PTF a nivel macroeconómico (Elías, 1992; Coremberg, 2008, 2009), mientras que otros tienen una visión más regional (Ludena, 2010; Trindade, 2012), y sectorial histórica (Ballesteros, 1957; Díaz Alejandro, 1975; Elías, 1992; Lema, 1999; Lence, 2010). En la revisión bibliográfica de estudios de PTF del sector agropecuario argentino en particular, se observó mucha heterogeneidad, no solo en los resultados de las estimaciones (a veces contrapuestos) sino también en la identificación de las potenciales causas de su variación a lo largo de los últimos 100 años. Entre ellos, los más importantes refieren a cambios tecnológicos, organizacionales e institucionales (**Error! Reference source not found.**). Existen estudios sobre la variación del producto, los factores y la PTF en perspectiva histórica realizados por Ballesteros (1957), Díaz Alejandro (1975), Cavallo y Mundlak (1982), y Elías (1992). Según ellos, luego de la II Guerra Mundial las políticas adoptadas por el gobierno afectaron negativamente a los precios relativos de los principales granos, a la contratación de la mano de obra, y por tanto al índice de producción agropecuaria; haciendo que solo una pequeña parte de los adelantos tecnológicos desarrollados en EE.UU en dicha época pudieran ser incorporados en el país. No es hasta los 60 que la tendencia se revierte, y se destaca que la creación del INTA (en 1956) si bien favoreció el cambio tecnológico y por tanto la producción y productividad, no fue hasta los 90 cuando acompañó más de cerca el proceso de adopción del uso de las tecnologías como los fertilizantes (Reca, 2006). Sin embargo, los controles de precios e impuestos aplicados al sector en forma recurrente, como también el elevado proteccionismo industrial a los sectores proveedores de insumos agropecuarios (como las empresas de fertilizantes), hicieron que la agricultura argentina crezca más lentamente entre 1940-72 (1.4%) que entre 1908-20 (1.8%). De hecho, Díaz Alejandro (1975) cita que tales políticas creaban una alta variabilidad en los precios relativos, afectando negativamente a las expectativas de crecimiento del productor. Existen otros trabajos que señalan vinculaciones entre la variación del producto agropecuario y las fuentes factoriales (tierra, trabajo y capital) y no factoriales (PTF) del crecimiento. Entre ellas se destaca que la modernización de las tecnologías (maquinaria, semillas, fertilizantes, y agroquímicos) y las nuevas formas de organización de la producción, facilitaron la expansión de la frontera agrícola y la mayor intensidad del uso de la tierra, favoreciendo la PTF (Coremberg, 2009, Lence, 2010).

Cuadro 1. Razones de la variación de la PTF del sector agropecuario de Argentina, según varios autores

Autor	Período	Causas
Ballesteros (1957)	1908-1954	Ambiente institucional interno y externo
Díaz Alejandro (1975)	1900-1960	Ambiente institucional interno y externo
Cavallo y Mundlak (1982)	1940-1972	Política impositiva y de precios
Fulginiti y Perrin (1990)	1940-1980	Intervención del Estado, carga impositiva, lento avance tecnológico

¹ Los factores refieren al uso de factores de la producción agropecuaria, que en este trabajo es tierra, capital y trabajo.

Elías (1992)	1950-1980	Políticas que promovieron la expansión del uso de la tierra, el capital, y la infraestructura
Lanteri (1994)	1950-1990	Productividad de la mano de obra y de la tierra, el uso de maquinaria y fertilizantes
Lema (1999)	1970-1997	Cambio tecnológico, calidad de insumos, y el capital humano
Parellada y Ekboir (2002)		Maquinaria agrícola (labranza cero)
Chudnovsky y López (2005)	1962-2000	Modernización tecnológica, capacidad de almacenaje, inversión, emprendedurismo, ambiente macroeconómico, liberalización del mercado y apertura económica, estabilidad institucional, infraestructura
Trigo y Cap (2006)	1990's-2000's	Introducción de semillas mejoradas genéticamente
Baharati y otros (2007)	1972-2002	Cambio técnico, investigación y desarrollo, factores institucionales
Coremberg (2008)	1990-2004	Uso y acumulación de factores, productividad de la mano de obra, organización de la producción, cambios cíclicos del uso de factores, redistribución intersectorial de factores, efectos de substitución
Coremberg (2009)	1990-2006	Productividad de la mano de obra, TIC's, recursos naturales, sector servicios, calidad de los factores productivos, tipo de cambio alto, precio de los granos básicos
Lence (2010)	1990's	Recursos naturales, políticas, adopción de nuevas tecnologías, expansión de la frontera agrícola, intensificación del uso de la tierra, nuevas formas de organización de la producción, apertura de mercado, tipo de cambio
Ludena (2010)	1960-2007	Cambio tecnológico
Dias Avila, Romano y Garagorry (2010)	1961-2001	Adopción de variedades, investigación agrícola, extensión rural, incremento de la escolaridad

Fuente: Elaboración propia en base a recopilación de antecedentes nacionales e internacionales

Durante el proceso de revisión bibliográfica, se identificó disparidad en los resultados alcanzados en la estimación de la PTF (**Error! Reference source not found.**). Por ejemplo, **Lence (2010) y Trindade (2012)** encontraron resultados contrapuestos respecto de la PTF para el agro argentino, dependiendo del método y la serie de tiempo utilizada. Se observa que algunos autores han utilizado funciones de producción (Lanteri, 1994; Artana, Cristini, y Pantano, 2001; Bravo-Ortega y Lederman, 2004), otros relaciones contables (Lema 1999; Dias Avila y Evenson, 2004), o la metodología de análisis de la envolvente de datos (Data Envelopment Analysis, DEA) (Coelli y Rao, 2005; Nin-Pratt y Yu, 2008), y de frontera estocástica (Bharati y Fulginiti, 2007). También existe divergencia en los datos utilizados en cada caso, algunos utilizan fuentes oficiales (Lema 1999; Artana, Cristini, y Pantano 2001; y Lanteri 1994), mientras que otros de FAO. La información comparada revela importantes diferencias en el crecimiento de la PTF: mientras algunos autores indican contracción otros indican un crecimiento, aun para el mismo período. Por ejemplo, Coelli y Rao (2005) indican una contracción del -2.7% entre 1980-2000, Arnade (1998) de -1.85% ente 1961-1993; Trueblood y Coggins (2003) de 2.63% entre 1961-91; y Fulginiti y Perrin (1998) de -4.8% entre 1961-1985. Por el contrario, se encontró que la PTF creció al 2.88% entre 1964-2003 (Nin-Pratt y Yu, 2008); al 1.94% entre 1964-92 (Lanteri, 1994), al 0.49% y 1.09% para las décadas del 60 y 70 (Elías, 1992). El mismo cuadro revela otras heterogeneidades adicionales en las estimaciones del crecimiento de la PTF de la agricultura argentina. Por ejemplo, las estimaciones de Nin-Pratt y Yu (2008) indican que la PTF creció lentamente al 1.97% entre 1963-1984, comparado con 2.88% entre 1964-2003. En contraste, utilizando los mismos datos de FAOSTAT, Dias Avila y Evenson (2004) encontraron una PTF mayor para 1981-2001 (de 2.35% anual) respecto a 1961-1980 (de 1.83% anual). En el caso de Coelli y Rao (2005) muestran que usando el índice de Tornqvist (en vez del Índice Malmquist) la estimación pasa de una contracción del -2.7% a un crecimiento del 0.4% por año. Un trabajo reciente e interesante es el presentado por Trindade (2012) quien señala para Argentina, por ejemplo, dos resultados de PTF opuestos utilizando diferentes metodologías: PTF positiva utilizando fronteras estocásticas y PTF negativa con el índice de Malmquist. El autor señala que las razones de ello refieren a cuestiones metodológicas: en el caso de fronteras estocásticas (método paramétrico) se permite más variabilidad, mientras que en índice de Malmquist (método no paramétrico) es más volátil, pues utiliza información de dos períodos consecutivos y por tanto es más factible de generar valores negativos cuando existen caídas de la PTF entre dos años seguidos. Este último método es más sensible a valores extremos en series de tiempo, razón por la que se utilizan índices acumulados y no los promedios anuales. Trindade señala que la PTF fue más influenciada por el cambio técnico (innovación) que por los cambios de eficiencia. En síntesis, la literatura indica que las estimaciones existentes en PTF para el sector agropecuario de Argentina son heterogéneas dependiendo de la serie temporal

analizada, los datos disponibles, las metodologías y los supuestos teóricos utilizados; y que, según los autores citados en el cuadro anterior, son numerosas las razones de su variación.

Cuadro 2 Resumen de estudios de la PTF del sector agropecuario de Argentina, según distintos autores

Fuente	Período	PTF (%)	Método	Fuente de Datos
Ballesteros (1957)	1940	1.3	Números Índices	Fuentes varias
	1952	-0.2		
Elías (1992)	1950-1980	0.44	Relaciones contables	Fuentes varias
Lema (1999)	1970-1997	1.55	Relaciones Contables. Serie de tiempo	SAGPyA
Arnade (1998)	1960-1993	-1.9	DEA	
Fulginiti y Perrin (1998)	1961-1985	-4.8	DEA	
Artana y otros (2001)	1981-1999	2.2	Función de producción. Serie de tiempo	SAGPyA, INDEC
Lema y Brescia (2001)	1970-1997	1.85	Relaciones contables. Serie de tiempo	SAGPyA
Nin, Arndt y Preckel (2003)	1961-1994	2.5	DEA	20 países
Trueblood y Coggins (2003)	1961-1991	-2.6	DEA	115 países
	1960-2000	1.8	Translog	FAOSTAT
Bravo-Ortega y Lederman (2004)	1961-2000	1.84	Estimación de la función de producción	
	1980-2000	-2.7	Índice de Malmquist y DEA	FAOSTAT
Coelli y Rao (2005)	1980-2000	0.4	Índice de Tornqvist y DEA	FAOSTAT
Alaudin y otros (2005)	1980-2000	-2.7	Índice de Malmquist y DEA	FAOSTAT
Lanteri (2004)	1955-2003	-0.94	Translog. Serie de tiempo	SAGPyA, FAOSTAT
Bharati y Fulginiti (2007)	1972-2002	2.15	Translog	FAOSTAT
Nin-Pratt y Yu (2008)	1964-2003	2.88	Índice de Malmquist y DEA	FAOSTAT
Ludeña (2010)	1961-2007	2.4	Índice de Malmquist y DEA	120 países
Días Avila y Evenson (2010)	1981-2001	2.35	Relaciones Contables. Serie de tiempo	FAOSTAT
Lema (2010)	1968-2008	2.43	Índice de Tornqvist. Solo sector agrícola	SAGPyA
Trindade (2012)	1969-2009	1.416	Ordinary Least Squares (OLS) (1)	FAOSTAT
		1.795	Fronteras estocásticas	
		-0.955	Índice de Malmquist	

Fuente: Elaboración propia con base a Lence, (2010) y Ludena (2010). Nota: (1) Mínimos Cuadrado Ordinarios

Sin embargo, en los últimos años, la aparición de nuevas tecnologías de captura de datos (drones, sensores, satélites, por citar algunos) sumado al desarrollo de herramientas de programación, machine learning e inteligencia artificial, abren una nueva oportunidad de investigación no solo en comprender la performance pasada de la PTF sino, además, de poder pronosticarla. Numerosos estudios a nivel internacional mencionan como a través de machine learning se puede pronosticar la productividad de cultivos, el clima, pero con mayor dificultad se trata la predicción de la TFP agregada. En Argentina, país con abundante tierras de diferente calidad y ubicadas en diferentes localizaciones geográficas, se vuelve necesario el uso de herramientas de Deep learning que permita predecir el potencial de producción de los principales granos, como así también de otros productos (carne, leche, frutas, hortalizas). Este aspecto es clave para incluso predecir movimientos de alimentos dentro del país para abastecer la demanda de polos urbanos, e inclusive poder estimar precios.

Revisión de la literatura

Ahearn, M. 1998. Agricultural productivity in the US Agricultural Information Bulletin # 740. USDA. Washington DC

Ahearn, M.; Yee, J.; Huffman, W. 2002. The Impact of Government Policies on Agricultural Productivity and Structure: Preliminary Results. American Agricultural Economics Association Meetings. Long Beach.

Alauddin, M., Headley, D., y Prasada Rao, D.S. 2005. Explaining Agricultural Productivity Levels and Growth: an International perspective. Centre for Efficiency and Productivity Analysis Working Paper N 02/2005. School of Economics, University of Queensland. Australia.

Alston, J.; Babcock, B.; Pardey, P. 2010. Introduction and overview. The shifting patterns of agricultural production and productivity worldwide. Iowa State University.

Alston, J.; Beddow, J.; Pardey, P. 2010. Global patterns of crop yields and other partial productivity measures and prices. Chapter 3. En The shifting patterns of agricultural production and productivity worldwide. Iowa State University.

- Alston, J.; Andersen, M.; James, J.; Pardey, P. 2010. Shifting patterns of agricultural production and productivity in the United States. Chapter 8. En *The shifting patterns of agricultural production and productivity worldwide*. Iowa State University.
- Alston, J.; Babcock, B.; Pardey, P. 2010. Shifting patterns of global agricultural productivity: synthesis and conclusion. Chapter 1. En *The shifting patterns of agricultural production and productivity worldwide*. Iowa State University.
- Centre for Efficiency and Productivity Analysis (CEPA). 2014. TFPIP Version 1. Computer Program for TFP Tornqvist and Fisher Index. Econometric Department, University of New England. Armidale. <http://www.uq.edu.au/economics/cepa/tfpip.htm>
- Chudnovsky, D., López, A. 2005. Productivity Performance in Developing Countries: Case Studies. Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO).
- Cobb, C. W.; Douglas, P. H. 1928. A Theory of Production. *American Economic Review* 18 (Supplement): 139–165.
- Coelli, T., Rao, D.S.P. 2005. Total factor productivity growth in agriculture: A Malmquist index analysis of 93 Countries, 1980-2000. *Agricultural Economics* 32, 115-134.
- Coremberg, A. 2007. Causas del crecimiento económico en Argentina (1990-2004). Otro caso de "tiranía de los números". Fundación BBVA. Buenos Aires.
- Coremberg, A. 2008. Measurement problems of TFP performance in an unstable economy: Argentina 1990-2004. A case of the tyranny of methodology. ECLAC. Buenos Aires.
- Coremberg, A. 2009. Midiendo las fuentes del crecimiento en una economía inestable: Argentina. Productividad y factores productivos por sector de actividad económica y por tipo de activo. CEPAL. Buenos Aires.
- Coremberg, A. 2011. The argentine productivity slowdown. The challenges after global financial collapse. *World Economics*, 2011, Vol. 12. N 3.
- FAO. 2024. Base de datos de FAOSTAT. <http://faostat.fao.org/default.aspx>
- Ferreres, O. J. 2010. Dos siglos de economía argentina: edición bicentenario. Fundación Norte y Sur. El Ateneo. Buenos Aires.
- Frank, R. 2014. Las bases de datos de Rodolfo Frank. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. http://www.anav.org.ar/sites_personales/5/, Buenos Aires.
- Fuglie, K. 2010 (a). Total factor productivity in the global agricultural economy: evidence from FAO data. Chapter 4. En *The shifting patterns of agricultural production and productivity worldwide*. Iowa State University.
- Fuglie, K. 2010 (b). Indonesia: from food security to market-led agricultural growth. Chapter 12. En *The shifting patterns of agricultural production and productivity worldwide*. Iowa State University.
- Fulginiti, L.; Perrin, R. 1990. Argentine agricultural policy in a multiple-input, multiple-output framework. American Agricultural Economics Association. American Agricultural Economics Association. Milwaukee.
- Fulginiti, L., Perrin, R. 1998. Agricultural productivity in developing countries. Agricultural Economics Department, University of Nebraska, Lincoln.
- Goldberg, S., Ianchilovici, B. 1988. El stock de capital en la Argentina. *Desarrollo Económico*, Vol. 28. Número 110. Instituto de Desarrollo Económico y Social. Buenos Aires.
- Hayami, Y.; Ruttan, V. 1985. Agricultural development: an international perspective. Johns Hopkins University Press. Baltimore.
- Hicks, J.R. 1961. Measurement of Capital in Relation to the Measurement of Other Economic Aggregates, in E.A. Lutz, D.C. Hague. *The Theory of Capital*. Macmillan. London.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). 1988 & 2002. Censo Nacional Agropecuario (CNA). Resultados Generales. Total del país. Buenos Aires.
- and the Caribbean. IDB Working Paper Series N 608. Inter-American Development Bank. Washington DC.
- Rada, N., Buccola, S., Fuglie, K. 2011. Government Policy and Agricultural Productivity in Indonesia. *The American Journal of Agricultural Economics* 93 (3). Oxford University Press, 867-884.
- Rada, N., Valdes, C. 2012. Policy, Technology, and Efficiency of Brazilian Agriculture. Economic Research Report Number 137. USDA-ERS. Washington, DC.
- Liakos, K.; Busato, P.; Moshou, D.; Pearson, S.; Bochtis, D. Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors* 2018, 18, 2674. [CrossRef] [PubMed]

Darwin, B.; Dharmaraj, P.; Prince, S.; Popescu, D.E.; Hemanth, D.J. Recognition of Bloom/Yield in Crop Images Using Deep Learning Models for Smart Agriculture: A Review. *Agronomy* 2021, 11, 646. [CrossRef]

Dias, P.A.; Tabb, A.; Medeiros, H. Apple flower detection using deep convolutional networks. *Comput. Ind.* 2018, 99, 17–28. [CrossRef]

Pereira, T.D.; Aldarondo, D.E.; Willmore, L.; Kislin, M.; Wang, S.S.-H.; Murthy, M.; Shaevitz, J.W. Fast animal pose estimation using deep neural networks. *Nat. Methods* 2018, 16, 117–125. [CrossRef] [PubMed]

Wang, J.; Mendelsohn, R.; Dinar, A.; Huang, J. How chinese farmers change crop choice to adapt to climate change. *Clim. Chang. Econ.* 2010, 1, 167–185. [CrossRef]

Huang, Z.; Liang, Q. Agricultural organizations and the role of farmer cooperatives in China since 1978: Past and future. *China Agric. Econ. Rev.* 2018, 10, 48–64. [CrossRef]

Zarifneshat, S.; Rohani, A.; Ghassemzadeh, H.R.; Sadeghi, M.; Ahmadi, E.; Zarifneshat, M. Predictions of apple bruise volume using artificial neural network. *Comput. Electron. Agric.* 2012, 82, 75–86. [CrossRef]

Zhao, R.; Li, Y.; Ma, M. Mapping Paddy Rice with Satellite Remote Sensing: A Review. *Sustainability* 2021, 13, 503. [CrossRef]

Murat, Y.S.; Ceylan, H. Use of artificial neural networks for transport energy demand modeling. *Energy Policy* 2006, 34, 3165–3172. [CrossRef]

Li, W.; Yang, M.; Wang, J.; Wang, Z.; Fan, Z.; Kang, F.; Wang, Y.; Luo, Y.; Kuang, D.; Chen, Z.; et al. Agronomic Responses of Major Fruit Crops to Fertilization in China: A Meta-Analysis. *Agronomy* 2020, 10, 15. [CrossRef]

Cherian, R.P.; Smith, L.N.; Midha, P.S. A neural network approach for selection of powder metallurgy materials and process parameters. *Artif. Intell. Eng.* 2000, 14, 39–44. [CrossRef]

Smith, L.N.; German, R.M.; Smith, M.L. A neural network approach for solution of the inverse problem for selection of powder metallurgy materials. *J. Mater. Process. Technol.* 2002, 120, 419–425. [CrossRef]

Sanzogni, L.; Kerr, D. Milk production estimates using feed forward artificial neural networks. *Comput. Electron. Agric.* 2001, 32, 21–30. [CrossRef]

Korosec, M.; Balic, J.; Kopac, J. Neural network based manufacturability evaluation of free form machining. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2005, 45, 13–20. [CrossRef]

Hu, R.; Yang, Z.; Kelly, P.; Huang, J. Agricultural extension system reform and agent time allocation in China. *China Econ. Rev.* 2009, 20, 303–315. [CrossRef]

Agrawal, D.; Schorling, C. Market share forecasting: An empirical comparison of artificial neural networks and multinomial logit model. *J. Retail.* 1996, 72, 383–407. [CrossRef]

Co, H.C.; Boosarawongse, R. Forecasting Thailand's rice export: Statistical techniques vs. artificial neural networks. *Comput. Ind. Eng.* 2007, 53, 610–627. [CrossRef]

Ali, A.; Imran, M.M. Evaluating the potential of red edge position (R.E.P.) of hyperspectral remote sensing data for real time estimation of LAI & chlorophyll content of kinnow mandarin (*Citrus reticulata*) fruit orchards. *Sci. Hortic.* 2020, 267, 109326. [CrossRef]

Vakil-Baghmisheh, M.-T.; Pavešić, N. A Fast Simplified Fuzzy ARTMAP Network. *Neural Process. Lett.* 2003, 17, 273–316. [CrossRef]

Friis, C.; Nielsen, J.Ø. Small-scale land acquisitions, large-scale implications: Exploring the case of Chinese banana investments in Northern Laos. *Land Use Policy* 2016, 57, 117–129. [CrossRef]

Viani, F.; Bertolli, M.; Salucci, M.; Polo, A. Low-Cost Wireless Monitoring and Decision Support for Water Saving in Agriculture. *IEEE Sens. J.* 2017, 17, 4299–4309. [CrossRef]

McIntosh, R.B.; Casada, M.E. Fringing Field Capacitance Sensor for Measuring the Moisture Content of Agricultural Commodities. *IEEE Sens. J.* 2008, 8, 240–247. [CrossRef]

Ochiai, H.; Ishizuka, H.; Kawakami, Y.; Esaki, H. A DTN-Based Sensor Data Gathering for Agricultural Applications. *IEEE Sens. J.* 2011, 11, 2861–2868. [CrossRef]

Kone, C.T.; Hafid, A.; Boushaba, M. Performance Management of IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Network for Precision Agriculture.

Datos

En esta propuesta de estudio se trabajará únicamente sobre la estimación de la PTF del sector agropecuario agregado. Para ello se tomaron en cuenta las siguientes variables: producto agregado (Y), y los insumos tierra (T), capital (K) y trabajo (L). La serie de tiempo sobre la que se tiene datos es de 1913 a 2020.

Datos y sus empalmes. Para el caso de Argentina, para construir las series de tiempo de cantidades y precios de cada una de las variables se recopilaron datos de fuentes primarias y secundarias, como así también se realizaron estimaciones a partir de coeficientes técnicos en el caso que no existiera información primaria. Adicionalmente, se realizaron otros ajustes para expresar las cantidades en unidades homogéneas Cuadro 3:

Cuadro 3 Descripción del producto, factores y precios utilizados en el estudio

	Producto	Tierra	Trabajo	Capital
Cantidad	Suma del PBI agrícola y ganadero (pesos de 1993)	Superficie cultivada, en hectáreas	Trabajo agropecuario total	Stock de capital agropecuario
Precio	Pesos de 1993	Pesos de 1993 por hectárea	Salario rural real	Tasa de retorno del capital estimado con base a la metodología de Fulginiti y Perrin (1990)

Fuente: Elaboración propia. Nota: (1) Todos los precios utilizados fueron deflactados con el Índice de Precios Mayorista Nivel General del INDEC base 1993 (Ferrerres, 2010), y se expresan en pesos constantes de 1993. (2) No se considera el trabajo informal. (3) Se consideró la superficie de praderas y pastizales en hectáreas para el caso de la ganadería.

Producción Agropecuaria (Y): La producción agropecuaria es la suma del PBI agrícola y ganadero solamente, expresado en pesos constantes de 1993. La serie abarca desde 1913 al 2020 y se construyó del siguiente modo: a) De 1913 a 2008 se tomó de Ferrerres (2010) la serie de cuentas nacionales expresada en millones de pesos de 1993. La apertura seleccionada fue: “Agricultura, Ganadería, Caza y Silvicultura”, subdividida luego en cultivos agrícolas (sector agrícola) y cría de animales (sector ganadero). La sección Caza y Silvicultura no se consideró, para restringir el estudio solo a los sectores agrícola y ganadero; b) De 2009 a 2010 se tomó las series de cuentas nacionales de MECON para el sector agrícola y ganadero., y c) Del 2011 al 2020 se calculó la tasa de crecimiento anual del PBI Agrícola más Ganadero publicado por INDEC y dicha tasa se aplicó al valor del PBI del año 2010, y así sucesivamente sobre cada valor hasta completar la serie al 2020. El empalme de ambas series se realizó aplicando las tasas de cambio de los datos de MECON en la serie de Ferrerres (2010).

Tierra Agropecuaria: Se utilizó el valor de la superficie cultivada expresada en pesos de 1993 para la serie 1913-2020. Esta se construyó a partir de la **superficie cultivada expresada en hectáreas**, para la misma serie de tiempo. Es importante mencionar que en este caso se tomó en cuenta sólo la superficie cultivada y no la superficie en pastizales, ya que esta última no se encuentra disponible para la serie de tiempo utilizada (FAO publica esta información para el período 1961-2020, y sin mayor variación significativa entre años). De este modo, se decidió trabajar con la superficie cultivada como aproximación de superficie para el sector agropecuario agregado, capturando los cambios de tendencia más importantes que provienen especialmente del área agrícola. Los empalmes realizados fueron los siguientes: a) De 1913 a 1984 se utilizó la serie de superficie cultivada (en hectáreas) provista por IEERAL (1986); b) De 1985 a 2015 se calculó la tasa de cambio de superficie cultivada (en hectáreas) de la base de datos de Frank (2014)² y se aplicó a partir de la última cifra de superficie otorgado por Cavallo en 1984 (última cifra de la serie de Cavallo 1913-1984); y c) De 2016 a 2020 se calculó la tasa de cambio de superficie cultivada (en hectáreas) de la base de datos de MAGYP³, y dicha tasa se aplicó a la última cifra de la serie anterior.

² Base de datos de Rodolfo Frank (2014), http://www.anav.org.ar/sites_personales/5/.

³ INDEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina

Precio de la Tierra: A la superficie cultivada se la multiplicó por el precio de la tierra por hectárea y en pesos constantes de 1993. La serie de precios del período 1913-2020 se construyó realizando los siguientes empalmes: a) De 1913 a 1915 se tomó un índice de precios de la tierra de Cortes Conde (1979), los cuales se deflactaron y transformaron a precios constantes de 1993; b) De 1916 a 1978, se tomó el promedio simple de precios por hectárea de la zona triguera, maicera, de cría e invernada de Ras y Levis (1982), los cuales fueron deflactados a pesos constantes de 1993; y c) De 1977 a 2020 se tomaron los precios mensuales corrientes por hectárea de trigo, maíz, cría e invernada de la base de datos de la Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA, 2014, 2020), sobre el que se calculó un promedio simple que fue deflactado a pesos constantes mensuales de 1993 (con base a la serie de IPIM de INDEC multiplicado por 1.000.000.000). Luego se calcularon los promedios anuales con base al mes de junio de cada año. Aquí se tuvo que realizar un análisis adicional que no se presenta en este informe, dado que con la crisis económico-política del 2001, la tierra agrícola fue depositaria de valor por no encontrar los inversores otras mejores alternativas, y el precio se incrementó exponencialmente, no reflejando el valor real, sino más bien un valor como resultado de falta de oportunidades de inversión del sector financiero.

Trabajo Agropecuario: El trabajo agropecuario es el número de trabajadores por año en el sector agropecuario, para el período 1913 al 2020, construido con base a los siguientes empalmes: a) De 1913 a 1984 se utilizó la serie de número de trabajadores por año de IEERAL (1986); b) De 1985 a 2020 se usó la serie de población rural económicamente activa calculada por CEPAL para el período 1980-2020 y ajustada por el nivel de desempleo general. El **salario** utilizado es el valor de la retribución promedio para el sector rural expresado en pesos de 1993, desde 1913 a 2020, construido a partir de las siguientes fuentes de datos: a) De 1913 a 1976 se tomó el salario rural de IEERAL (1986); y de 1977 a 2020 se tomó el salario rural de la base de datos de AACREA (2022).

Capital Agropecuario: El valor del capital para el sector agropecuario se expresa en millones de pesos constantes de 1993, y la serie se extiende desde 1913 a 2020. Para su construcción se usaron las siguientes fuentes de datos: a) De 1913 a 1984 se tomó la serie de capital agropecuario de IEERAL (1986); b) De 1985 a 1990 se realizó una regresión que tomó para el período 1970-1985 como variable dependiente el capital de IEERAL (1986), y el stock de maquinaria agropecuaria y construcciones agropecuarias de Goldberg y Ianchilovici (1988), más una serie de stock de ganado vacuno de Ferreres (2010). Luego se calcularon los valores predichos de dicha regresión para el período 1985-1990. Se utilizó la tasa de cambio anual de esa serie para ajustar el stock de capital partiendo del año 1984 hasta 1990; y c) De 1990 a 2010 se empalmó la serie 1900-1990 utilizando los valores de stock de capital agropecuario sin considerar el factor tierra de Coremberg (2009) y Coremberg (2011)⁴. De 2011 a 2020 se utilizó la variable stock de capital de FAO para estimar la tasa de cambio anual, y esta tasa se aplicó a la última cifra de capital del empalme anterior.

Precio del Capital y Tasa de Retorno. El **precio del capital** se calculó siguiendo la metodología de Fulginiti y Perrin (1990). En ella se estima la tasa de retorno del capital a partir de datos del valor agregado y su descomposición factorial, y se obtiene la tasa de retorno que se aplicó sobre el valor del stock de capital y de tierra para obtener respectivamente el flujo de remuneración de ambos factores. El cálculo se realizó con base a la siguiente fórmula:

$$VA = w * L + r * K + r * T \quad | \quad VA = w * L + r * (K + T) \quad | \quad (VA - w * L) / (K + T) = r \quad (6)$$

Siendo: *VA*: Valor Agregado, *L*: Trabajo, *K*: Capital, *T*: Tierra, *w*: salario, y *r*: tasa de retorno del capital.

Precios. Los precios se expresan todos en pesos constantes de 1993, y fueron deflactados con el Índice de Precios Mayorista Nivel General. Se utilizó el índice de precio mayorista de INDEC publicado por Ferreres (2010) para los precios anuales, y el índice de precio mayorista de Frank (2014) para los precios mensuales. Todos los valores son expresados anualmente. Se tomó como base el año 1993 = 100, dado que en este análisis histórico se utilizaron las series de cuentas nacionales publicadas por Ferreres (2010), las cuales corresponden a las series del Ministerio de Economía y Finanzas Públicas (MECON). De este modo, toda la

⁴ No se consideró el factor Tierra, dado que en este estudio se lo utiliza como factor independiente en el cálculo de las fuentes de crecimiento del producto.

información obtenida y estimada se presenta en pesos constantes de 1993 para poder realizar los empalmes correctamente. En el caso de la determinación del precio de la tierra y el capital, fue necesario realizar análisis adicionales que se detallan en las respectivas subsecciones siguientes. Es importante mencionar que en enero de 2007 el INDEC fue intervenido por el Estado, y modificó las estimaciones de precios e inflación. De este modo, los resultados obtenidos en este trabajo deberán tener en cuenta este aspecto.

Índice de Tornqvist. Una vez contruidos los empalmes hasta el 2020 del producto agregado, los factores tierra, capital y trabajo, el salario y la tasa de retorno de capital que se aplicó como precio del capital y de la tierra, y para el caso del precio del producto se colocó 1, se estimaron promedios de 3 años. Con estos promedios de tres años, se utilizó el “**software de CEPA**” para calcular los índices del producto, los factores y la TFP. A los índices que arroja el software CEPA se lo multiplica por 100, y esta cifra se utiliza en las regresiones que se realizaron inicialmente con Stata.

Regresiones. Se utilizó STATA para correr las regresiones y así poder estimar las tasas de crecimiento del producto, los factores y la productividad total de los factores.

Metodología

La Productividad Total de los Factores (PTF) es la relación (o diferencia) entre la producción agregada y los insumos agregados utilizados. Entre los primeros antecedentes se encuentran los **estudios de Cobb and Douglas (1928)**, en donde definen a la función de producción con dos insumos (capital y trabajo). La función es: $Y = A * L^{\beta} * K^{\alpha}$ donde Y es el producto, K es el stock de capital, L es el trabajo, A representa la PTF, y α y β son la elasticidad producto del capital y el trabajo, es decir miden el cambio en el producto ante variaciones de estos factores. En este trabajo, al tenerse en cuenta una serie larga de tiempo de 120 años y variables agregadas de precios y cantidades, se decidió estimar la PTF a través del número **índice de Tornqvist**. Este índice captura la variación de precios y de cantidades que se produce por el cambio en la composición de insumos y productos en las actividades. Este efecto de cambio estructural es característico de la producción agropecuaria y especialmente en series largas de tiempo, pues la decisión por parte de los productores de que producir y que recursos asignar está estrechamente vinculada a la relación de precios esperados de cada año en particular. En este trabajo, se analizó la evolución del producto, el uso de factores y la PTF para el período 1913-2020 del el sector agropecuario. Se estimó el Índice de Tornqvist sobre los promedios móviles de tres años de las variables antes mencionadas. Para ello se utilizó el software “TFP Version 1 Index Program⁵”. La estimación de la PTF a partir del Índice de Tornqvist no transitivo y acumulado, y se realiza a partir del siguiente cálculo:

$$\ln PTF_{st} = \ln \text{Índice Producto}_{st} - \ln \text{Índice Insumo}_{st} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [w_{is} + w_{it}] [\ln y_{it} - \ln y_{is}] - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k [v_{js} + v_{jt}] [\ln x_{jt} - \ln x_{js}] \quad (2)$$

Siendo: s y t: dos períodos diferentes de tiempo, y: el vector producto, w: los ponderadores de productos en cada período, x: el vector de insumos o factores, v: los ponderadores de los insumos parciales, i y j: commodities y j insumos.

Adicionalmente a los métodos, existen otras cuestiones a tener en cuenta desde el punto de vista del tratamiento de los datos y la interpretación de resultados. Por ejemplo, cuando se desea estimar la PTF en series largas de tiempo, uno de los principales problemas está relacionado a la falta de datos y/o a la calidad de los mismos; por lo que se utilizan otros métodos diferentes al índice de Tornqvist que no requieren datos de precios (como por ejemplo el uso del índice de Malmquist o funciones distancia) (Trindade, 2012). Para el método de estimación utilizado, se consideró que las firmas son técnicamente eficientes (Coelli y otros, 2005). Es decir que las firmas se encuentran en la frontera de producción, y maximizan el producto con la misma combinación de insumos. Es un supuesto de los números índices, pues implica que no voy a medir la

⁵ El software “TFP Version 1 Index Program” desarrollado por el Centro de Análisis de Eficiencia y Productividad (CEPA, 2014) del Departamento de Econometría de la Universidad de New England.

eficiencia técnica de las firmas con esta metodología. Tanto los productos como los insumos no son homogéneos en series largas de tiempo, tanto en calidad como en tipo, lo cual podría causar un sesgo en el análisis. Por ejemplo, a lo largo del tiempo las semillas han mejorado genéticamente y poseen actualmente mayor cantidad de atributos que hace 120 años atrás (atributos como tolerar plagas y enfermedades, resistir herbicidas o eventos climáticos extremos como las sequías, entre otros). Similarmente, puede aplicarse esto tanto a otros insumos (agroquímicos, fertilizantes) como a nuevos productos (granos con mayor contenido de aceite y/o proteína).

Estimación de las tasas de crecimiento por subperíodos. Una vez estimado el Índice de Tornqvist para el producto, los factores y la PTF, se calcularon las tasas de crecimiento de cada uno de estos a través de modelos econométricos y con base al uso de **variables dummies** de quiebre estructural, que permitieran el análisis por subperíodos (para este análisis, el subperiodo fue cada 10 años). Para este último análisis se utilizó el software **Stata13**. Todas las tasas de crecimiento se obtuvieron como resultado de estimar el **parámetro “δ”** en regresiones log-lineales para el producto, los factores y la PTF. La fórmula es la siguiente:

$$\text{Log } Y_t = \alpha + (\beta \cdot t) + \sum_{i=1}^9 (\gamma_i * D_i) + \sum_{i=1}^9 \delta_i (D_i * t) + \mu_i$$

Siendo: **Y_t**: representa a la variable dependiente producto. Los factores son tierra, capital, trabajo, y la PTF el residuo, **t**: tendencia, **D_i**: variable dummy que se identifica para cada década (por ejemplo, D1 = 1921-1930, D2 = 1931-1940, y sucesivamente hasta el 2020). La década base es 1913-1920. α , β , γ , y δ son Parámetros a estimar. La tasa de crecimiento de cada década se estimó como “g”, siendo $g = \beta + \delta_i$. Se han realizado numerosas iteraciones de estimación del índice de Tornqvist considerando la evolución de los índices simples (sin medias móviles), y con medias móviles de tres y cinco años. Estas se estimaron en forma anual y con diferentes subperíodos, por ejemplo, se probaron subperíodos semejantes al cambio de tendencia de la PTF, pero posteriormente se decidió trabajar por décadas.

Nueva propuesta de trabajo en aprendizaje automático.

Se ha realizado una revisión exhaustiva de antecedentes metodológicos de como implementar modelos de aprendizaje automático a la predicción de la TFP. Los antecedentes son más frecuentes en temas específicos como estimación de producción, y otros temas asociados al agro. Sin embargo, se han encontrado pocos trabajos relacionados a la predicción de la TFP como machine learning, y no se han encontrado trabajos relacionados a Argentina y para la serie de tiempo propuesta en este estudio. En tal sentido, este trabajo sería uno de los primeros en la aplicación de estas nuevas herramientas de aprendizaje automático o machine learning a temas de política del sector agropecuario.

Con base a lo visto en el curso de Programación, podría inicialmente pensarse que el uso **de modelos supervisados combinados con técnicas de regularización y métodos no paramétricos para poder estimar la TFP**. El **método supervisado** es aquel en donde existe al menos una variable dependiente (output) que se trata de predecir con un conjunto de variables independientes (inputs). La **regresión lineal regularizada** (Lasso, Ridge) puede ser útil para capturar las relaciones entre los factores de la producción y el producto. La regularización ayuda a manejar los problemas de multicolinealidad o sobreajuste al penalizar los coeficientes. Por otro lado, de lo revisado en internet, random forest y boosting pueden ser métodos útiles para modelar interacciones complejas y no lineales como son los datos del sector agro. Random forest captura interacciones complejas e identifica la importancia de las variables para definir el producto o las que tengan mayor importancia en la TFP, tema aun no explorado en profundidad, y la limitante que tiene es que no tiene capacidad predictiva en si. Se ha revisado que para el análisis de series de tiempo largas, el LSTM (Deep learning) sería útil para capturar dependencias de largo plazo en los datos.

Resultados esperados y limitaciones

La productividad total de los factores (PTF) explica el crecimiento del producto no atribuible al uso de los factores, haciendo que exista un gran debate sobre el impacto de las políticas, el cambio organizacional y tecnológico sobre ella, tal como fuera señalado en la introducción. Aunque la revisión de antecedentes fue

extensa a nivel mundial, son acotados los trabajos actualizados referentes a América Latina y el Caribe (ALC) y en especial a Argentina. Este estudio tiene por objetivo presentar una aproximación de la evolución de la productividad en los últimos 120 años y de las razones de su variación, como así también de las fuentes factoriales del crecimiento del producto agropecuario, y también poder predecirla a futuro. En el trabajo base se utilizó el número Índice de Tornqvist, el cual fue contrastado con otros autores y con hechos más destacados del ambiente internacional, institucional, tecnológico y organizacional del último siglo. Inicialmente, se encontró que la PTF del sector agropecuario no fue constante a lo largo del tiempo, y su variabilidad podría estar vinculada a cambios en el contexto tecnológico, organizacional, institucional, y también internacional. Los resultados muestran que durante el período 1913-2020, la PTF del sector agropecuario creció a una tasa anual promedio acumulada del 1.5% y explicó aproximadamente el 86% de la variación del producto. Si bien se observan variaciones a lo largo del tiempo, generalmente la tendencia fue positiva excepto en la década del 40 y del 90. En el primer caso, la caída estuvo relacionada a una disminución en el crecimiento del producto y menor uso de capital, mientras que en los 90 a un mayor uso de factores (capital y tierra) y fertilizantes. Se observó que el modelo de crecimiento fue más sensible a la dotación factorial más que a ganancias de PTF, excepto en la última década del 2000-2010. Los insumos que más se utilizaron fueron fertilizantes, tierra y capital, mientras que la mano de obra mostró una tendencia decreciente, probablemente ligada al efecto de la mecanización, las cuestiones vinculadas a la tenencia de la tierra, las diferencias salariales con el sector industrial y la regularización del trabajo. En cuanto a los últimos 50 años (1962-2010), y en el caso de la agricultura, la PTF creció al 1.9% anual, explicando el 48% del crecimiento del producto, y la tendencia general es que existió un aumento de la producción con base a la expansión territorial y con mayor nivel de uso de los factores especialmente a partir de los 90, década en que la PTF disminuyó al -1.1%. Sin embargo, en la última década la PTF se recuperó al 2.3% anual, aun con la misma tasa de crecimiento de los factores, sugiriendo que fuentes no factoriales como la innovación tecnológica y organizacional hayan afectado positivamente al modelo de crecimiento y a la productividad. En el caso de la ganadería, la PTF fue menor que la agrícola y alcanzó una tasa de crecimiento del 0.7% anual entre 1962-2010, explicando el 71% del crecimiento del producto. La tendencia general es que existió un aumento de la producción ganadera con base al aumento de capital (stock animal), pero a partir de los 90 también con base a la expansión territorial y ganancias de PTF dada por las mejoras a nivel tecnológico y organizacional. También se corroboró que los datos utilizados, la serie de tiempo y la metodología de estimación pueden conducir a resultados diferentes en cuanto al crecimiento de la PTF. Se comparó con los resultados de varios autores, y se observaron diferencias no solo en valor absoluto de las tasas de crecimiento, sino también en tendencia. Es necesario desarrollar más trabajos comparados entre metodologías para poder analizar las fuentes de variación de estas estimaciones. Si bien es cierto que el cambio tecnológico fue importante como fuente de crecimiento de la productividad, por sí solo no fue suficiente. **La revisión de los principales hechos históricos y los antecedentes revisados hacen considerar que el contexto internacional, institucional y organizacional también la afectaron.** Por ejemplo, un ambiente internacional y/o institucional que afecta a los precios relativos y que restringe el acceso al mercado externo, afecta en forma negativa sobre las expectativas de rentabilidad del productor, disminuyendo la adopción de tecnología, la asignación de tierra, capital y trabajo, y por tanto el crecimiento del producto y de la productividad. Por el contrario, un ambiente que fomenta la modernización y el tecnológico promueven la mayor inversión y por tanto la productividad. El crecimiento de la demanda de alimentos y las restricciones en el uso de los recursos naturales en las próximas décadas, exige el aumento de la productividad agropecuaria (Alston y otros, 2010). **A partir de la evolución de los índices y sus tasas de crecimiento, se observó que el sector agropecuario, aun no teniendo un ambiente internacional y/o institucional favorable, ha crecido en productividad gracias a las innovaciones tecnológicas y organizacionales, más que a las institucionales, y que aún es altamente dependiente de los factores y algunos insumos claves para crecer.** Esto remarca la necesidad de trabajar en una política de Estado de largo plazo y de estudios sectoriales continuos, dado que cada sector productivo posee particularidades específicas a nivel regional, del componente social y del potencial encadenamiento con el sector industrial. Nuevas herramientas de predicción facilitaran el diseño de políticas eficaces para mantener un sector agropecuario y agroindustrial sostenible y generador de divisas de manera continua.