

Desarrollo de un índice de productividad de suelo regional a través de una red neuronal artificial

Josefina L. De Paepe¹ y Roberto Álvarez¹

Introducción

Se puede definir la productividad de un suelo como la capacidad del mismo de producir biomasa vegetal o semilla de cosecha (Yang et al., 2003). Por la relación causal entre las propiedades del suelo y el rendimiento de cultivos es importante entender y cuantificar dicha productividad (Sauerborn, 2002). Un índice de productividad representa la capacidad de producir cierta cantidad de biomasa por hectárea y por año, expresada como porcentaje respecto de la productividad óptima que proporcionaría un suelo ideal en su primer año de cultivo, o bajo determinado escenario de manejo.

Los índices de productividad pueden ser inductivos, cuando están basados únicamente en efectos inferidos de propiedades del suelo que se asume impactan el rendimiento de un cultivo, o deductivos, cuando están basados en métodos empíricos validados directamente con datos de rendimiento (Huddleston, 1984). En la Argentina, el índice de productividad de suelo comúnmente usado es el desarrollado por la FAO en 1970 (Riquier et al., 1970) y con el que se han categorizado los suelos en los mapas de suelo de INTA (GeoINTA, 2013). Este índice, que no se ha validado localmente con datos de rendimientos de cultivos, requiere información detallada de muchas variables edáficas, que se incorporan en un índice multiplicativo. De esta manera la variable que resulte menos favorable va a ser la que controla el valor final del índice. Para su aplicación se introdujeron modificaciones a fin de adecuarlo a las condiciones agroecológicas locales, además de una regionalización climática del país basada en registros históricos (Sobral y Nakama, 1988).

Se han desarrollado varios índices de productividad deductivos por ejemplo para maíz (*Zea Mays* L.) en Illinois,

EE.UU. (García-Paredes et al., 2000), para soja [*Glycine max* (L.) Merr.] en México (Yang et al., 2003) y para sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] en Australia (Potgieter et al., 2005). En la Región Pampeana se desarrolló un índice de productividad para trigo, con una red neuronal artificial (RNA) influenciado por las variables edáficas contenido de carbono orgánico (CO) y capacidad de almacenamiento de agua útil (CAAU) (Álvarez et al., 2011). Sin embargo, en este estudio se subdividió a la región en 10 unidades con lo cual la productividad pampeana estaba determinada por únicamente 10 valores. Este índice no permite definir adecuadamente las interacciones entre variables y no incluye variabilidad temporal, ya que se desarrolló con datos de una estrecha ventana temporal, pero su desarrollo mostró la utilidad de las RNA para generar índices de productividad.

Una RNA es un método empírico de modelización que comúnmente tiene mayor capacidad predictiva que un modelo de regresión porque permite describir procesos curvilíneos y exponer interacciones escondidas entre variables (Batchelor et al., 2002). Una RNA típica tiene una estructura de tres capas: entrada, escondida y salida (**Figura 1**). Cada neurona de la capa de entrada corresponde a una variable de entrada de información, la capa de salida tiene una neurona por cada variable a estimar y la estructura de la capa escondida se determina empíricamente. La información fluye desde la capa de entrada, a través de la capa escondida y finalmente hacia la capa de salida, y el proceso de aprendizaje se desarrolla al revés, ajustando los pesos asociados a las funciones de transferencia (líneas en el esquema) entre las capas en sentido inverso (Joergensen y Bendoricchio, 2001).

A escala mundial, la Región Pampeana es considerada una de las regiones productoras de granos más importantes por su extensión y potencial de rendimiento (Satorre y Slafer, 1999), pero no se han desarrollado en ella índices de productividad de suelos validados con datos de rendimiento para los principales cultivos. Nuestro objetivo fue comparar la performance del índice inductivo propuesto por la FAO usado por INTA con un índice deductivo basado en una RNA, como herramientas para evaluar la productividad de los suelos pampeanos.

Materiales y métodos

Generación de base de datos

En la actualidad más del 60% de la superficie de la Región Pampeana (ca. 60 Mha) se destina a la producción de cultivos en secano, principalmente en las porciones húmedas y semiáridas de la región sobre suelos bien drenados, generalmente Molisoles (Hall et al., 1992; MinAgri, 2013).

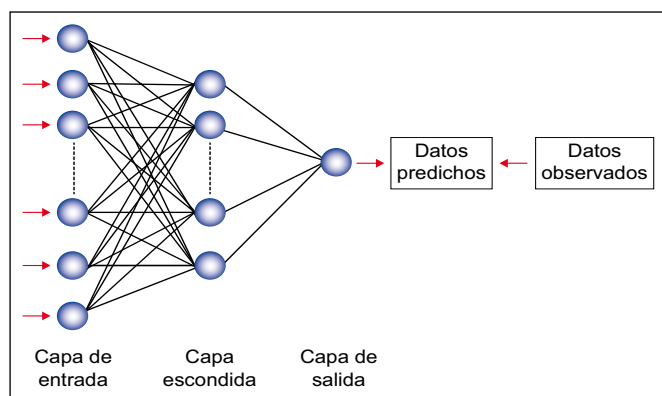


Figura 1. Representación de una red neuronal artificial mostrando capas de neuronas de entrada, escondida y salida, y las conexiones entre las mismas. Adaptado de Álvarez (2009).

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, CONICET. Correo electrónico: depaepe@agro.uba.ar

Para este estudio se utilizó información de más de 110 partidos de las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Entre Ríos, La Pampa y Santa Fe que conforman el núcleo productivo de granos de la región, y se excluyeron los partidos correspondientes a la Pampa Deprimida, por la baja proporción de superficie cultivable. Para reducir el ruido estadístico generado por las grandes diferencias en superficies de los partidos, se agregó la información por partido a 41 unidades geográficas de 1 ± 0.5 Mha cada una, como se detalla en De Paepe y Álvarez (2013). Toda la información biofísica utilizada fue agregada a esta escala. Se generó así un set de 1640 combinaciones de suelo (41 unidades geográficas x año para el periodo de estudio 1967 a 2006).

Los datos de rendimiento de trigo fueron calculados a partir de información publicada de superficie sembrada y producción a escala de partido (MinAgri, 2013). Las características climáticas promedio por partido fueron estimadas a partir de la interpolación de datos de estaciones meteorológicas de INTA y el Servicio Meteorológico Nacional usando la metodología del inverso a la distancia (De Paepe y Álvarez, 2013).

La información de las variables edáficas textura, pH, y profundidad del suelo hasta la tosca fue estimada a partir de los más de 1000 perfiles de suelo publicados en los mapas de suelo de INTA a escala provincia como se detalla en De Paepe y Álvarez (2013). Se estimó, para cada variable, el valor medio afectando las propiedades del perfil por su área de influencia dentro de cada unidad cartográfica y, a su vez, el área de influencia de éstas en cada partido. La CAAU de los suelos se estimó utilizando las ecuaciones de Rawls et al. (1982). Como la información de los mapas de suelo de INTA tiene unos 30-50 años desde que fue

recabada, el contenido de CO de los partidos y unidades geográficas se tomó de un estudio reciente basado en un muestreo regional (Berhongaray et al., 2013).

Índice de productividad de la FAO

La información del índice de productividad de la FAO se encuentra disponible en los mapas de suelo publicados por INTA. A la Región Pampeana le corresponde el índice de productividad de la Región Chaco-Pampeana Sur I. Los parámetros incluidos son: condición climática, drenaje, profundidad efectiva, textura del horizonte superficial, salinidad, porcentaje de sodio intercambiable, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, etc. Se agregaron los datos a escala unidad geográfica a partir de la información publicada por unidad cartográfica tomando en cuenta la contribución relativa de cada valor relacionado a su área de influencia según se detalla en De Paepe y Álvarez (2013). Este índice varía entre 0 y 100, pero fue relativizado a 1.

Índice de productividad basado en una red neuronal artificial

Se aplicó la metodología de RNA para la explicación del rendimiento de trigo en la forma descrita en De Paepe y Álvarez (2013). Se buscó la máxima simplificación posible de las redes para generar el modelo más sencillo sin afectar el coeficiente de determinación (R^2). El set de datos se particionó en un 75% para generar el modelo y un 25% para realizar una validación independiente. El índice de productividad basado en esta metodología se generó asignando al máximo rendimiento estimado (combinación de suelo x año x clima) un valor de 1 y todos los otros rendimientos fueron relativizados a este valor.

Tabla 1. Variabilidad de factores climáticos, edáficos y el rendimiento de trigo en las 41 unidades geográficas de la Región Pampeana desde 1967 a 2006. Los valores mínimos y máximos fueron calculados para todo el set de datos. Adaptado de De Paepe y Álvarez (2013).

Variable	Unidad	Mínimo	Promedio \pm DE	Máximo
Precipitación durante barbecho	mm	21.3	161 \pm 77.8	555
Precipitación durante fase vegetativa	mm	11.6	113 \pm 57.0	379
Precipitación durante floración	mm	56.0	196 \pm 71.2	486
ETP durante barbecho	mm	73.9	130 \pm 13.7	175
ETP durante fase vegetativa	mm	77.8	134 \pm 14.4	191
ETP durante floración	mm	185	305 \pm 29.3	412
Coefficiente fototérmico ¹	MJ m ⁻² d ⁻¹ °C ⁻¹	0.93	1.37 \pm 0.22	2.05
Profundidad de suelo ²	cm	73	92.5 \pm 7.32	100
Arcilla ²	%	10.2	26.5 \pm 9.93	49.0
Arena ²	%	6.26	42.3 \pm 24.3	88.7
CAAU ²	mm	91.3	138 \pm 33.1	192
Carbono orgánico de suelo ³	t ha ⁻¹	31.0	64.5 \pm 17.4	109
Rendimiento de trigo	kg ha ⁻¹	448	1886 \pm 695	4519

ETP = evapotranspiración potencial, CAAU = Capacidad de almacenamiento de agua útil (0-100 cm).

¹ periodo crítico de un mes antes de anthesis, ² profundidad de 0-100 cm o límite superior de la capa petrocálcica, ³ 0-50 cm de profundidad.

Resultados

Se observó una gran variabilidad espacial en las condiciones de clima, suelo y en el rendimiento de trigo que a su vez se combinaron en una amplia variación temporal (**Tabla 1**). La precipitación fue la variable con la mayor variabilidad y el mismo patrón espacial se observó en la evapotranspiración potencial del cultivo. El coeficiente fototérmico decreció de sur a norte en función de la distribución de la temperatura. Los mayores contenidos de CO fueron observados en la Porción Este de la región con niveles hasta tres veces mayores que en el Oeste Pampeano. Debido principalmente a diferencias texturales entre suelos, la CAAU varió mucho entre las subregiones pampeanas del Este y Oeste. El rendimiento de trigo aumentó un 56% desde 1967 a 2006 con un promedio de incremento anual de 37 kg ha⁻¹.

El índice de productividad de la FAO varió entre 0.33 y 0.89 y su relación con el rendimiento de trigo no fue ajustada (**Figura 2**). Si se considera la pendiente de esta relación, el aumento del valor del índice de 0.5 a 0.7 resulta en un aumento promedio de rendimiento de 250 kg ha⁻¹.

La RNA con el mejor ajuste tenía siete neuronas en la capa

oculta y las variables elegidas como inputs del modelo fueron: campaña, precipitación/ETP durante las fases de barbecho, fase vegetativa y floración, CO y CAAU (De Paepe y Álvarez, 2013). Los ajustes para el set de entrenamiento y el de validación no fueron diferentes significativamente ($R^2 = 0.611$ y $R^2 = 0.614$, respectivamente). Todas las variables climáticas y de suelo tenían un efecto curvilíneo sobre el rendimiento. Con el modelo de RNA se estimó un índice de productividad para trigo que varió de 0.54 a 1 y tuvo un buen ajuste con el rendimiento (**Figura 3**).

El modelo ajustado con la RNA fue utilizado para explorar los efectos de variables ambientales sobre el índice de productividad. Se observó que la CAAU tiene un impacto mayor sobre la productividad de suelos pampeanos bajo escenarios climáticos semiáridos que húmedos, y que este efecto disminuye cuando la situación climática mejora, hacia el Este Pampeano (**Figura 4A**). Además, se demostró que la productividad se encuentra determinada por la interacción positiva entre las variables edáficas CO y CAAU (**Figura 4B**). La productividad máxima se observó en suelos con 70 t CO ha⁻¹ y una CAAU 140 mm. Este índice de productividad no pudo ser validado con datos de rendimiento de ensayos experimentales (datos no mostrados).

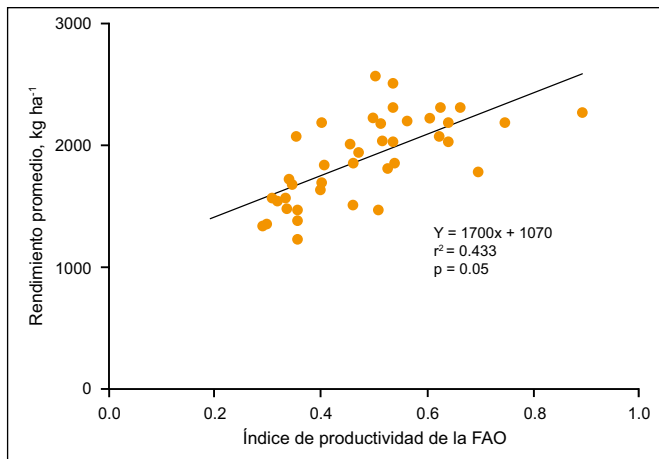


Figura 2. Relación entre el índice de productividad de suelo desarrollado por la FAO y el rendimiento promedio de trigo desde 1967 hasta 2006 por unidad geográfica. Redibujado de De Paepe y Álvarez (2013).

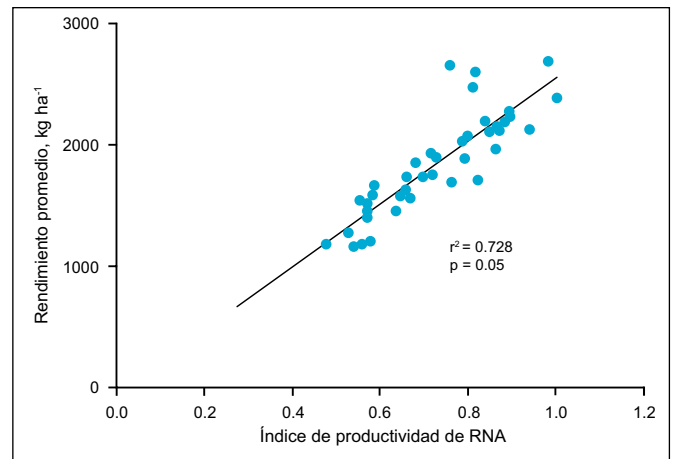


Figura 3. Relación entre el índice de productividad desarrollado aplicando la metodología de RNA y el rendimiento promedio de trigo desde 1967 hasta 2006 por unidad geográfica. Redibujado de De Paepe y Álvarez (2013).

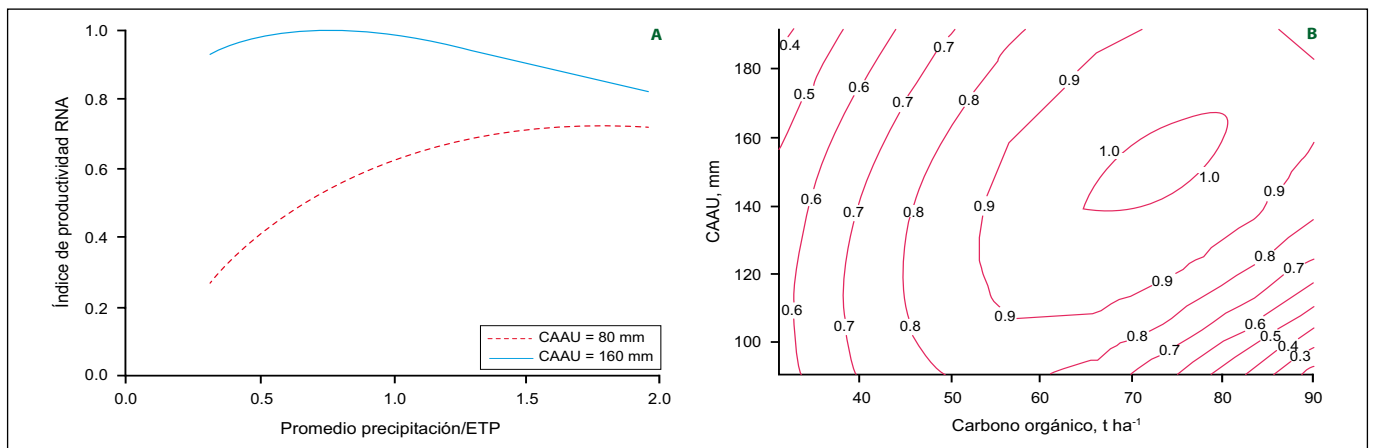


Figura 4. (A) Relación entre el índice de productividad basado en la RNA para el rango promedio observado de precipitación/ETP (evapotranspiración) bajo dos escenarios de suelo. La Porción Húmeda Pampeana se encuentra representada por una CAAU (capacidad de almacenamiento de agua útil) promedio de 160 mm y a la Porción Semiárida le corresponde una CAAU de 80 mm. (B) Interacción entre las variables CO y CAAU seleccionados por el modelo regional y el índice de productividad de trigo resultante. Redibujado de De Paepe y Álvarez (2013).

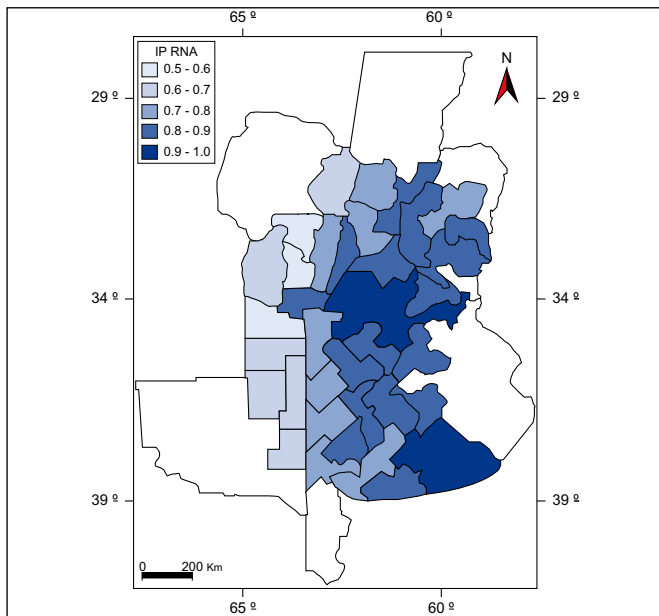


Figura 5. Distribución espacial del índice de productividad deductivo basado en una RNA por unidad geográfica. Los colores oscuros corresponden a valores del índice más altos y los más claros a valores menores. IP RNA: índice de productividad generado con una red neuronal artificial. Redibujado de De Paepe y Álvarez (2013).

La distribución espacial del índice de productividad muestra que los suelos con productividad más alta se ubican en el Este Pampeano y aquellos con la productividad más baja en el Oeste Semiárido (Figura 5). El 17% de las unidades geográficas obtuvieron un valor de > 0.9, el 60% tenían valores entre 0.7-0.9 y el 23% restante obtuvo valores menores a 0.7.

Discusión

Nuestros resultados muestran que el índice de productividad inductivo de la FAO aplicado comúnmente en la Región Pampeana para la evaluación de suelos no fue una herramienta útil para representar la productividad regional de trigo. A través de una RNA se logró estimar de manera óptima el rendimiento de trigo a escala regional utilizando información fácilmente obtenible y para un rango ambiental amplio. Con este modelo empírico se pudo generar un índice de productividad de trigo para la región. Cuando se analizaron las Porciones Húmedas y Semiáridas por separado se mantuvo la interacción positiva entre las variables edáficas CO y CAAU pero con más peso en la Región Semiárida Pampeana. La importancia de estas variables edáficas sobre el rendimiento de cultivos ya ha sido demostrado previamente en otras regiones de producción del mundo y también en la Región Pampeana (Bono et al., 2008; Álvarez et al., 2002). Los resultados no esperados en suelos de textura fina que resultan en índices de productividad bajos pueden estar vinculados a problemas de enfermedades del cultivo (Annone, 2001), y problemas de encharcamiento temporal.

Los principios de la metodología de la RNA aplicada en este estudio pueden ser utilizados como una herramienta de la estimación de la productividad regional para otras regiones del mundo y para diferentes cultivos.

Bibliografía

- Álvarez R., y J.L. De Paepe. 2011. Establishing productivity indices for wheat in the Argentine Pampas by an artificial neural network approach. En *Artificial Neural Networks*. Nova Science Publishers.
- Álvarez, R. 2009. Predicting average regional yield and production of wheat in the Argentine Pampas by an artificial neural network approach. *Eur. J. Agron.* 30:70–77.
- Alvarez, R., C.R. Alvarez, y H. Steinbach. 2002. Association between soil organic matter and wheat yield in humid Pampa of Argentina. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33:749–757.
- Annone, J.G. 2001. Criterios empleados para la toma de decisiones en el uso de fungicidas en trigo. *Rev. Tecnol. Agropec.* 6:16–20.
- Batchelor, W.D., B. Basso, y J.O. Paz. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Eur. J. Agron.* 18:141–158.
- Berhongaray, G., R. Álvarez, J. De Paepe, C. Caride, y R. Cantet. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma* 192:97–110.
- Bono A, R. Álvarez, D.E. Buschiazzi y R.J.C. Cantet. 2008. Tillage Effects on Soil Carbon Balance in a Semiarid Agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1140–1149.
- De Paepe J.L. y R. Álvarez. 2013. Development of a Regional Soil Productivity Index Using an Artificial Neural Network Approach. *Agron. J.* 105:1803–1813.
- García-Paredes, J. D., K.R. Olson y J.M. Lang. 2000. Predicting corn and soybean productivity for Illinois soils. *Agricultural Systems* 64:151-170.
- GeoINTA. 2013. Consulta on-line: www.geointa.intagov.ar/suelos
- Hall, A.J., C. Rebella, C. Guersa, y J. Culot. 1992. Field-crop systems of the Pampas. In: C.J. Pearson, editor, *Field crop ecosystems*. Elsevier, Amsterdam.
- Huddleston, J.H. 1984. Development and use of soil productivity ratings in the United States. *Geoderma* 32:297–317.
- Jorgensen, S., y G. Bendricchio. 2001. *Fundamentals of ecological modelling*. 3rd ed. Elsevier, Amsterdam.
- MinAgri. 2013. Consulta on-line: www.minagri.gov.ar
- Potgieter, A.B., G.L. Hammer, A. Doherty, y P. de Voil. 2005. A simple regional scale model for forecasting sorghum yield across north-eastern Australia. *Agric. For. Meteorol.* 132:143–153.
- Rawls, W., D. Brakensiek, y K. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 25:1316–1332.
- Riquier, J., D. Bramaio, y J. Cornet. 1970. A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity. *FAO, Rome*.
- Satorre, E., y G. Slafer. 1999. Wheat production systems of the Pampas. In: E. Satorre and G. Slafer, editors, *Wheat: Ecology and physiology of yield determination*. Hayworth Press, Binghamton, NY. pp. 333–348.
- Sauerborn, J. 2002. Site productivity, the Key to crop productivity. *J. Agronomy & Crop Science* 188:363-367.
- Sobral, R. E. y V. Nakama. 1988. Índices de productividad, método paramétrico para evaluación de tierras. *Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo XII: del 12 al 16 de septiembre. Comisión mineralogía, génesis, clasificación y cartografía de suelos.*: 259 p.
- Yang, J., R. Hammer, A. Iomponi, y R. Planchar. 2003. Predicting soybean yield in a dry and wet year using a soil productivity index. *Plant Soil* 250:175–182. 🌱