

Evaluación del impacto ambiental del manejo agrícola en tres sistemas agrícolas argentinos*

Florencia Rositano^{1,*}, Federico E. Bert², Gervasio Piñeiro³ y Diego O. Ferraro¹

- *El proceso de agriculturización ha generado una percepción de amenaza para la sustentabilidad de los agroecosistemas pampeanos, lo que ha llevado a describir los síntomas de deterioro mediante indicadores.*
- *Se evaluó el impacto ambiental de diez años de agricultura en tres zonas agrícolas argentinas con distintas características agroecológicas mediante cuatro indicadores.*
- *El único indicador que pareciera ser impactado por las prácticas de manejo agrícola fue el N disponible en suelo.*

Introducción

La producción agrícola modifica la estructura (es decir, los componentes bióticos y abióticos) y la funcionalidad (es decir, los procesos ecológicos) de los ecosistemas. En las últimas dos décadas, los agroecosistemas pampeanos han sido sometidos a una alta tasa de cambio en su estructura y funcionalidad (Satorre, 2005). La concentración de la producción y el manejo agrícola facilitó la adopción generalizada de tecnologías orientadas al consumo de insumos (maquinaria, fertilizantes, pesticidas, etc.) y a la aplicación de procesos (es decir, sistemas de manejo con un alto componente de información y conocimiento, como la siembra directa y la agricultura de precisión) (Manuel Navarrete et al., 2009). En este último caso, aproximadamente el 90% de la superficie de cultivos extensivos se realiza actualmente bajo siembra directa.

La magnitud de las transformaciones que implica el proceso de agriculturización ha generado una percepción de amenaza para la sustentabilidad de los agroecosistemas pampeanos (Casas, 2003; Manuel Navarrete et al., 2005), lo que ha llevado a describir mediante indicadores los síntomas de deterioro. Diversos autores han utilizado distintos indicadores con el objetivo de evaluar la trayectoria de impacto ambiental de las prácticas de manejo agrícola en los agroecosistemas pampeanos. Estos ejercicios de diagnóstico dan como resultado diversas tendencias que mantienen un alto grado de incertidumbre. Carreño y Viglizzo (2007), por ejemplo, establecieron que las modificaciones ocurridas en el ámbito productivo han tenido poco impacto ambiental en los agroecosistemas pampeanos.

En base a estos antecedentes, en este trabajo se seleccionó un conjunto de cuatro indicadores para evaluar el impacto ambiental de diez años de agricultura en tres zonas agrícolas argentinas con distintas características agroecológicas.

Metodología

A partir de una revisión bibliográfica, se construyeron cuatro modelos conceptuales con los que se representó el conocimiento existente sobre los efectos del manejo agrícola en los siguientes cuatro componentes de los agroecosistemas pampeanos: 1) Balance de carbono (C) del suelo, 2) Balance de nitrógeno (N) del suelo, 3) Control de contaminación del agua subterránea, y 4) Control de emisión de óxido nítrico (N_2O) (Rositano y Ferraro, 2014). Estos cuatro modelos estuvieron modulados por variables de entrada ambientales (temperatura, precipitaciones), edáficas (erosión, textura del suelo) y productivas (rendimiento, fertilización nitrogenada, riego). Asimismo, cada modelo tuvo una variable respuesta: contenido de C en suelo, N disponible en suelo, concentración de NO_3 en agua subterránea, y desnitrificación, para los modelos 1, 2, 3, y 4, respectivamente.

En el **modelo de Balance de C del suelo**, la entrada de C al sistema consiste en el aporte por descomposición de los residuos de los cultivos y sus raíces; mientras que las pérdidas son causadas por la mineralización de la materia orgánica y la erosión del suelo.

En el **modelo de Balance de N del suelo**, la disponibilidad de N para el siguiente cultivo de la rotación es modulada por la mineralización de la materia orgánica, el residuo de cosecha del cultivo previo, el régimen de fertilización nitrogenada, y las pérdidas de N al ambiente (en este caso, sólo desnitrificación y lixiviación).

En el **modelo de Control de contaminación del agua subterránea**, la concentración de NO_3 está directamente relacionada con la fertilización nitrogenada, la textura del suelo y el contenido de agua en el sistema a través del régimen de precipitaciones y del riego.

En el **modelo de Control de emisión de N_2O** , la desnitrificación es el principal proceso que favorece las emisiones directas de N_2O desde el suelo hacia la

1 IFEVA. Universidad de Buenos Aires. CONICET. Departamento de Producción Vegetal. FAUBA

2 Universidad de Buenos Aires. CONICET. Departamento de Producción Vegetal. FAUBA

3 IFEVA. Universidad de Buenos Aires. CONICET. Departamento de Recursos Naturales. FAUBA

* Autor de contacto. Correo electrónico: rositano@agro.uba.ar

atmósfera; en los agroecosistemas pampeanos, los principales factores determinantes de la desnitrificación son la disponibilidad de N en el suelo y el contenido de humedad. La presencia de plantas en crecimiento activo limita el proceso de desnitrificación, debido a la menor disponibilidad de agua y, en una menor medida, a niveles más bajos de NO_3 en el suelo. Asimismo, la fertilización nitrogenada aumenta significativamente el N disponible en el suelo y, como consecuencia, la desnitrificación.

La cuantificación de estos modelos conceptuales se llevó a cabo mediante una metodología probabilística conocida como Redes Bayesianas, construidas mediante el software Netica (<http://www.norsys.com/>) (Norsys Software Corp., 2009). Una Red Bayesiana es un sistema experto que representa gráficamente un conjunto de variables y sus relaciones o dependencias condicionales teniendo en cuenta un conjunto de distribuciones de probabilidad (Korb y Nicholson, 2004; Jensen y Nielsen, 2007). En términos generales, esta metodología probabilística puede ser representada visualmente como un conjunto de nodos (o variables) conectados por flechas unidireccionadas (**Figura 1**). Los nodos representan las variables y sus posibles estados, mientras que las flechas representan las relaciones causales entre los nodos. Cada nodo o variable puede tomar diferentes estados (por ejemplo, alto/medio/bajo) con el fin de mejorar la precisión del modelo. La estimación de los estados de las variables se describe en detalle en Rositano y Ferraro (2014). Los estados son grupos delimitados por intervalos o rangos de las variables bajo estudio. El número de estados depende de la información que se desee transmitir y de los posibles valores que pueda llegar a tomar la variable (Dlamini, 2010). La sumatoria de los estados de una variable en particular debe ser 1 (en términos probabilísticos) o 100 (en términos porcentuales). En este caso particular, las variables presentaron entre dos y tres estados (Rositano y Ferraro, 2014).

En una Red Bayesiana, aquellas variables determinadas por una o más variables están caracterizadas por una tabla de probabilidad condicional que representa la combinación de todos los estados de las variables de las cuales depende junto con sus valores probabilísticos. Por su parte, las variables de entrada del modelo tienen distribuciones probabilísticas marginales que representan la frecuencia de cada estado (Chen y Pollino, 2012). En este caso, las tablas de probabilidad condicional fueron el resultado de un proceso de obtención del conocimiento en base a entrevistas a investigadores involucrados en diversas áreas (por ejemplo, fertilización de cultivos, contaminación ambiental por fertilizantes, dinámica de nutrientes, calidad y contaminación del agua subterránea, fertilidad del suelo) de los sistemas agrícolas pampeanos.

Finalmente, las variables de entrada de los modelos construidos se cuantificaron con bases de datos ambientales y productivas provenientes de tres zonas agrícolas pampeanas con distintas características agroecológicas: 1) Norte de Córdoba (NC), 2) Centro de Buenos Aires (CBA), y 3) Sur de Entre Ríos (SER). Las bases de datos ambientales fueron provistas por el Servicio Meteorológico Nacional y por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, mientras que las bases de datos productivas contenían información proveniente de lotes agrícolas de las tres zonas. De esta manera, se estimaron y compararon los valores de estas variables para diez campañas agrícolas (2000/2001 - 2009/2010) y tres cultivos (maíz, soja y trigo).

Para analizar los resultados se utilizó la estadística descriptiva; específicamente, diagramas de caja con el objetivo de mostrar los patrones emergentes en las tres zonas agrícolas y en los tres cultivos.

Resultados

Se observaron diferencias mínimas tanto entre zonas agrícolas (**Figura 2**) como entre cultivos (**Figura 3**). Las

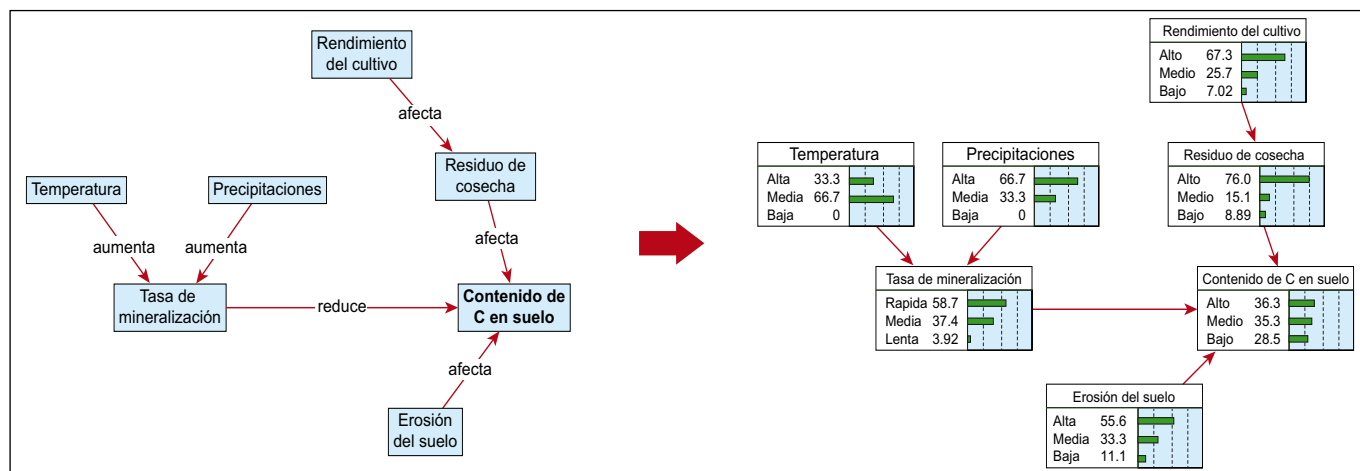


Figura 1. Conversión del modelo conceptual Balance de carbono (C) del suelo en una Red Bayesiana. En la Red Bayesiana, las variables de entrada (Temperatura, Precipitaciones, Rendimiento del cultivo, y Erosión del suelo) se cuantificaron con información ambiental y productiva correspondiente a la zona Sur de Entre Ríos para el cultivo de maíz durante la campaña 2000/2001, mientras que los valores de probabilidad de las restantes variables (Tasa de mineralización, Residuo de cosecha, y Contenido de C en suelo) fueron obtenidos a partir de entrevistas a investigadores relacionados con la temática. La variable respuesta de este modelo es Contenido de C en suelo. (Adaptado de Rositano y Ferraro, 2017).

diferencias se observaron entre indicadores, siendo *Alto N disponible en suelo* aquel que no se encontró en condiciones deseables debido a que presentó bajos valores de probabilidad (**Figuras 2 y 3**).

En términos de obtener mayor legibilidad en los resultados, se muestran únicamente aquellos estados de la variable respuesta con mayor relación con la sustentabilidad ambiental de los agroecosistemas: 1) *Alto Contenido de C en suelo*, 2) *Alto N disponible en suelo*, 3) *Baja Concentración de NO₃ en agua subterránea*, y 4) *Baja Desnitrificación*. La estimación de los estados de respuesta de las variables se describe en detalle en Rositano y Ferraro (2014).

En el caso de *Alto Contenido de C en suelo*, las probabilidades encontradas fueron mayores en CBA (Mediana = 61%), en comparación con las zonas SER (53%) y NC (54%) (**Figura 2A**). El cultivo de soja obtuvo los menores valores de probabilidad de este indicador (46%). Los cultivos de maíz y trigo presentaron valores mayores que el cultivo de soja (63% y 58%, respectivamente) (**Figura 3A**).

En el caso de *Alto N Disponible en suelo*, las probabilidades halladas fueron similares entre NC (17%), CBA (20%) y SER (19%) (**Figura 2B**). En el caso de los cultivos, las probabilidades encontradas también fueron similares entre ellos. El cultivo de soja presentó un valor de probabilidad de 16% (**Figura 3B**). En el caso de los cultivos

de trigo y maíz, el valor para este indicador, en ambos casos, fue de 20% (**Figura 3B**).

En el caso de *Baja Concentración de NO₃ en agua subterránea*, las probabilidades halladas para CBA (61%) y para SER (67%) fueron mayores en comparación con aquellas del NC (50%) (**Figura 2C**). Tanto el cultivo de soja como el cultivo de maíz obtuvieron menores valores de probabilidad de este indicador (53% y 55%, respectivamente), en comparación con el cultivo de trigo (61%) (**Figura 3C**).

En el caso de *Baja Desnitrificación*, las probabilidades halladas para NC (83%), SER (87%) y CBA (83%) fueron similares (**Figura 2D**). En la zona agrícola SER, se observó un caso con un valor de probabilidad de 7%. No se observaron diferencias en los valores de probabilidad hallados para los cultivos de trigo, maíz y soja, siendo en los tres casos de 83% (**Figura 3D**). En maíz y soja, se observaron dos casos con valores de probabilidad de 5.5% y 7%, respectivamente.

En la **Figura 4**, se presentan los cuatro indicadores seleccionados en las tres zonas agrícolas pero únicamente para el cultivo de maíz, ya que para los dos cultivos restantes el patrón observado fue similar (en el caso de soja, con valores de probabilidad ligeramente menores para Alto Contenido de C en suelo y Alto N disponible en suelo). Estos resultados mostraron que durante los diez años analizados el valor de los indicadores permaneció relativamente

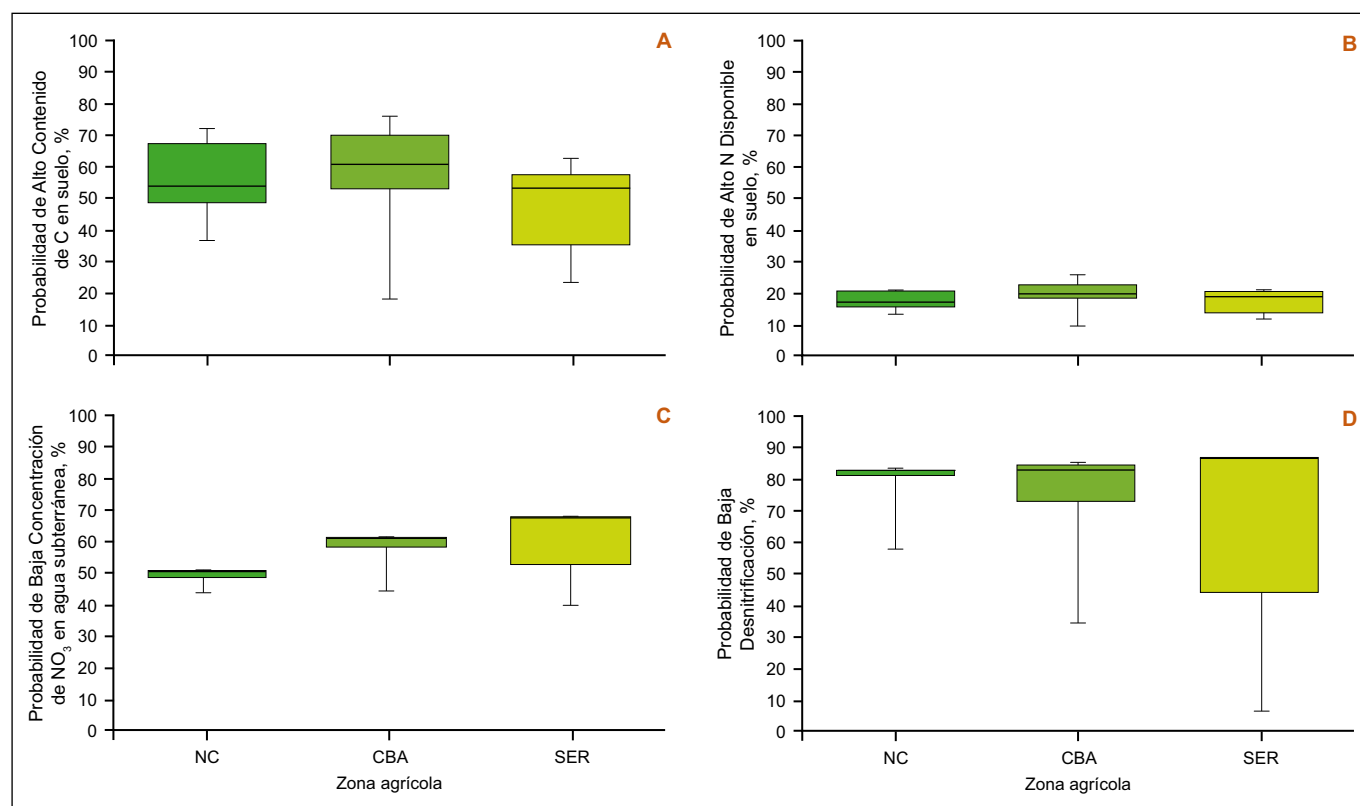


Figura 2. Respuesta probabilística de cada indicador en las tres zonas agrícolas bajo estudio. Las líneas inferiores y superiores de las cajas representan los cuartiles Q1 (25% de los datos), y Q3 (75% de los datos), respectivamente, en tanto que la línea en la caja corresponde al cuartil Q2 o mediana (50% de los datos) para cada zona, considerando las diez campañas agrícolas (2000/2001 - 2009/2010) y los tres cultivos (trigo, maíz y soja) bajo estudio. Los bigotes representan los valores mínimo y máximo de cada situación. En cada caja, n = 30. Referencias: NC = Norte de Córdoba; CBA = Centro de Buenos Aires; SER = Sur de Entre Ríos.

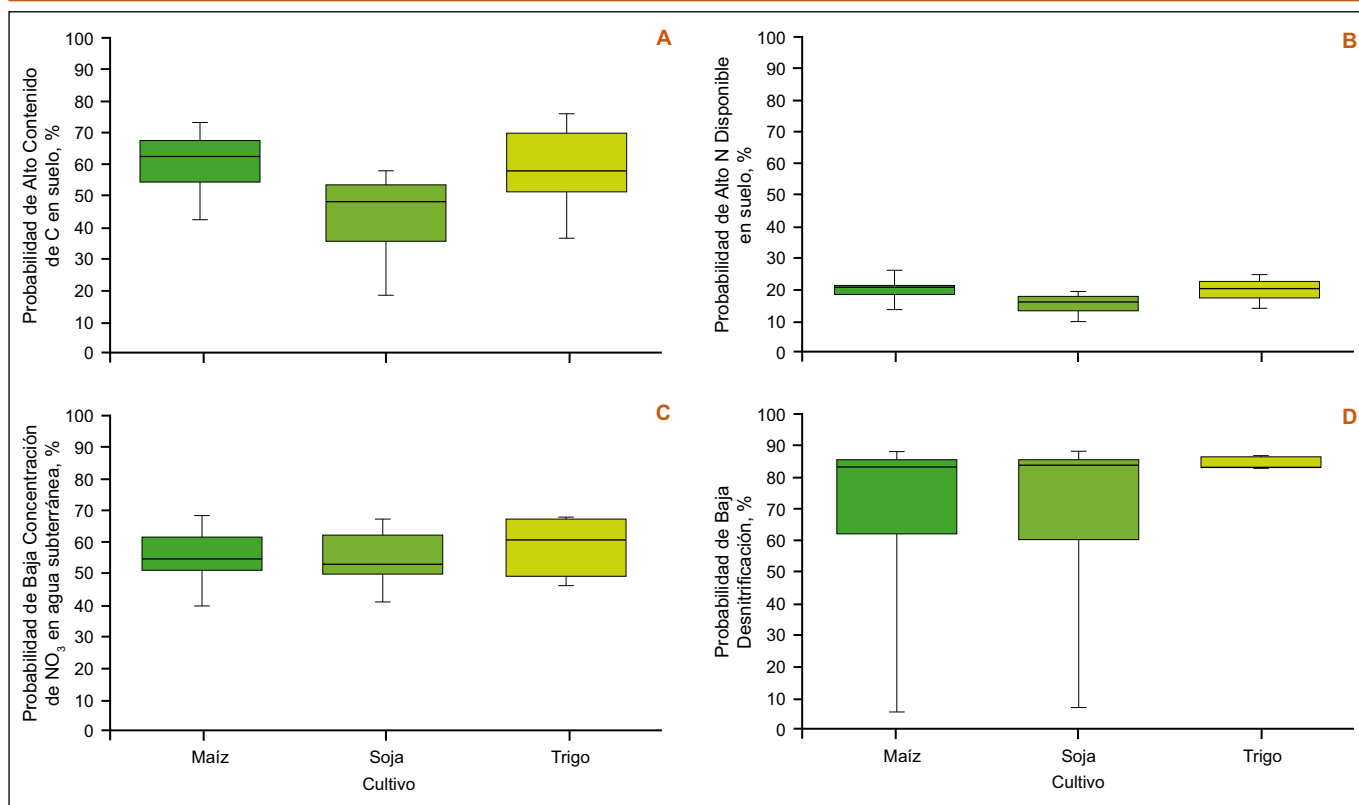


Figura 3. Respuesta probabilística de cada indicador en los tres cultivos bajo estudio. Las líneas inferiores y superiores de las cajas representan los cuartiles Q1 (25% de los datos), y Q3 (75% de los datos), respectivamente, en tanto que la línea en la caja corresponde al cuartil Q2 o mediana (50% de los datos) para cada zona, considerando las diez campañas agrícolas (2000/2001 – 2009/2010) y las tres zonas agrícolas (Norte de Córdoba, Centro de Buenos Aires, y Sur de Entre Ríos) bajo estudio. Los bigotes representan los valores mínimo y máximo de cada situación. En cada caja, n = 30.

constante en las tres zonas analizadas, salvo en el caso de Baja Desnitrificación donde tres campañas agrícolas presentaron disminuciones abruptas en sus valores debido a incrementos en los valores de probabilidad de la variable Precipitaciones en su estado Alto. Este factor ambiental es un fuerte modulador de la desnitrificación ya que las bacterias que desencadenan este proceso son anaeróbicas y se ven favorecidas en suelos anegados o mal drenados.

Discusión

El *Alto Contenido de C* en suelo permaneció relativamente constante tanto entre zonas agrícolas (**Figura 2A**) como entre cultivos (**Figura 3A**) como consecuencia de un manejo agrícola adecuado. En este sentido, este indicador obtuvo valores de probabilidad mayores al 50%. Estos resultados, sin embargo, pueden estar enmascarados por la escala de tiempo bajo estudio ya que, por ejemplo, Caride et al. (2012) analizaron los cambios en el carbono orgánico del suelo (COS) luego de 60 años bajo diferentes prácticas de manejo agrícola en la sub-región Pampa Ondulada y mostraron que el COS disminuyó en ese periodo de tiempo.

El indicador *Alto N Disponible en suelo* no se encontró en una condición deseable tanto a nivel de zona agrícola (**Figura 2B**) como de cultivo (**Figura 3B**). Esto se constató con las bajas probabilidades obtenidas en ambos casos. En general, es común hallar balances negativos entre los ingresos y egresos de N de los sistemas agrícolas en región pampeana debido a los bajos niveles de fertilización

nitrogenada que no restauran completamente los niveles originales de fertilidad de estos suelos (Austin et al., 2006; Lavado y Taboada, 2009).

Las pérdidas de N al ambiente fueron bajas tanto entre zonas agrícolas (**Figura 2C y 2D**) como entre cultivos (**Figura 3C y 3D**), confirmando lo establecido por algunos autores en cuanto a que las pérdidas de N son considerablemente bajas en los agroecosistemas pampeanos (Rimski-Korsakov et al., 2004; Álvarez y Grigera, 2005). En este sentido, los bajos niveles de aplicación de fertilización nitrogenada al sistema determinaron no sólo bajos valores de probabilidad de Alto N disponible en suelo (**Figuras 2B, 3B y 4B**), sino también un Balance de N en el suelo negativo que afectó positivamente el control de contaminación del agua subterránea. Es decir, la concentración de NO_3 en agua subterránea disminuyó al mismo tiempo que lo hizo el N disponible en suelo (**Figuras 2C, 3C y 4C**).

Conclusión

En este trabajo, se evaluó el impacto ambiental de diez años de agricultura en tres zonas argentinas con distintas características agroecológicas mediante cuatro indicadores: Contenido de C en suelo, N disponible en suelo, Concentración de NO_3 en agua subterránea, y Desnitrificación. En términos generales, el único indicador que resaltó que las prácticas de manejo agrícola parecieran estar impactándolo fue el N disponible en suelo. Si bien la productividad de las zonas bajo estudio se vería

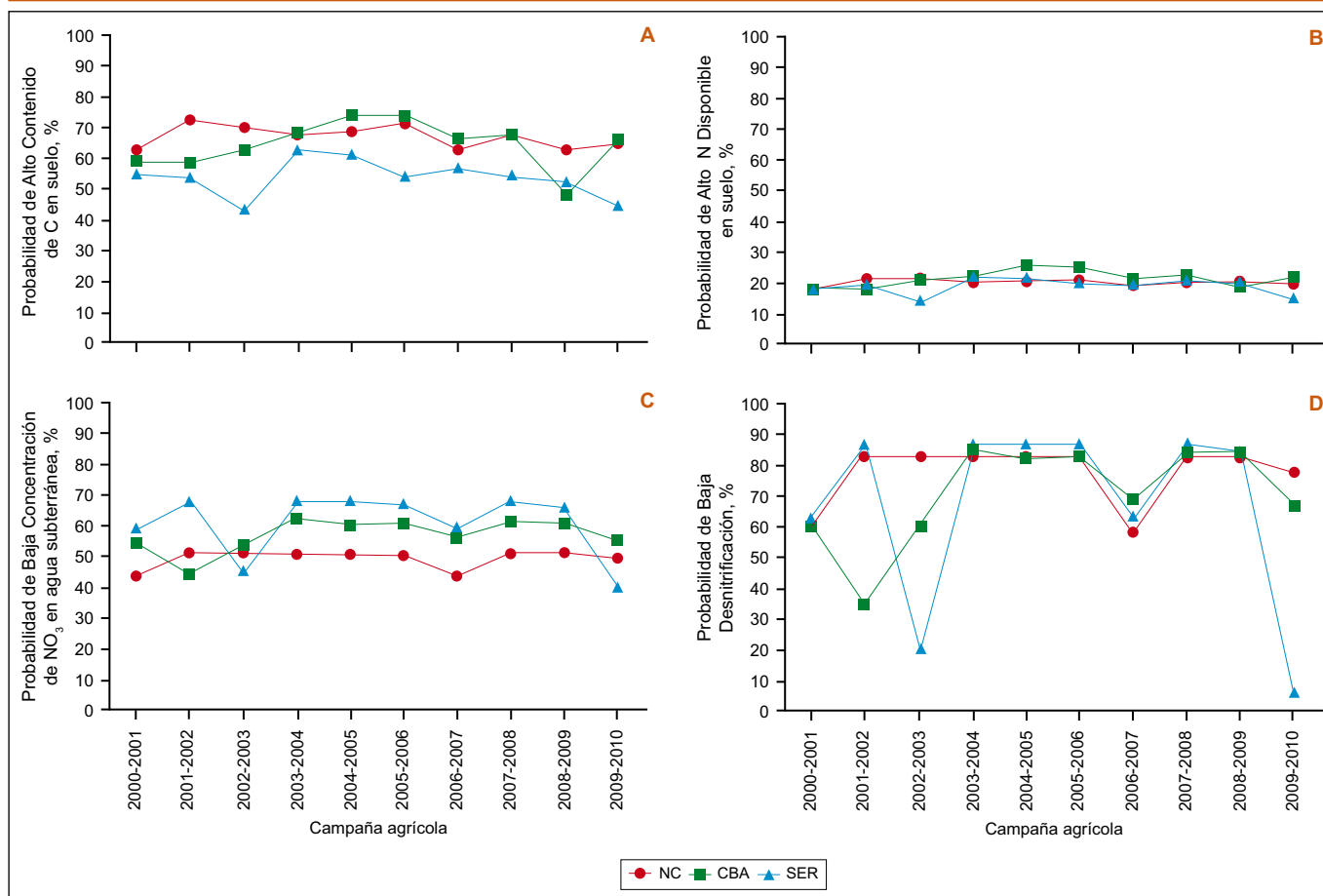


Figura 4. Respuesta probabilística de cada indicador considerando las diez campañas agrícolas (2000/2001 – 2009/2010) y las tres zonas agrícolas (Norte de Córdoba, Centro de Buenos Aires, y Sur de Entre Ríos) bajo estudio. Referencias: NC = Norte de Córdoba; CBA = Centro de Buenos Aires; SER = Sur de Entre Ríos.

perjudicada por los bajos niveles nitrogenados, no ocurriría lo mismo en términos ambientales. En este sentido, las pérdidas de N al ambiente (particularmente, lixiviación y desnitrificación) no fueron relevantes, siguiendo la lógica de la disponibilidad de N en el suelo.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (PIP 555), por la Agencia Nacional de Promoción Científica (PICT 1559) y por la Universidad de Buenos Aires (UBACYT 20020110100196). F. Rositano fue beneficiaria de una beca doctoral CONICET. Los autores agradecen a María Celeste Gregoret (CREA Córdoba Norte), Fernando García Frugoni (CREA Litoral Sur), Mercedes Prado (CREA Litoral Sur), y Gonzalo Roperero (CREA Roque Pérez-Saladillo), por las bases de datos suministradas.

Bibliografía

Álvarez, R., y S. Grigera. 2005. Analysis of soil fertility and management effects on yields of wheat and corn in the Rolling Pampa of Argentina. *Journal of Agronomy & Crop Science* 191:321-329.

Austin, A.T., G. Piñeiro, M. Gonzalez-Polo. 2006. More is less: agricultural impacts on the N cycle in Argentina. *Biogeochemistry* 79:45-60.

Caride, C., G. Piñeiro, y J.M. Paruelo. 2012. How does agricultural management modify ecosystem services in the Argentine Pampas? The effects on soil C dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 154:23-33.

Carreño, L.V., y E.F. Viglizzo. 2007. Provisión de servicios ecológicos y gestión de los ambientes rurales en Argentina. Ediciones INTA. pp. 74.

Casas, R. 2003. Sustentabilidad de la agricultura en la región Pampeana. EEA Balcarce. Ediciones INTA.

Chen, S.H., y C.A. Pollino. 2012. Good practice in Bayesian network modelling. *Environmental Modelling & Software* 37:134-145.

Dlamini, W.M. 2010. A Bayesian belief network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland. *Environmental Modelling & Software* 25:199-208.

Jensen, F.H., y T.D. Nielsen. 2007. *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer Verlag.

Korb, K.B., y A.E. Nicholson. 2004. *Bayesian Artificial Intelligence*. Chapman and Hall/CRC Press, London.

Lavado, R.S., y M.A. Taboada. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agrosresource. *Journal of Soil and Water Conservation* 64:150-153.

-
- Manuel-Navarrete, D., G. Gallopín, M. Blanco, M. Díaz-Zorita, D.O. Ferraro, H. Herzer, P. Laterra, J. Morello, M.R. Murmis, W. Pengue, M. Piñeiro, G. Podestá, E.H. Satorre, M. Torrent, F. Torres, E. Viglizzo, M.G. Caputo, y A. Celis. 2005. Análisis sistémico de la agriculturización en la pampa húmeda argentina y sus consecuencias en regiones extrapampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas. CEPAL. Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 118. Santiago de Chile, Chile. pp. 65.
- Manuel-Navarrete, D., G. Gallopín, M. Blanco, M. Díaz-Zorita, D.O. Ferraro, H. Herzer, P. Laterra, M. Murmis, G. Podestá, J. Rabinovich, E. Satorre, F. Torres, y E. Viglizzo. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environment, Development and Sustainability* 11:612-638.
- Norsys Software Corp. 2009. Netica. www.norsys.com
- Rimski-Korsakov, H., G. Rubio, y R.S. Lavado. 2004. Potential nitrate losses under different agricultural practices in the pampas region, Argentina. *Agricultural Water Management* 65:83-94.
- Rositano, F., y D.O. Ferraro. 2014. Ecosystem services provided by agroecosystems: A qualitative and quantitative assessment of this relationship in the Pampa region, Argentina. *Environmental Management* 53(3):606-619.
- Rositano, F., y D.O. Ferraro. 2017. Una nueva aproximación metodológica basada en redes conceptuales y redes probabilísticas para evaluar la provisión de servicios de los ecosistemas. *Ecología Austral* 27:10-17.
- Satorre, E.H. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia Hoy* 15:24-31.
-