



# Índice de Calidad de Agua aplicado a sistemas agrícolas

Gabriela Eguren <sup>a</sup>, Noelia Rivas-Rivera <sup>a</sup>, Claudio García<sup>b</sup>, Bernardo Böcking<sup>c</sup>,  
Santiago Bandeira<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales – Facultad de Ciencias, Uruguay,*  
*eguren67@gmail.com, noeriv@gmail.com*

<sup>b</sup> *Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria cgarcia@inia.org.uy*

<sup>c</sup> *Los Tordos S en C. bbocking@ganaderas.com.uy, sbandeira@ganaderas.com.uy*

## RESUMEN

La producción agrícola en Uruguay ha experimentado una importante expansión e intensificación, principalmente asociadas al aumento de la producción de soja. En lo que refiere al sector arrocerero, han comenzado a incorporarse a las rotaciones arroz-pasturas otros cultivos de verano, pero aún no se cuenta con suficiente información sobre sus posibles efectos a nivel de la calidad de agua. El objetivo de este estudio fue desarrollar un índice de calidad de agua para evaluar el impacto de la diversificación de los sistemas de producción de arroz en el Noroeste de Uruguay. Para ello se trabajó en una cuenca agropecuaria donde se han incorporado cultivos de maíz, soja y sorgo a la rotación arroz-pasturas. Las muestras de agua fueron recolectadas aguas abajo del área de producción previo a la siembra y luego de la cosecha de 5 zafras. Las variables contempladas en el índice de calidad de agua son: demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, fósforo total, coliformes fecales y sólidos suspendidos totales. Con los resultados obtenidos, se considera que el índice desarrollado constituye una herramienta para evaluar la calidad del agua en cuencas agropecuarias, así como para la selección de secuencias agrícolas que generen un menor impacto en los recursos hídricos.

**PALABRAS CLAVE:** Índice de calidad de agua, intensificación agrícola, índice de diversificación de cultivos, agricultura sustentable

## 1 INTRODUCCIÓN

En Uruguay, a partir del año 2002, comienza a observarse un cambio en el sistema de producción agrícola asociado principalmente a dos fenómenos: agricultura continua: pasando de secuencias con cultivos de invierno y pasturas en verano, a secuencias con cultivos en ambas estaciones, y veranización de la agricultura: pasando de una agricultura mayoritariamente basada en cultivos de invierno a una basada en cultivos de verano [1]. Este cambio en la matriz productiva comenzó a manifestarse en el litoral Oeste debido a la aptitud de los suelos y, recientemente se ha ido expandido hacia nuevas zonas no tradicionalmente agrícolas que presentan mayor riesgo de erosión, menor fertilidad natural y potencial degradación de cursos de agua.

La pérdida de fertilidad es compensada con la incorporación de capital adicional al sistema de producción, mediante el aumento de la fertilización, para mantener y/o incrementar los beneficios [2, 3, 4]. En tal sentido, entre el 3 y el 20% fósforo y cerca del 20% del nitrógeno que ingresa a los sistemas agrícolas por fertilización son exportados principalmente por erosión y lixiviación hacia cursos de agua superficiales, pudiendo generar procesos de eutrofización [5, 6, 7]. A nivel nacional, este proceso se observa claramente, y la frecuencia e intensidad de las floraciones de algas y cianobacterias en los ríos Uruguay, Negro y Santa Lucía están en constante aumento [8]. Por lo tanto, el actual uso agrícola del suelo puede representar una amenaza para los ecosistemas acuáticos que afectan el servicio ecosistémico "provisión de agua limpia" [9].

Según las encuestas arroceras a partir de la zafra 2010/11 las hectáreas destinadas a la producción de arroz han ido disminuyendo, registrándose en la zafra 2014/2015 un descenso de 18%. En cuanto a la diversificación del sector, los arroceros puros (rotación arroz-pasturas) en el año 2010 significaban un 60% de los productores arroceros, mientras que en el año 2014 el porcentaje se revierte y un 63% de los productores arroceros incluyeron nuevos cultivos en las rotaciones. Esto fue acompañado por un descenso del 10% en la siembra de pasturas sobre los rastrojos de arroz entre ambos años [10, 11].

Dado que se trata de un cambio instalado, pero reciente, los potenciales efectos ambientales de los procesos de intensificación y diversificación de secuencias agrícolas en sistemas de producción de arroz no son bien conocidos. Varios autores han reportado alteraciones en propiedades fisicoquímicas y biológicas del agua superficial y del suelo [12, 13, 14, 15]. Por tanto, el principal objetivo de este trabajo fue desarrollar y validar un índice para evaluar el impacto de la diversificación de secuencias agrícolas sobre la calidad de agua.

Para evaluar el grado de intensificación agrícola han sido propuestos los indicadores de intensificación de la secuencia (IIS) y de intensificación agrícola (IIA) y el índice de diversificación de cultivos (IDC). Estos índices e indicadores consideran la relación entre número de cultivos/superficie agrícola y tiempo de duración de la secuencia, superficie total cultivada (invierno y verano)/área agrícola y número de cultivos/área ocupada por cada cultivo, respectivamente [16, 17, 18, 19, 20, 21].

Con respecto a la valoración de la calidad de agua, una de las estrategias mayormente utilizadas es la construcción de índices basados en un conjunto de variables fisicoquímicas y microbiológicas que reflejan la aptitud de uso de los cursos de agua superficial. Estos índices, elaborados como combinación de la totalidad de las variables medidas, pueden expresarse en forma numérica o de rango de color y facilitan la interpretación, lo que es indispensable a la hora de la toma de decisiones [22, 23, 24, 25, 26].

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio y diseño de muestreo

El estudio fue desarrollado en la cuenca del arroyo Del Tala en el departamento de Salto (entre S 30°15' W 57°23' y S 31°07' W 57°18'). El sistema de producción ocupa aproximadamente 5000 ha e incluye cultivos de verano (arroz, soja, maíz y sorgo) y pasturas (ganado bovino y ovino) con prácticas de manejo sin laboreo incluyendo riego suplementario en algunos cultivos y pasturas. La tabla 1 muestra el área ocupada por cada cultivo en cada zafra analizada.

Tabla 1. Secuencias de cultivos por zafra. Los datos son expresados en hectáreas

Cultivo	Zafra				
	2008-09	2009-10	2010-11	2016-17	2017-18
Arroz	590	533	930	781	520
Soja	0	1277	1368	1466	1782
Maíz	340	0	0	230	200
Sorgo	1391	1078	740	373	228
Pasturas	1146	589	429	611	737

Se realizaron un total de diez campañas para la colecta de muestras de agua en un punto aguas abajo al sistema productivo (Figura 1) previo a la siembra de cultivos de verano (setiembre 2008, 2009, 2010, 2016 y agosto 2017) y finalizada la cosecha (junio 2009, abril 2010, mayo 2011, 2017 y 2018).

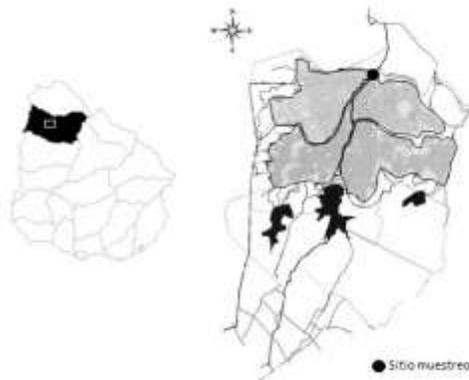


Figura 1. Área de estudio y sitio de muestreo

El diseño de muestreo se basa en la toma de 10 mediciones in situ mediante sonda (Multiparametric Probe YSI Professional Plus) a lo largo de 100 metros de los siguientes parámetros: conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), acidez (pH), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y oxígeno disuelto ( $\text{mg}/\text{L}$ ). Así mismo se colectaron por triplicado muestras de agua subsuperficial, las cuales fueron preservadas a  $4^{\circ}\text{C}$  para su análisis en el laboratorio donde se determinaron sólidos totales en suspensión ( $\text{mg}/\text{L}$ ), fósforo total y nitratos ( $\mu\text{g}/\text{L}$ ), demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{mg}/\text{L}$ ), coliformes fecales (UFC/100 mL) [27, 28].

## 2.2 Índice de Calidad de Agua

La selección de las variables para la construcción del índice fue realizada teniendo en cuenta los potenciales efectos sobre la calidad de agua, su relación con el manejo de los cultivos y la legislación nacional (Decreto 253/79, Uruguay). Por lo expuesto, el índice propuesto incluyó las variables: demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, fósforo total, coliformes fecales y sólidos totales en suspensión. Previo al cálculo, se construyó una tabla de normalización de 0 a 100 de las variables seleccionadas. Teniendo en cuenta los valores de la normativa (Decreto 253/79, Uruguay) se estableció el valor de normalización 50 para el uso como riego.

Considerando que todas las variables se ponderaron de igual manera, se aplicó la ecuación (1), modificada de Pesce y Wunderlin (2000):

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i)}{n} \quad (1)$$

donde  $n$  = número total de variables; y  $C_i$ : valor asignado a la variable  $i$  de la normalización. Este índice varía entre 0 y 100, a mayor valor del índice mayor es la calidad del agua.

## 2.3 Índice de Diversificación de Cultivos

En base a la información proporcionada por los encargados de los establecimientos, se calculó el Índice de Diversificación de Cultivos (IDC) propuesto por Mukherjee (2015), siguiendo la siguiente ecuación (2):

$$IDC = 1 - \sum \left( \frac{p_i}{\sum p_i} \right)^2 \quad (2)$$

donde  $p_i$  es el área del cultivo  $i$ . Este índice varía entre 0 y 1, siendo 1 la mayor diversificación alcanzable.

## 3 RESULTADOS

Todos los valores del ICA fueron superiores a 50 (Tabla 2), por lo que se considera que el curso tiene una calidad de agua aceptable para su uso en riego durante todo el período analizado.

Tabla 2. Índice de Calidad de Agua (ICA) para cada muestreo. Se presenta la media (rango de datos).

Muestreo	Zafra				
	2008-09	2009-10	2010-11	2016-17	2017-18
Pre siembra	81 (78 - 84)	71 (70 - 72)	70	80	77 (76 - 78)
Post cosecha	69 (68 - 70)	69 (68 - 70)	67 (66 - 68)	64	73 (72 - 76)

Analizando los datos temporalmente, entre pre siembra y post cosecha, se observa que los valores previo al inicio de la zafra son significativamente mayores que al terminar la misma ( $p = 0.0003$ , Mann-Whitney U test). Esto es consistente con lo esperado ya que en ese período se incluye la aplicación de fertilizantes lo que puede incrementar, entre otros, los valores de nutrientes en el curso de agua.



La tabla 3 muestra los valores del IDC para cada zafra analizada. Se realizó un análisis de correlación de Spearman considerando los valores de dicho índice con los de post cosecha del ICA, la cual mostró que ambos presentan una fuerte correlación inversa ( $p = 0.000012$ ,  $r = -0.79$ ). Considerando la importancia del valor de fósforo en la variabilidad del ICA, es probable que esta correlación esté determinada por la variación en la fertilización fosforada como resultado de la variación en el área sembrada [29, 30, 31].

Tabla 3. Valores del Índice de Diversificación de Cultivos (IDC) para cada zafra analizada. Para evaluar el impacto al final de la zafra, se comparó este índice con el Índice de Calidad de Aguas de la post cosecha (ICA PC).

	Zafra				
	2008-09	2009-10	2010-11	2016-17	2017-18
IDC	0,55	0,63	0,64	0,64	0,53
ICA PC	69	69	67	64	73

#### 4 CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos puede concluirse que el índice propuesto refleja los cambios en las secuencias agrícolas, así como en las variaciones de área ocupada por cada cultivo. Así mismo permite diferenciar temporalmente entre los momentos de pre siembra y post cosecha. Por tanto, puede considerarse como una herramienta útil para la evaluación de la calidad de agua en cuencas agrícolas, permitiendo seleccionar aquellas secuencias que generen el menor impacto en los recursos hídricos.

En cuanto a la extrapolación del índice desarrollado, se considera puede ser aplicado en toda la región biogeográfica “Praderas del Río de la Plata” la cual comprende a Uruguay, región Centro-Este de Argentina y Sur de Brasil, ya que comparten características físicas y prácticas de manejo agronómicas. Obviamente requiere el ajuste a la normativa de cada país al momento de asignar los rangos de normalización de las variables.

En lo que refiere al curso evaluado, si bien los valores obtenidos indican que la calidad de agua del mismo es aceptable para uso en riego, los valores de fósforo total exceden los máximos permitidos en la normativa ( $25 \mu\text{g/L}$ ). Por tanto, las prácticas de manejo agronómicas de los cultivos, así como la selección de las secuencias futuras deberán focalizarse en la reducción de pérdidas de fósforo.

#### 5 AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo contó con la financiación del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria y de la Fundación para el Desarrollo de las Ciencias Básicas.

#### 6 REFERENCIAS

- [1] Arbeletche, P., Ernst, O., & Hoffman, E. (2010). La agricultura en Uruguay y su evolución. En: Intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural. Capítulo 1. García Prechac, F (ed.). CSIC –FAGRO-UDELAR. Uruguay. 13-17
- [2] Perez Bidegain, M., García Prechac, F., Hill, M., & Clerici, C. (2010). La erosión de suelos en sistemas agrícolas. En: Intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural. Capítulo 3. García Prechac, F (ed.). CSIC –FAGRO-UDELAR. Uruguay
- [3] Oyhančabal, G., & Narbono, I. (2012). Valorización del balance de N y P de la soja en Uruguay. Revista

- Iberoamericana de Economía Ecológica 19: 54- 65
- [4] Withers, P.J.A., Neal, C., Jarvie, H.P., & Doody, D.G. 2014. Agriculture and Eutrophication: Where Do We Go from Here? *Sustainability* 6: 5853-5875
- [5] De la Fuente, E., & Suárez, S.A. (2008). Problemas ambientales asociados a la actividad humana: la agricultura. *Ecología Austral* 18: 239-252
- [6] Oesterheld, M. (2008). Impacto de la agricultura sobre los ecosistemas. *Fundamentos ecológicos y problemas más relevantes. Ecología Austral* 18: 337-346
- [7] Sharpley, A. (2010). Manejo de fósforo en sistemas de producción agrícola ambientalmente sustentables: Desafíos y oportunidades. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 46: 1-9
- [8] DINAMA-MVOTMA. 2013. Informe del Estado del Ambiente en Uruguay.
- [9] Fisher, B., Turner, R. K., Morling, P. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economic* 68:643-653
- [10] DIEA. (2010). Encuesta de arroz zafra 2009/2010. Serie encuestas N°291. División de Estadísticas Agropecuarias. Ministerio de ganadería, agricultura y pesca.
- [11] DIEA. (2014). Encuesta arroz. Zafra 2013/14. Serie encuestas N°322. División de Estadísticas Agropecuarias. Ministerio de ganadería, agricultura y pesca.
- [12] Caride, C., Piñeiro, G., & Puelo, J. M. (2012). How does agricultural management modify ecosystem services in the argentine pampas? The effects on soil C dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, 23–33.
- [13] Cruse, R., Wang, E., Lee, S., & Chen, X. (2014). Agriculture and water quality. In A. Satinder (Ed.), *Comprehensive water quality and purification. Volume 4: Sustainability of water quality* (pp. 42–56). Elsevier Inc.
- [14] Nishida, M. (2016). Decline in fertility of paddy soils induced by paddy rice and upland soybean rotation, and measures against the decline. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 50(2), 87–94.
- [15] Novelli, L. E., Caviglia, O. P., & Melchiori, R. J. M. (2011). Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma*, 167–168, 254–260.
- [16] DIEA. (2016). Anuario estadístico agropecuario 2016.
- [17] Farahani, H. J., Peterson, G. A., & Westfall, D. G. (1998). Dryland cropping intensification: a fundamental solution to efficient use of precipitation. *Advances in Agronomy*, 64, 197–223.
- [18] Kumar, S., & Gupta, S. (2015). Crop diversification towards high value crops in India: a state level empirical analysis. *Agricultural Economics Research Review*, 28(2), 339–350.
- [19] Monzon, J. P., Mercuro, J. L., Andrade, J. F., Caviglia, O. P., Cerrudo, A. G., Cirilo, A. G., Vega, C. R. C., Andrade, F. H., & Calviño, P. A. (2014). Maize-soybean intensification alternatives for the pampas. *Field Crops Research*, 162, 48–59.
- [20] Mukherjee, A. (2015). Evaluation of the policy of crop diversification as a strategy for reduction of rural poverty in India. *Poverty Reduction Policies and Practices in Developing Asia*, Chapter, 7, 125–143.
- [21] Novelli, L. E., Caviglia, O. P., Wilson, M. G., & Sasal, M. C. (2013). Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a vertisol and a Mollisol. *Geoderma*, 195–196, 260–267.
- [22] Pesce, S. F., & Wunderlin, D. A. (2000). Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba city (Argentina) on Suquia River. *Water Research*, 34(11), 2915–2926.
- [24] Gonzaga De Toledo, L., & Nicoletta, G. (2002). Índice de qualidade de agua em microbacia sob uso agrícola e urbano. *Scientia Agricola*, 59(1), 181–186.
- [25] Debels, P., Figueroa, R., Urrutia, R., Barra, R., & Niell, X. (2005). Evaluation of water quality in the Chillan River (Central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 110, 301–322.
- [26] Ray, S., Bari, S., & Shuvro, S. (2015). Assessment of water quality of Goalichara : a water quality index based approach. *ARPN Journal of Science and Technology*, 5(7), 336–340.
- [27] APHA. (1995). In M. A. H. Franson, A. E. Greenberg, J. J. Connors, & D. Jenkins (Eds.), *Standard methods for examination of water and waste water* (15th ed.). Washington.
- [28] Monteiro, M. I. C., Ferreira, F. N., De Oliveira, N. M. M., & Avila, A. K. (2003). Simplified version of the sodium salicylate method for analysis of nitrate in drinking waters. *Analytica Chimica Acta*, 477(1), 125–129.
- [29] Cuffney, T. F., Meador, M. R., Porter, S. D., & Gurtz, M. E. (2000). Responses of physical, chemical, and biological indicators of water quality to a gradient of agricultural land use in the Yakima river basin, Washington. *Environmental Monitoring and Assessment*, 64, 259–270.
- [30] Sande, P., Mirás, J. M., Vidal, E., & Paz, A. (2005). Formas de fósforo y su relación con la erosión en aguas superficiales bajo clima atlántico. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, VII, 125–130.
- [31] Sharpley, A. (1995). Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff. *Journal of Environment Quality*, 24, 947–951.