



AGENCIA NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
E INNOVACIÓN

Informe final del proyecto Evaluación temporal y espacial del impacto del cambio de cobertura del suelo sobre la calidad del agua: cuenca del río Santa Lucía como cuenca piloto

Código de proyecto ANII: FSDA_1_2018_1_153967

25/06/2021

PASTORINI RODRIGUEZ, Marcos (Investigador)

RODRÍGUEZ NUÑEZ, Rafael (Investigador)

FOSSATI PIÑEYRUA, Mónica (Investigador)

GORGOGNONE, Angela (Responsable Técnico - Científico)

RIOS, Agustín (Investigador)

CASTRO CASALES, Alberto Andrés (Co-Responsable Técnico-Científico)

CHRETIES CERIANI, Christian (Investigador)

ETCHEVERRY VENTURINI, Lorena (Investigador)

FACULTAD DE INGENIERÍA (Institución Proponente)



Resumen del proyecto

En las últimas décadas, en Uruguay, se han producido cambios significativos de uso del suelo como resultado de la intensificación y expansión de las actividades agropecuarias e industriales. Estas actividades, muchas veces realizadas sin considerar la protección del medio ambiente, han generado severos daños a la conservación de los ecosistemas acuáticos del país en general, y a la calidad del agua en particular. La cuenca del río Santa Lucía constituye uno de los sistemas hidrográficos más importantes del país porque representa la fuente de agua potable para más de la mitad de la población nacional, además de ser una fuente de agua de riego para la zona de actividad agroindustrial más intensa del país. Desde 2004, año de comienzo del registro de información sistemático de calidad de agua, el río Santa Lucía sufre una progresiva eutrofización, alcanzando niveles elevados de fósforo total. El desafío es por lo tanto desarrollar en la cuenca actividades productivas relevantes para el desarrollo económico del país preservando la calidad de los cuerpos de agua y evitando la afectación de otras actividades como la potabilización de aguas o la preservación de ecosistemas relevantes como los humedales del río Santa Lucía. Basándonos en lo anterior, este proyecto propone utilizar algoritmos de aprendizaje automático no supervisados para investigar las correlaciones entre los cambios en el uso del suelo y/o cobertura del suelo, y los parámetros físico-químicos de calidad del agua. Como resultado, se crearán conocimientos fundamentales para diseñar estrategias efectivas para disminuir la contaminación del agua debido al cambio en el uso del suelo a lo largo del tiempo. El enfoque metodológico desarrollado por este trabajo no será específico para el lugar de estudio, sino que será aplicable en otras cuencas donde se aborden problemáticas similares a las aquí planteadas.

Introducción

La calidad del agua tiene un rol esencial en la salud pública y en la conservación de los ecosistemas [1]. El agua limpia, segura y fresca es un recurso clave para el desarrollo humano, social y económico [2]. Sin embargo, la degradación de la calidad del agua resultante de fuentes de contaminación puntuales y difusas es un problema ambiental mundial [3]. Las fuentes puntuales son aquellas a las que se puede atribuir una ubicación física específica, como por ejemplo las tuberías de descarga de aguas residuales domésticas o industriales. En contraste, las fuentes difusas no tienen identificado un origen puntual [4]. Las principales fuentes no puntuales incluyen lavado de tierras rurales (sedimentos, fertilizantes, microorganismos y pesticidas), lavado de áreas urbanas (aceites, grasas, químicos tóxicos, metales pesados, patógenos y sedimentos), deposición atmosférica (químicos tóxicos, metales pesados, nutrientes y ácidos) y filtración de aguas subterráneas (nutrientes y químicos tóxicos). En los últimos años se ha descubierto que en muchos casos de estudio la fuente dominante de contaminantes son justamente las fuentes difusas [4], las cuales a su vez son más difíciles de gestionar que las fuentes puntuales y presentan el mayor desafío en, por ejemplo, la gestión de cuencas [5]. El transporte de los contaminantes difusos ocurre a través de la superficie terrestre mediante la escorrentía y a través del suelo mediante la percolación. Por esta razón, este tipo de contaminación es intermitente y está fuertemente correlacionada con la escorrentía, los factores climáticos y las características específicas del sitio, como el tipo de suelo, el uso del suelo y la topografía [6]. Como consecuencia, la transformación de suelos naturales a diferentes usos (plantación forestal, cultivos regados, entre otros) aumenta la generación y transmisión de contaminantes a los cuerpos de agua receptores [7]. Este es un fenómeno que está ocurriendo particularmente en los países en vías de desarrollo, los cuales están experimentando un proceso de expansión e intensificación agrícola, como Uruguay [8]. A nivel nacional, el aumento de las actividades agrícolas, forestales y lácteas genera problemas de eutrofización y el deterioro de la calidad del agua de los ríos, embalses y zonas costeras. Varios estudios indican que este proceso se está produciendo rápidamente, causando serios problemas de salud en los ecosistemas terrestres y acuáticos [9], así como también en el uso de los cuerpos de agua para actividades de pesca, recreación y suministro de agua potable [10, 11, 12]. Una de las principales consecuencias de la eutrofización son las floraciones de cianobacterias potencialmente tóxicas. Estos eventos se han registrado en varios cuerpos de agua en las principales cuencas del país [13, 14, 15]. Distintos estudios han provisto un análisis exhaustivo del estado actual de la eutrofización de los principales ecosistemas nacionales [16, 17]. Sin embargo, no hay estudios que profundizan el conocimiento de cómo y en qué cantidad los cambios de uso del suelo afectan la calidad de agua. Varios estudios internacionales han investigado la asociación entre los cambios en el uso del suelo y la calidad del agua [18, 19, 20]. Estos estudios se pueden clasificar principalmente en dos grupos: (i) estudios comparativos, donde se usan datos de series temporales para investigar los impactos que los cambios en el uso del suelo tienen sobre la calidad del agua; y (ii) estudios de simulación, donde se emplean técnicas estadísticas para establecer relaciones entre los cambios en el uso del suelo y la calidad del agua. Aunque los resultados de los estudios comparativos proporcionan conocimientos esenciales, pueden resultar inadecuados para el diseño de estrategias efectivas que mitiguen los impactos adversos de las

actividades antropogénicas en la calidad del agua. La metodología de comparación simple utilizada en los estudios comparativos carece de la capacidad para describir asociaciones causales sólidas entre los indicadores de calidad del agua y sus factores influyentes. Por otro lado, los estudios de simulación utilizan en su mayoría datos relacionados con el uso del suelo y los indicadores de calidad del agua obtenidos en un solo momento para justificar sus hallazgos. Si bien estos datos permiten comparar la influencia de varios factores sobre la calidad del agua en un momento dado, tales datos no facilitan la evaluación de los cambios potenciales en la calidad del agua. En consecuencia, los estudios de simulación no tienen un uso potencial para diseñar estrategias efectivas para reducir la contaminación del agua debido a los cambios en el uso del suelo a largo plazo [21]. Asimismo, en los últimos años, la utilización de técnicas de aprendizaje automático en el contexto de las ciencias ambientales viene tomando un fuerte impulso [22, 23, 24, 25, 26]. Principalmente, se han utilizado algoritmos de aprendizaje automático supervisado, en particular predictores y clasificadores. En general, el objetivo ha sido utilizar los datos de las series temporales para crear "estudios de simulación" donde los modelos de cantidad y calidad de agua clásicos no son capaces de resolver problemas con alta complejidad de datos. De todos modos, particularmente a nivel nacional, aun no se han explotado los métodos de aprendizaje automático para buscar las correlaciones subyacentes entre los diferentes factores naturales y antrópicos, y así estudiar los procesos ambientales de una manera holística. Basándonos en la importancia del problema de la contaminación hídrica y en su relevancia a nivel nacional para las instituciones y para la población local, este proyecto tiene como objetivo general, crear una nueva metodología de estudio, en la cual se utilizarán datos de series temporales, datos geográficos y técnicas de aprendizaje automático para investigar las correlaciones entre los cambios en el uso del suelo y/o cobertura del suelo (LULC, por su sigla en inglés), y los parámetros físico-químicos de calidad del agua. Este nuevo enfoque será capaz de: 1. describir las relaciones críticas entre los indicadores de calidad del agua y sus factores influyentes; 2. tener en cuenta los múltiples factores que influyen a la calidad del agua y sus posibles efectos combinados; 3. evaluar los cambios potenciales en la calidad del agua. Como resultado de este nuevo enfoque, se podrá crear conocimientos fundamentales para diseñar estrategias efectivas para disminuir la contaminación del agua debido al cambio en el uso del suelo a largo plazo.

Metodología/diseño del estudio

A continuación, se describe con detalle la metodología, incluyendo técnicas y herramientas, que se utilizaron en el marco de este proyecto para abordar las problemáticas descritas anteriormente y lograr los cuatro objetivos específicos (OEs).

OE1. Relevar las principales fuentes de datos, y proceder a la evaluación de su calidad, aplicando herramientas de depuración para obtener datos integrados. Para llevar adelante el OE1, se realizó un relevamiento exhaustivo de todas las fuentes de datos disponibles y relevantes: datos de calidad de agua (DINAMA), datos hidrológicos (DINAGUA), datos meteorológicos (INUMET e INIA). Luego, se aplicaron técnicas de data profiling para diagnosticar la calidad de los mismos, buscando detectar valores faltantes, datos inconsistentes, problemas de precisión de los datos, entre otros. Se procedió, a continuación, a diseñar y aplicar técnicas para el mejoramiento de la calidad de los datos disponibles, las cuales incluyeron el uso de métodos de aprendizaje automático. Por último, se procedió a integrar los datos y disponibilizar los mismos en formatos abiertos. Más detalle sobre la metodología desarrollada para la imputación de las variables ambientales consideradas en este proyecto se puede encontrar en el Capítulo 2 del Informe Técnico adjunto.

OE2. Evaluar los cambios temporales y espaciales de LULC en la cuenca del río Santa Lucía para el período dado por los años 2000, 2008, 2011 y 2015 en base a los datos disponibles del MVOTMA. En este contexto, la disponibilidad de datos espaciales en diferentes intervalos de tiempo (seis en nuestro caso) es útil para detectar con eficacia los cambios más o menos rápidos en el uso del suelo. Como primer paso, se detectaron los usos de suelo dominantes de la cuenca de estudio por cada año (2000, 2008, 2011, 2015, 2016 y 2018). A continuación, se calculó el porcentaje de cada uso y se evaluó su variación temporal con la ayuda de diferentes representaciones gráficas y su variación espacial con la ayuda de la herramienta de sistema de información geográfica (GIS, por su sigla en inglés). Considerando que la sobreposición de información calidad de agua y uso del suelo existe a partir del 2014, para la alcanzar el OE4, se consideraron solo los mapas del 2015, 2016 y 2018. Sin embargo, a causa de la baja calidad del mapa del 2015 y de la diferente clasificación del mapa del 2016, se encontró la necesidad de generar nuevos mapas de uso del suelo. Se generaron cuatro mapas (2014, 2016, 2018, 2020) con la herramienta Google Earth Engine, utilizando imágenes satelitales y en mapa del 2018 como "ground truth". A partir de esos mapas, también se evaluaron los cambios temporales y espaciales de LULC. Más detalle sobre los mapas disponibles y generados y la variación temporal y espacial de las clases de uso del suelo, se puede encontrar en el Capítulo 3 del Informe Técnico adjunto.

OE3. Analizar la variabilidad temporal y espacial de los parámetros de calidad del agua físico-química en la cuenca hidrográfica del río Santa Lucía a partir de los datos recopilados por la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA - MVOTMA). Para una comprensión general de cómo la calidad del agua superficial varía espacialmente, utilizamos herramientas numéricas y geográficas/visuales. Se calcularon los estadísticos (min, media, mediana, max, etc.) de la concentración de contaminantes para representar el estado general de la calidad del agua durante el período de monitoreo. Utilizando la herramienta GIS, se realizó una aplicación donde se muestra una gráfica animada con los valores de una variable en cada estación sobre el mapa de la cuenca del río Santa Lucía Chico. Para identificar la existencia de una tendencia temporal de cada variable, en primera instancia, se comparó de manera gráfica el comportamiento en cada estación de medición (considerando los datos originales e imputados) en todo el período de medición, además, se graficaron los datos por año en forma de boxplot. Además se hizo un análisis de estacionalidad por cada variable y se analizó su descomposición para evaluar su tendencia, estacionalidad y residuos. Los resultados se

compararon entre las estaciones de muestreo de calidad de agua. Más detalle sobre estos análisis se puede encontrar en el Capítulo 4 del Informe Técnico adjunto. OE4. Evaluar las relaciones entre las categorías definidas por LULC con las variables de calidad del agua en sitios críticos de la cuenca del río Santa Lucía. Para lograr este objetivo, se calcularon diferentes coeficientes de parche, clase y paisaje para obtener una representación numérica del uso del suelo. Se utilizó la herramienta FRAGSTAT para este cometido. Para descubrir y comprender cuáles son las relaciones entre LULC y las variables de calidad del agua utilizamos algoritmos de aprendizaje automático supervisados. Dada la alta complejidad de los datos, reducimos la dimensión del problema de manera de poder realizar un primer estudio visual de los datos. Para esto, utilizamos una técnica lineal más simple (Partial Least Squares Error (PLSR)) y un modelo no-lineal de caja blanca (Random Forest (RF)) y comparamos los resultados. Además, se calculó la importancia de los índices de uso del suelo en la calidad de agua en los dos modelos. La herramienta SHAP se utilizó para este propósito. Más detalle sobre estos análisis se puede encontrar en el Capítulo 5 del Informe Técnico adjunto.

Resultados, análisis y discusión

Los resultados más importantes del proyecto se pueden sintetizar como sigue: • OE1: Se logró desarrollar una metodología híbrida (con técnicas de aprendizaje automático alimentadas de información físicamente basada) para la imputación de las diferentes variables ambientales consideradas en este proyecto. Dichas variables, además de las variables de calidad de agua, incluyen también las variables hidrológicas y meteorológicas, las cuales se utilizaron como “variables de ayuda” para la imputación de las variables de calidad de agua basándonos en las correlaciones calculadas y en los procesos físicos a escala de cuenca. El diagrama de flujo de la metodología desarrollada, con su descripción detallada, se encuentra en el Informe Técnico (Fig. 2.10). Dicha metodología se ejecutó 78 veces (una iteración por cada una de las variables donde se detectaron valores faltantes); al concluir el proceso de imputación, se obtuvo un conjunto de modelos capaces de imputar de la mejor forma posible cada serie temporal. Para la selección de las mejores imputaciones se usó la métrica NSE como función objetivo y, para validar los resultados, se usaron las métricas KGE y PBIAS. La mayoría de las variables presenta un NSE positivo, o sea, el modelo aquí desarrollado para su imputación tiene un mejor desempeño de la media observada. Además, se puede destacar que más del 75% de las variables presentan un $NSE > 0.5$. El KGE y el PBIAS confirman los buenos resultados obtenidos con el NSE. En particular, KGE muestra una distribución similar a la obtenida con el NSE y el |PBIAS| presenta valores menores de 15 para el 75% de las variables, confirmando los muy buenos resultados obtenidos. El modelo IDW fue el mejor para 27 variables, seguido del modelo de ensamble Huber Regressor + SC (conjunto de datos modificado según la distancia de las estaciones) usado para 9 variables. • OE2: Los cambios temporales y espaciales de LULC en la cuenca del río Santa Lucía Chico fueron abordados por diversos mapas generados por fuentes distintas para los años 2000, 2008, 2011, 2015, 2016 y 2018. Estas diferencias en fuentes, en algunos casos, implicaron diferencias en metodologías de elaboración de mapas. Una primera aproximación para salvar la diferencia metodológica de los mapas fue definir categorías de uso de suelo comunes para unificar las distintas categorías definidas en los mapas, de esta forma se definieron las clases: Área desnuda, Área natural inundable, Cuerpos de agua, Cultivos, Forestal, Herbáceo natural, Monte nativo y Urbanización. Se constató que la diferencia entre metodologías de generación de mapas dificulta sobre todo evaluar los cambios temporales en el uso del suelo. No obstante, las tendencias espaciales generales pueden ser bien capturadas por estos mapas. En ese sentido, se observa que la clase Herbáceo natural (55%) y Cultivos (35%) son los que dominan el paisaje de la cuenca del Santa Lucía Chico, representando en conjunto en términos medios más del 85% del área total de la cuenca. La clase Cultivos se encuentra mayormente concentrada hacia la zona suroeste, cercana a la mayor concentración y representación de las clases Urbanización y Cuerpos de agua, mientras que el Herbáceo natural predomina en la zona centro este y como “tapiz” de fondo sobre todo el paisaje. El desarrollo de Forestal se produce básicamente en la zona centro oeste con mayor consolidación en los últimos años y el Monte nativo tiene un desarrollo marcado siguiendo la principal red de drenajes de la cuenca. Para salvar las diferencias metodológicas y contar con mapas bases consistentes entre sí para investigar las relaciones de los usos del suelo con la calidad del agua, se desarrolló una metodología para la generación de mapas de uso de suelo con Google Earth Engine. Estos mapas generados para los años 2014, 2016, 2018 y 2020 indicaron buena precisión global (coeficiente kappa 0.72), siendo las clases menos representadas las que aportan mayores componentes ruidosas. Para todas las clases de los mapas generados, los cambios temporales en términos medios porcentuales son pequeñas (0,1 a 2,0%), no obstante, en términos de área para las clases más representadas (Herbáceo natural y Cultivos) se tienen cambios medios de 5000 has, mientras que las clases Forestal, Monte Nativo, Área natural inundable y Urbanización tienen cambios medios de 500 has. Las variaciones espaciales para los mapas generados indican desarrollo de la forestación en la zona noreste de la cuenca y en menor proporción en la zona centro de la cuenca, esta transformación comienza a desarrollarse en 2016 y a partir del año 2018 se encuentra consolidada. • OE3: Considerando el alto número de variables a considerar en las seis estaciones de monitoreo, se desarrolló una aplicación donde se muestran gráficamente los resultados de los diferentes análisis que se corrieron para evaluar la variabilidad espacio-temporal de las diferentes variables de calidad del agua. Esta aplicación nos permitió comparar los resultados y sacar conclusiones con más facilidad. En particular, desde el punto de vista espacial, se puede afirmar que existen dos grupos de comportamiento diferentes: los tres sitios de monitoreo ubicados en el embalse de Paso Severino muestran patrones diferentes a los que caracterizan las estaciones ubicadas aguas arriba del embalse. Además, las estaciones ubicadas en el embalse muestran valores de nutrientes más elevados de las estaciones que se encuentran en el cauce principal del río

Santa Lucía, justificando el nivel ipereutrórico detectado en el embalse por estudios anteriores. Asimismo, en la estación PS01=SLC03, ubicada aguas abalo de la ciudad de Florida, se detectaron valores elevados de Nitrógeno Total, justificando el hecho que las áreas urbanizadas son caracterizadas por diferentes fuentes de nitrógeno como, por ejemplo, deposición atmosférica, la aplicación de fertilizantes para el césped, las aguas residuales y la infraestructura de alcantarillado con fugas. Desde el punto de vista temporal, la Temperatura del Agua y el Oxígeno Disuelto son los únicos contaminantes que muestran una fuerte estacionalidad intra e interanual, mientras que no podemos identificar un patrón claro para los otros contaminantes. Del análisis de estacionalidad, la Turbidez presentó una muy leve tendencia en mostrar valores más altos en invierno, debido a la mayor escorrentía y a los eventos extremos de lluvias más intensos que determinan un desprendimiento y una exportación más importantes de las partículas del suelo al cuerpo de agua. • OE4: Considerando el alto número de escenarios a considerar, también en este caso se desarrolló una aplicación que nos permitió comparar los resultados y sacar conclusiones con más facilidad. Los resultados de los análisis desarrollados entre la relación de métricas de paisaje y calidad de agua no permiten ser concluyentes ya que no presentan significancia estadística que sustente las relaciones encontradas. No obstante, algunos resultados parecen alentadores ya que se condicen con la literatura, además, el proceso realizado deja varias enseñanzas y aprendizajes para seguir avanzando en establecer una metodología que permita orientar la búsqueda de las relaciones entre la estructura del paisaje y la calidad de agua. En este sentido, en primera instancia, se debe lograr una profunda y correcta interpretación de las métricas de paisaje y sus relaciones, a distintas escalas espaciales agregadas a nivel de clase y paisaje. Además de las métricas que surgen de la disciplina de la ecología del paisaje, es necesario explorar métricas combinadas que contemplen aspectos de la estructura del paisaje con la topografía, y, por ende, con el movimiento del agua dentro de las cuencas hidrológicas. Un aspecto positivo y distintivo que deja el análisis realizado es la utilización de técnicas lineales y no lineales (PLSR y RF, respectivamente) sobre las cuales se aplican un enfoque de la teoría de juegos (SHAP) para una mejor explicación y más fácil interpretación de los resultados. Otro aspecto importante a destacar es la posibilidad de incorporar la interdisciplinariedad, en particular, en el dominio de las ciencias biológicas y naturales, para lograr una comprensión funcional y sistémica del paisaje más profunda.

Conclusiones y recomendaciones

A partir del análisis de los datos disponibles, el objetivo principal de este proyecto fue la evaluación de cómo influyen los cambios en el uso del suelo en la calidad del agua de la cuenca del río Santa Lucía a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos contribuirán principalmente al conocimiento de los cambios en el uso del suelo en una cuenca de rápido desarrollo con un acelerado deterioro de la calidad del agua, lo cual es usual en muchos países en vías de desarrollo como Uruguay. Este proyecto pretende ser un paso fuerte en la consolidación de la línea de investigación y desarrollo local sobre hidroinformática, donde converjan los esfuerzos de los grupos del IMFIA y del InCo. En la medida de consolidar dicha línea, los avances en este proyecto piloto que considera una cuenca prevalentemente agropecuaria con diferentes peculiaridades hidrológicas e hidráulicas permitirán prepararse de la mejor manera posible para lograr el máximo aprovechamiento para las otras cuencas semejantes del país que presentan problemáticas similares. Los usuarios directamente beneficiados de los resultados de dicha línea de investigación serán todos los productores instalados en la cuenca del río Santa Lucía, agricultores, productores lecheros, población residente, turistas, entre otros. Además, las instituciones que tienen en sus competencias aspectos de gestión vinculadas a la cuenca o recursos hídrico también se beneficiarán directamente (MGAP, DINAGUA, DINAMA, OSE, principalmente). Además del beneficio económico-social, otro aspecto importante será el aporte a la preservación y salvaguardia de los ecosistemas naturales (praderas, humedales y bosques nativos). En este sentido la sociedad en su conjunto es el beneficiario directo. El conocimiento de qué categoría de uso de suelo tiene el mayor efecto sobre la calidad de agua y de cuáles son los principales compuestos que identifican categorías específicas de uso del suelo, podrá permitir a las autoridades competentes (MVOTMA y MGAP) armar un plan de acción para formular y ejecutar las operaciones principales para controlar, detener y revertir el proceso de deterioro de la calidad de agua en la cuenca hidrográfica del río Santa Lucía.

Referencias bibliográficas

1. Shi, P., Zhang, Y., Li, Z.B., Li, P., Xu, G.C., "Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales," *Catena*, 151, 182 – 190, 2017.
2. Pérez-Gutiérrez, J.D., Paz, J.O., Tagert, M.L.M., "Seasonal water quality changes in on-farm water storage systems in a south-central U.S. agricultural watershed," *Agric. Water Manag.*, 187, 131 – 139, 2017.
3. Shoemaker, C.M., Ervin, G.N., Diorio, E.W., "Interplay of water quality and vegetation in restored wetland plant assemblages from an agricultural landscape," *Ecol. Eng.*, 108, 255 – 262, 2017.
4. Zhen-Gang Ji, "Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries," ISBN: 978-0-470-13543-3, 704 pages, 2008.
5. Xu, G., Li, P., Lu, K., Tantai, Z., Zhang, J., Ren, Z., Wang, X., Yu, K., Shi, P., Cheng, Y., "Seasonal changes in water quality and its main influencing factors in the Dan River basin," *Catena*, 173, 131 – 140, 2019.
6. Ritter, W.F., Shirmohammadi, A., "Agricultural nonpoint source pollution," ISBN: 1-56670-222-4, 2001.
7. Miller, J.D., Kim, H., Kjeldsen, T.R., Packman, J., Grebby, S., Dearden, R., "Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover," *J. Hydrology*, 515, 59 – 70, 2014.
8. Goyenola, G., Meerhoff, M., Teixeira-de Mello, F., González-Bergonzoni, I., Graeber, D., Fosalba, C., Vidal, N., Mazzeo, N., Ovesen, N.B., Jeppesen, E., Kronvang, B., "Phosphorus dynamics in lowland streams as a response to climatic, hydrological and agricultural land use gradients," *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 12, 3349 – 3390, 2015.
9. Oyhantçabal, G., Narbondo, I., "Radiografía del agronegocio sojero uruguayo," *Alternativa. Revista de Estudios Rurales*, 1, 1-30, 2014.
10. Rodríguez-Gallego, L., Achkar, M., Defeo, O., Vidal, L., Meerhoff, E., Conde, D., "Effects of land use changes on eutrophication indicators in five coastal lagoons of the Southwestern Atlantic Ocean," *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 188, 116-126, 2017.
11. Pacheco, J.P., Arocena, R., Chalar, G., García, P., González, Piana, M., Fabián, D., Olivero, V., "Evaluación del estado trófico de arroyos de la cuenca de Paso Severino (Florida, Uruguay) mediante la utilización del índice biótico TSI-BI," *Augmdomus*, 4, 80-91, 2012.
12. Arocena, R., Chalar, G., Perdomo, C., Fabián, D., Pacheco, J.P., González, M., Olivero, V., Silva, M., Etchebarne, V., "Impacto de la producción lechera en la calidad de los cuerpos de agua," *Augmdomus*, 5, 42-63, 2013.
13. Ferrari, G., Pérez, M.C., Dabezies, M., Míguez, D., Saizar, C., "Planktic Cyanobacteria in the Lower Uruguay River, South America," *Fottea*, 11, 225–234, 2011.
14. Bonilla, S., "Cianobacterias Planctónicas del Uruguay; Manual para la identificación y medidas de gestión," Montevideo: UNESCO, S. Bonilla, 2009.
15. Bonilla, S., Haakonsson, S., Somma, A., et al., "Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay," *INNOTEC*, 10(9-22), 2015.
16. AA. VV., "Water Quality in the Americas - Risks and opportunities," ISBN: En trámite, 2019.
17. Aubriot, L., Delbene, L., Haakonsson, S., Somma, A., Hirsch, F., Bonilla, S., "Evolución de la eutrofización en el Río Santa Lucía: influencia de la intensificación productiva y perspectivas," *INNOTEC*, 14, 7-16, 2017.
18. Calijuri, M.L., Castro, J. De S., Costa, L.S., Assemany, P.P., Mattos Alves, J.E., "Impact of land use/land cover changes on water quality and hydrological behavior of an agricultural subwatershed," *Environ. Earth Sci.*, 74, 5373-5382, 2015.
19. Kändler, M., Blechinger, K., Seidler, C., Pavlů, V., Šanda, M., Dostál, T., Krása, J., Vitvar, t., Štich, M., "Impact of land use on water quality in the upper Nisa catchment in the Czech Republic and in Germany," *Sci. Tot. Env.*, 586, 1316-1325, 2017.
20. Namugize, J.N., Jewitt, G., Graham, M., "Effects of land use and land cover changes on water quality in the Umngeni river catchment, South Africa," *Physics and Chemistry of the Earth*, 105, 247-264, 2018.
21. Wijesiri, B., Deilami, K., Goonetilleke, A., "Evaluating the relationship between temporal changes in land use and resulting water quality," *Env. Pollut.*, 234, 480-486, 2018.
22. Mori, N., Debeljak, B., Škerjanec, M., Simčič, T., Kandu, T.c, Brancelj, A., "Modelling the effects of multiple stressors on respiration and microbial biomass in the hyporheic zone using decision trees," *Water Research*, 149, 9-20, 2019.
23. Thornhill, I., Batty, L., Death, R.G., Friberg, N.R., Ledger, M.E., "Local and landscape scale determinants of macroinvertebrate assemblages and their conservation value in ponds across an urban land-use gradient," *Biodiversity and Conservation*, 26, 1065-1086, 2017.
24. Rosecrans, C.Z., Nolan, B.T., Gronberg, J.M., "Prediction and visualization of redox conditions in the groundwater of Central Valley, California," *Journal of Hydrology*, 546, 341-356, 2017.
25. Thornhill, I., Ho, J.G., Zhang, Y., Li, H., Ho, K.C., Miguel-Chinchilla, L., Loiselle, S.A., "Prioritising local action for water quality improvement using citizen science; a study across three major metropolitan areas of China," *Sci. Tot. Env.*, 584-585, 1268-1281, 2017.
26. Forio, M.A.E., Landuyt, D., Bennetsen, E., Lock, K., Nguyen, T.H.T., Ambarita, M.N.D., Musonge, P.L.S., Boets, P., Everaert, G., Dominguez-Granda, L., Goethals, P.L.M., "Bayesian belief network models to analyse and predict ecological water quality in rivers," *Ecological Modelling*, 312, 222-238, 2015.
27. Well, A.D., Myers, J.L., "Research Design & Statistical Analysis," 2nd Edition, Psychology Press, 2003. <https://doi.org/10.4324/9781410607034>.

Licenciamiento

Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional. (CC BY-NC-SA)

