



EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE USO DE SUELO EN UNA SUBCUENCA DEL RÍO SANTA LUCÍA UTILIZANDO EL MODELO SWAT

Eliana Nervi¹, Mercedes Gelós², Pablo Kok², Jimena Alonso³, Rafael Navas⁴, Luciana Badano², Natalia Neighbor², Florencia Hastings², R.Willem Vervoort⁵, Walter Baethgen⁶

1. Proyecto FPTA 358 Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Uruguay

2. Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Ambiente, Montevideo, Uruguay

3. Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

4. Departamento del agua, Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República, Salto, Uruguay.

5. Sydney Institute of Agriculture, The University of Sydney, Sydney NSW 2006, Australia.

6. International Research Institute for Climate and Society, Earth Institute, Columbia University, Estados Unidos.

TEMA 4: Gestión de recursos hídricos

RESUMEN

Palabras Clave: Cuenca del Río Santa Lucía, Gestión de Recursos Hídricos, SWAT, Interdisciplina

Se presenta el resultado del trabajo interinstitucional y multidisciplinario de la implementación del modelo SWAT 2012 (Soil Water Assessment Tool) (Arnold et al 2013) hacia el desarrollo de una herramienta para el apoyo en la gestión de la calidad y cantidad de los recursos hídricos. Dicho proyecto dió origen al Grupo de Modelación Integrada de Cuenca el cual funciona desde 2017 en el uso de modelos como herramientas de apoyo en la gestión integrada de recursos hídricos.

Se seleccionó la subcuenca localizada entre nacientes y Río Santa Lucía Chico (extensión de 4900 km²), dada la existencia de información de base necesaria para la implementación del modelo y su importancia a nivel nacional. El uso de suelo es representativo de toda la cuenca del Santa Lucía, e incluye lechería, ganadería, agricultura y forestación. El proyecto fue dividido en cuatro etapas: 1) recolección de datos para entrada al modelo, 2) formato y procesamiento de datos de entrada e implementación del modelo, 3) calibración y validación y 4) simulación de escenarios. El modelo fue evaluado y calibrado utilizando la herramienta SWAT-CUP (Abbaspour, et al., 2007), la cual permite realizar al mismo tiempo análisis de sensibilidad, la calibración/validación y el análisis de incertidumbre. Se calibró el caudal a paso de diario para tres estaciones de caudal en el período 2006 al 2016 y se validó el período 1995 – 1999. Luego, se procedió a la evaluación de escenarios definidos en instancias de intercambio técnico entre las partes interesadas y en base a las medidas de acción definidas para la cuenca (MVOTMA, 2018).

Se evaluó la implementación de una zona buffer y la evaluación del manejo de efluentes de la producción lechera. La implementación del modelo hidrológico SWAT sirve como primer antecedente nacional en el desarrollo de una herramienta de gestión que permitirá diseñar políticas de gestión del agua, alineadas en torno a un uso de suelo que permita alcanzar los objetivos de calidad de agua deseados.

INTRODUCCIÓN

El uso de herramientas de evaluación integrada a nivel de cuenca es de gran relevancia a la hora de evaluar procesos de toma de decisiones a nivel de cuenca. En este proceso, implementar un modelo confiable constituye uno de los mayores desafíos. En este sentido, se identificó como área de estudio a la cuenca del Río Santa Lucía, dada su importancia a nivel nacional (MVOTMA, 2018) y a la problemática relacionada a la calidad de agua existente, que ha ocasionado condiciones de eutrofización en algunos cuerpos de agua (Aubriot et al., 2018). En intercambio con agentes tomadores de decisiones e investigadores en la temática, el modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) (Arnold et al., 2012) fue seleccionado como una buena herramienta para evaluar resultados distribuidos de manera detallada

espacial y temporalmente además de permitir proponer escenarios prospectivos. Es una herramienta utilizada internacionalmente, de código abierto y con una gran comunidad de usuarios.

A partir de 2018 se trabajó en conjunto con las principales partes interesadas: instituciones gubernamentales y centros de investigación creando así un grupo multidisciplinario de capacitación y construcción de la versión del modelo SWAT 2012. Se desarrolló un marco de trabajo para la implementación de la herramienta SWAT en Uruguay (MVOTMA, MGAP, INIA, IRI, IMFIA-FING, FAGRO, Univ. Sydney), con el objetivo de darle apoyo al manejo y gestión de la calidad y cantidad de los recursos hídricos. Dicho proyecto dió origen al Grupo de Modelación Integrada de Cuenca, de conformación abierta y carácter colaborativo, con otras iniciativas en la temática, el cual trabaja actualmente en el uso de modelos como herramientas para la gestión integrada de recursos hídricos.

Para la experiencia piloto de implementación de SWAT se seleccionó la subcuenca 60 (Figura 1), localizada entre nacientes y Río Santa Lucía Chico (4900 km²) la cual cuenta con información de base necesaria para la implementación del modelo. El uso de suelo es representativo de toda la cuenca del Santa Lucía, e incluye lechería, ganadería, agricultura y forestación. Durante este trabajo, se procesaron los los primeros datos de entrada para el modelo a nivel nacional, lo cual significó un trabajo coordinado de varias instituciones para la selección, obtención, revisión y formateo de datos: monitoreo de clima, estaciones de aforo, datos de calidad de agua, etc. El trabajo del grupo fue documentado de manera que pudiera ser replicado en el futuro para otras cuencas (Mer et al, 2016).

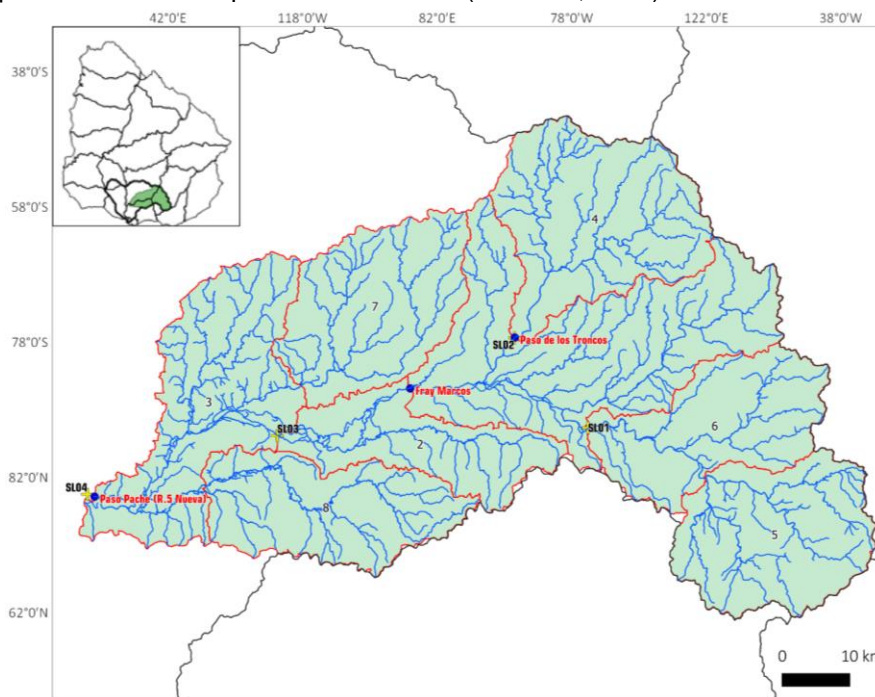


Figura 1: Ubicación de la cuenca del Río Santa Lucía entre nacientes y Río Santa Lucía Chico y de las estaciones hidrométricas en Paso Pache (4896 km²), Fray Marcos (2744 km²) y Paso de los Troncos (687 km²). Ubicación de los puntos de monitoreo de calidad de agua (DINACEA).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en relación a evaluación de escenarios, que fueron seleccionadas a partir de los planes de acción par la protección del agua propuestos en esta área (MVOTMA, 2018) con interés en el transporte de nutrientes desde el suelo y su impacto sobre la calidad del agua.



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

METODOLOGÍA

Implementación del modelo

Se implementó el modelo SWAT 2012 a paso diario entre las nacientes de la cuenca y el Río Santa Lucía Chico. El proyecto fue dividido en cuatro etapas: 1) recolección de datos para entrada al modelo, 2) formato y procesamiento de datos de entrada e implementación del modelo (1981-2016), 3) calibración y validación y 4) simulación de escenarios. Se incorporó el uso de suelo de lechería en mapa de uso de suelo y rotaciones, utilizando como base el mapa de uso del suelo del año 2000. Los detalles acerca de estos resultados y consideraciones para la implementación del modelo (suelos, uso de suelo, rotaciones y manejo) se describen en detalle en Hastings et al, 2019. En cuanto a las series de datos de entrada hidrológicos se utilizan los registros existentes de INUMET e INIA en la zona de estudio. Además se utilizan los datos observados en estaciones de aforo de cantidad de agua y de estaciones de monitoreo de calidad de agua de DINAGUA y DINAMA respectivamente. Los datos de fuentes puntuales de contaminación dentro de la subcuenca del río Santa Lucía (efluentes de origen doméstico e industrial) surgen de los Informes Ambientales de Operación (DINACEA). Para simplificar la simulación del modelo SWAT, se agrupan las cargas de aportes puntuales que estaban localizados en una misma subcuenca. Además de las industrias y ciudades, se consideró como aporte puntual los efluentes provenientes de tambos. Se utilizó la ubicación de los tambos en la cuenca del Santa Lucía para el censo 2011 y el número de cabezas de ganado en cada establecimiento. Se estimaron los aportes realizados durante el período de permanencia de los animales en la sala de ordeño en función de la cantidad de animales por establecimiento y a partir de datos teóricos de generación diaria de caudal, DBO5, NT y PT según MVOTMA-DINAMA (2008).

Calibración y validación de cantidad y calidad de agua

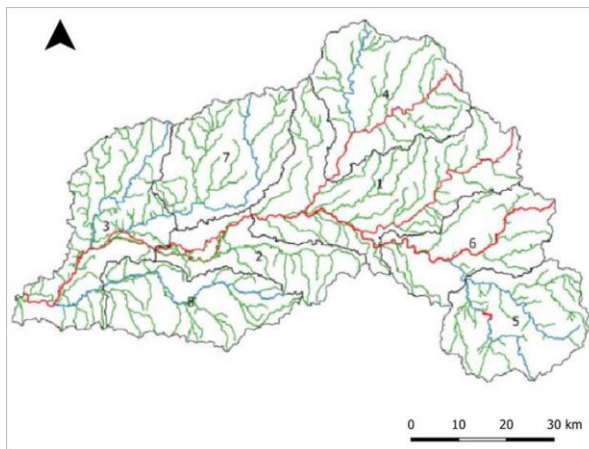
Una vez implementado el modelo, el mismo fue evaluado y calibrado utilizando la herramienta SWAT-CUP (Abbaspour et al., 2007). Se calibró el caudal a paso de diario para tres estaciones de caudal en el período 2000 al 2007 y se validó el período 1995 – 1999, utilizando un período de calentamiento de 4 años. Se realizó una calibración blanda para los datos de calidad de agua, utilizando datos observados de DINACEA.

Evaluación de escenarios

Los escenarios evaluados fueron definidos en instancias de intercambio técnico entre las partes interesadas y en base a las medidas de acción definidas para la cuenca.

Escenario I - Zona buffer: El objetivo de utilizar este escenario fue simular los posibles efectos de establecer zonas de amortiguación a lo largo de los cursos de agua para reducir la escorrentía de sedimentos, nitratos y fósforo. Se estimó la relación entre el área de cada subcuenca y el área del buffer a fin de que se cumpla con la medida de la zona de amortiguación del Plan de Acción para la Protección de la Calidad Ambiental de la Cuenca del Río Santa Lucía - Medidas de segunda generación. Las áreas buffer rojo, azul y verde corresponden a los distintos órdenes de cursos de agua y el ancho de la zona buffer es variable según el color, como se explica en dicho Plan (Figura 2). Al área buffer total se le restó el área dentro de esta franja que actualmente ya está cubierta por monte nativo, con el fin de no sobreestimar el efecto del buffer.

Escenario II - Reducción de vertidos de industrias: Se sustituyeron las estimaciones de vertido de industrias, de forma tal que, manteniendo los mismos caudales, se cumpla con los estándares de vertido del decreto 253/79 para desagües directos a cursos de agua, que es de 5 mg/L para amoníaco (N-NH₄) y fósforo total (PT). Dado que el decreto no tiene estándar para NT se tomó el mismo valor que para el amoníaco de 5 mg/L. Se modificaron los aportes de estas fuentes puntuales, y se mantuvo el aporte de tambos sin cambios. Se redujo la carga de NT y PT proveniente de origen industrial en todos los casos que superaran los 5 mg/L.



Parámetro	Descripción	Valor/Rango	Observaciones
FILTER_RATIO	Área de cuenca dividida por el área de la zona buffer	7 – 58	Definido por subcuenca con capa SIG de zona buffer DINAMA
FILTER_CON	Fracción de cuenca que drena al 10% más concentrado de la zona buffer	0.5	Basado en test con el escenario implementado en los valores por defecto
FILTER_CH	Fracción del flujo más concentrado que drena completamente canalizado.	0	Basado en test con el escenario implementado en los valores por defecto

Figura 2. Zonas buffer para la cuenca de estudio (subcuencas delimitadas en negro) y definición de parámetros del modelo.

Escenario III - Reducción de vertidos de industria lechera: El aporte de los tambos en SWAT está dividido en dos: uno es el aporte del ganado directo cuando hay pastoreo sobre verdes, pasturas o campo natural; el otro es el aporte generado en las salas de ordeño. Este aporte se agrega como una fuente puntual (dependiendo de la cantidad de vacas de ordeño del establecimiento). El criterio utilizado en los cálculos fue que en los establecimientos con menos de 100 vacas no se realiza ningún tratamiento a sus efluentes, mientras que el resto realiza un tratamiento de lagunas que remueve un 80 % de DBO5 y un 50 % de Nitrógeno total. En este escenario, se realizó el mismo procedimiento que el escenario anterior, esta vez solamente en fuentes puntuales de tambos. Se mantuvo el aporte de industrias sin cambios y se redujo la carga de NT y PT proveniente de origen tambos en todos los casos de que superasen los 5 mg/L.

En la figura 3 se describe el esquema de trabajo para la evaluación de escenarios (Figura 3)

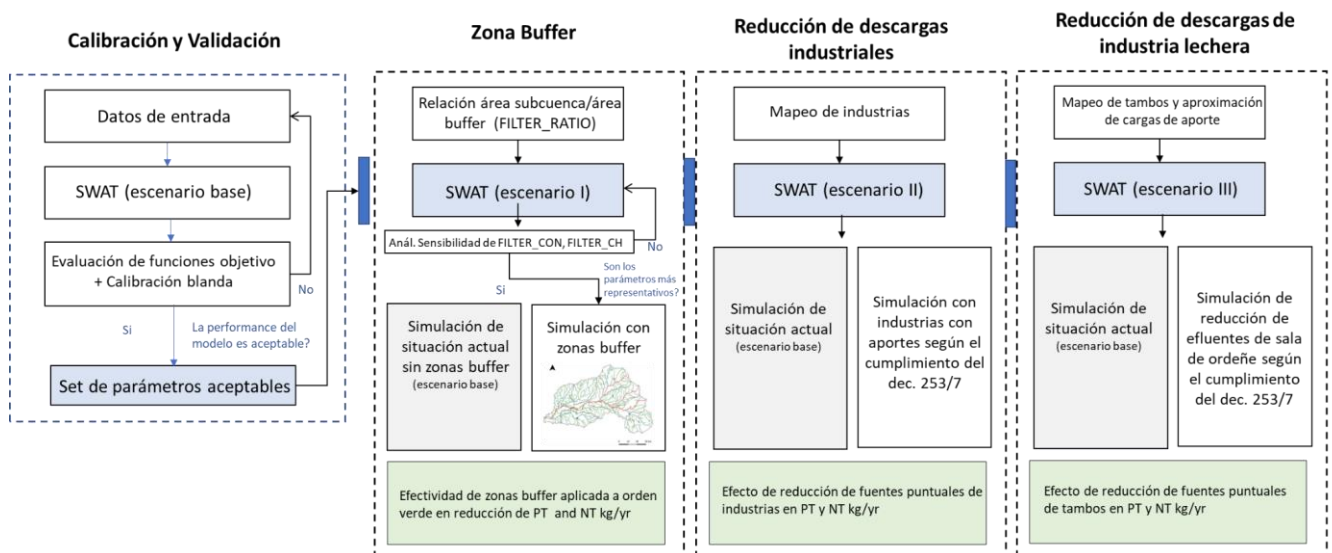


Figura 3. Metodología de calibración, validación e implementación de escenarios.



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se trabajó con el modelo de la cuenca 60 nivel 3, calibrado a paso diario en dos estaciones, con un total de 721 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) en el período 2006 al 2016 con cuatro años de calentamiento. Los valores de precipitación, evapotranspiración y evapotranspiración potencial están en el rango de valores descritos para el Uruguay. Seguidamente se validaron los resultados en el período 1995 - 1999. Como medidas de similitud entre los caudales observados y simulados se utilizó la eficiencia de Nash - Sutcliffe para la que se obtuvieron valores entre 0.71 - 0.84 para la calibración y 0.5 - 0.69 para la validación. Para todas las estaciones, la mayoría de las simulaciones de los picos más altos están subestimados, mientras que los caudales muy pequeños son sobrestimados (Hastings et al, 2019). Aunque esto sugiere una fuerte respuesta no lineal de la relación lluvia-escorrentía en la cuenca, los estadísticos presentaron resultados considerados como aceptables. Se analizaron los valores de biomasa de cultivos en las rotaciones, obteniéndose valores de rendimiento promedio anual considerados como aceptables para el objetivo del desarrollo del modelo. El modelo SWAT considera que la biomasa incluye las raíces por lo cual resulta difícil de medir en valores de rendimiento observado. Por otro lado, se realizó una calibración blanda para calidad de agua utilizando como referencia valores medidos de PT y NT a la salida de las estaciones Paso Pache y Paso de los Troncos obtenidos de los programas de monitoreo y vigilancia de DINACEA (MA).

Una vez que se obtuvo un modelo considerado como aceptable para el objetivo de trabajo, se implementaron tres escenarios del Plan de Acción del Santa Lucía, medidas de segunda generación. Los resultados de la simulación del escenario buffer (Figura 4) muestran una disminución de cargas tanto en cargas de nitratos ($N-NO_3$) como en fósforo total (PT). En este último se puede apreciar una mayor disminución de PT a diferencia del $N-NO_3$, que se explica por los procesos de transporte que dominan al fósforo. Las reducciones de NT observadas se explican por una reducción en el nitrógeno orgánico total. Los ciclos de N y P son representados en SWAT con dos pools mineral y orgánico. La adición de nutrientes es simulada por aplicaciones de fertilizantes y estiércol, residuos de cultivos, procesos de fijación y deposición. Por otro lado, el movimiento de nutrientes es impulsado por el agua, en dos fracciones, soluble y adherida a sedimentos, transportados a los arroyos por escorrentías superficiales (Neitsch et al, 2011). La razón por la cual no hay un efecto sobre el $N-NO_3$ en el escenario buffer responde a que el movimiento de esta forma de nitrógeno ocurre de manera sub-superficial. Sin embargo, el PT si se mueve más superficialmente (con una parte muy importante asociada a la erosión) y por lo tanto el buffer tiene un efecto de retención de los mismos. En cuanto a los resultados de pérdida de sedimentos por subcuenca, se observó una disminución importante de sedimentos totales (SYLD) para todas las subcuencas. Sin embargo, la magnitud de esta reducción debe validarse con resultados locales, ya que el modelo podría estar sobrestimando la eficiencia de las zonas buffer. Por ejemplo, en el escenario base, aunque se consideró al monte nativo, no se consideró ninguna zona buffer natural existente.

Se observó que la efectividad de la zona buffer depende de la subcuenca en que se haga foco, resultando más efectivo en subcuencas con mayor porcentaje de usos lecheros o típicamente agrícolas. Estas subcuencas tienen mayores niveles de nutrientes en el suelo como resultado de la fertilización. Por lo tanto, se necesita a futuro continuar con el análisis del impacto de las características de la cuenca en el efecto del buffer. Además, es necesario profundizar en la comprensión de la representación de SWAT de las zonas buffer, ya que el modelo realiza una parametrización que depende en gran medida de la pendiente y el drenaje (Arnold, 2012). Por lo tanto, esfuerzos adicionales para considerar la incertidumbre del modelo son clave para proporcionar una mejor comprensión del impacto de dichas prácticas de conservación.

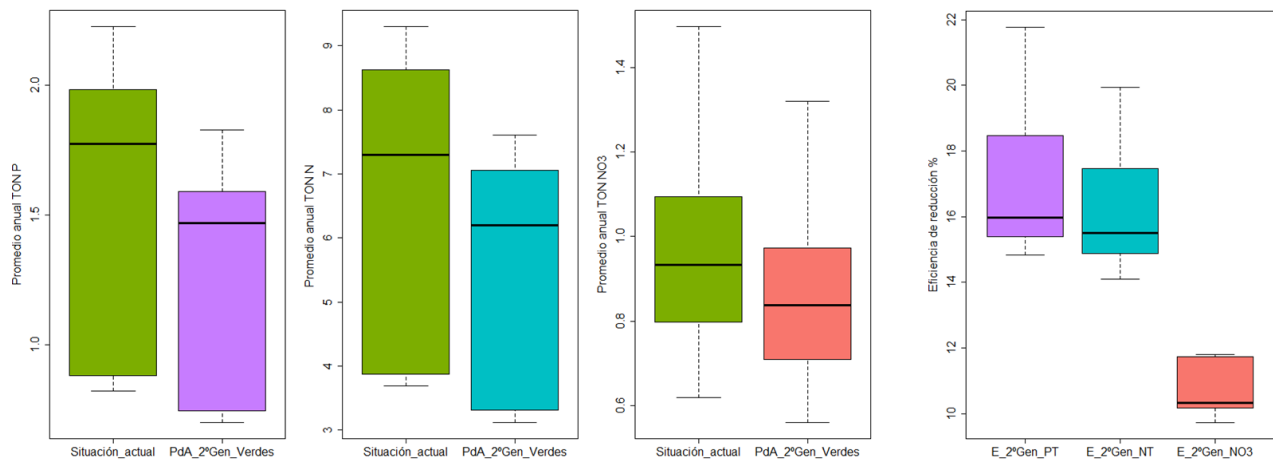


Figura 4. Izq. Comparación de carga anual promedio en el curso en el escenario base y escenario I (zona buffer) por subcuenca para fósforo total, nitratos y nitrógeno total(ton/año). Der. Eficiencia de reducción para estos en el escenario buffer medidas segunda generación (Pda_2°Gen_Verdes).

Si bien las altas reducciones observadas deben ajustarse, el modelo fue utilizado para obtener información acerca de la efectividad de esta medida a nivel de cuenca. Dichos escenarios fueron evaluados alterando en el área de aporte según diferentes medidas del plan. Detalles de dichos resultados para toda la cuenca del Río Santa Lucía se encuentran en Gelós et al (2022). A pesar de la necesidad de seguir trabajando en el ajuste del modelo SWAT (ej. ajuste de coeficientes de exportación de nutrientes, sedimentos, biomasa de cultivos) esta herramienta permite comparar un escenario de zona buffer según una medida ambiental para reducir la exportación de nutrientes a nivel de cuenca. En consecuencia, estos resultados abren el camino para continuar ajustando el modelo conceptual SWAT para la implementación de zonas buffer.

A continuación, se muestran los resultados para el escenario de reducción de fuentes puntuales. El escenario de cumplimiento del decreto 253/79 de las industrias de la cuenca (escenario II) no mostró cambios en las cargas de nutrientes que llegan al curso de agua. Por otro lado, el escenario de reducción de aporte de establecimientos lecheros (escenario III) produjo una reducción mínima en las mismas (Figura 5). Cabe destacar que muchos de los tramos no tienen ninguna reducción porque en la subcuenca correspondiente no hay ningún tambo o industria.

Considerando los tres escenarios evaluados, la mayor reducción ocurrió en el escenario buffer para el fósforo total (Figura 6). En los demás escenarios las modificaciones que ocurren sobre las cargas son muy bajas. Esto se debe posiblemente a que, en relación con las fuentes difusas, las fuentes puntuales aportan menos nutrientes que las anteriores. Se realizó el mismo tipo de comparación entre escenarios para la reducción de sedimento generado por subcuenca, observándose que el escenario buffer es el único que reduce la exportación de sedimentos en los cursos de agua. Por lo tanto, las medidas que más afectan la reducción de nutrientes y sedimentos son aquellas que apuntan a controlar las fuentes difusas.



Figura 5. Comparación de cargas en el curso en el escenario base y el escenario III de disminución de aporte de tambos por subcuenca para nitratos y fósforo total. Cada curso de agua (RCH) está numerado según la salida de la cuenca a la cual corresponde.

Estos resultados abren el camino para continuar ajustando el modelo conceptual SWAT para buenas prácticas de manejo y las posibilidades de seguir desarrollando esta herramienta, para evaluar mejor el efecto de las medidas bajo la variabilidad climática.

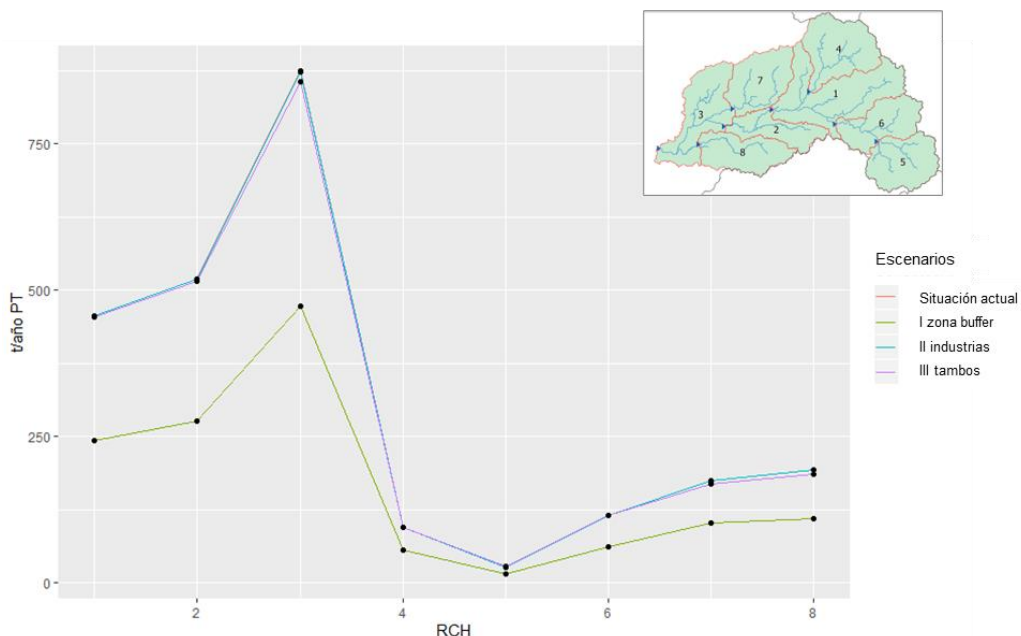


Figura 6. Comparación de carga de PT en el curso de todos los escenarios por subcuenca de orden 3. Cada curso de agua (RCH) está numerado según la salida de la cuenca a la cual corresponde. Para cada uno se indica la carga total que trae el río hasta el final de ese tramo.



XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



De acuerdo a los resultados obtenidos acerca de la posibilidad de evaluar escenarios, se identificó la necesidad de continuar el trabajo en la calibración blanda del modelo, siendo uno de los primeros pasos el ajuste detallado de los coeficientes de exportación de nutrientes. Por otra parte, otros escenarios alternativos a evaluar son el efecto de la aplicación de efluentes de salas de ordeño en tambos a terreno, sustituyendo la fertilización en la rotación lechera por la aplicación del efluente de tambo y analizando el efecto de este aporte al cierre de la subcuenca y en la cuenca subsiguiente. Además, el modelo permite evaluar otras prácticas de manejo alternativas para la reducción de exportación de nutrientes a cursos de agua como la minería vegetativa. Por último, los datos obtenidos en los escenarios resultan muy relevante para identificar cuencas en dónde los monitoreos son escasos o nulos, pudiendo además obtener información en diferentes escenarios climáticos.

CONCLUSIONES

Se realizó la primera evaluación de escenarios de medidas de acción enfocadas a la dimensión ambiental en un modelo SWAT para una subcuenca del Río Santa Lucía. De las medidas implementadas para esta subcuenca de estudio en particular, aquellas que actúan sobre fuentes difusas de contaminación resultaron las más efectivas en la reducción de nutrientes y mejora de la calidad de los cursos de agua. Sin embargo, cabe destacar que, estos resultados no son extrapolables a otras cuencas con diferente área y usos de suelo. Resulta de gran relevancia estudiar el efecto de estas medidas en otras cuencas con mayor densidad de fuentes puntuales en su territorio, por ejemplo subcuencas lecheras. Esto abre camino al uso de esta herramienta para la evaluación de medidas ambientales dirigidas. Para lograrlo, se necesita estudiar la sensibilidad de los parámetros relacionados a cada uno de los escenarios (parametrización de zona buffer, estimación de efluentes de tambos). La implementación del modelo hidrológico SWAT surge como una herramienta a escala de cuenca, para apoyar a los sistemas de gestión nacionales, permitiendo la evaluación de políticas de gestión del agua alineadas en torno al uso de suelo, que permitan alcanzar los objetivos de calidad de agua deseados.

REFERENCIAS

- Abbaspour, K.C., Yang J., Maximov I., Siber R., Bogner K, Mieleitner J., Zobrist J., and Srinivasan R. (2007). Spatially-distributed modelling of hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333: 413-430.
- Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Srinivasan, R.; Williams, J.R.; Haney, E.B.; Neitsch, S.L. (2013). SWAT 2012 Input/Output Documentation. Texas Water Resources Institute. Available electronically from <https://hdl.handle.net/1969.1/149194>.
- Aubriot, L. E. (2018). Evolución de la eutrofización en el Río Santa Lucía: Influencia de la intensificación productiva y perspectivas. *INNOTEC*, 14. <https://doi.org/10.26461/14.04>
- Gelós M., Neighbor N., Kok P., Badano L., Hastings F., Nervi E., Alonso J., Navas R., Vervoort W., Baethgen W.. On the prediction of phosphorus fluxes in the santa lucía basin under different land use and management practices using SWAT. 7th Symposium on Phosphorus in Soils and Plants, Montevideo, Uruguay, 2022
- Hastings, F., Mer, F., Alonso, J., Navas, R., Kok, P., Pereyra, P., Badano, L., Neighbor, N., Baccino, A., Diaz, F., Baethgen, W., & Vervoort, R. W. (2019). Modelación con SWAT en la cuenca del Santa Lucía: Un ejemplo exitoso de trabajo Interinstitucional e Interdisciplinario para la gestión de los Recursos Hídricos en Uruguay. *II Congreso de Agua Ambiente y Energía, AUGM*.
- MVOTMA. (2018). Plan de Acción para la Protección del Agua en la Cuenca del Santa Lucía. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/plan-accion-para-proteccion-del-agua-cuenca-del-santa-lucia>
- Mer, F., Badano, L., Neighbor, N., Hastings, F., Baethgen, W., Alonso, J., Navas, R., Nervi, E., & Vervoort, RW. (2022). SWAT Subcuenca Santa Lucia.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J. R., 2011. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation; Version 2009, Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas A&M University System, College Station, TX.