

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS EN ZONAS DE LLANURA
ESCUELA DE POSGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO.

Plan de Tesis: “Modelación hidrológica distribuida operacional en la cuenca del río Santa Lucía (Uruguay) incorporando información satelital”

Estudiante: Lic. Vanessa Erasun

Director: Dr. Ing. Gonzalo Sapriza Azuri

Presentación del área de interés.

El río Santa Lucía (Figura 1) tiene una cuenca de aporte de 13.487 Km² y es considerado uno de los sistemas fluviales más importantes de Uruguay dada su relevancia para el abastecimiento de agua potable a Montevideo y zona metropolitana.

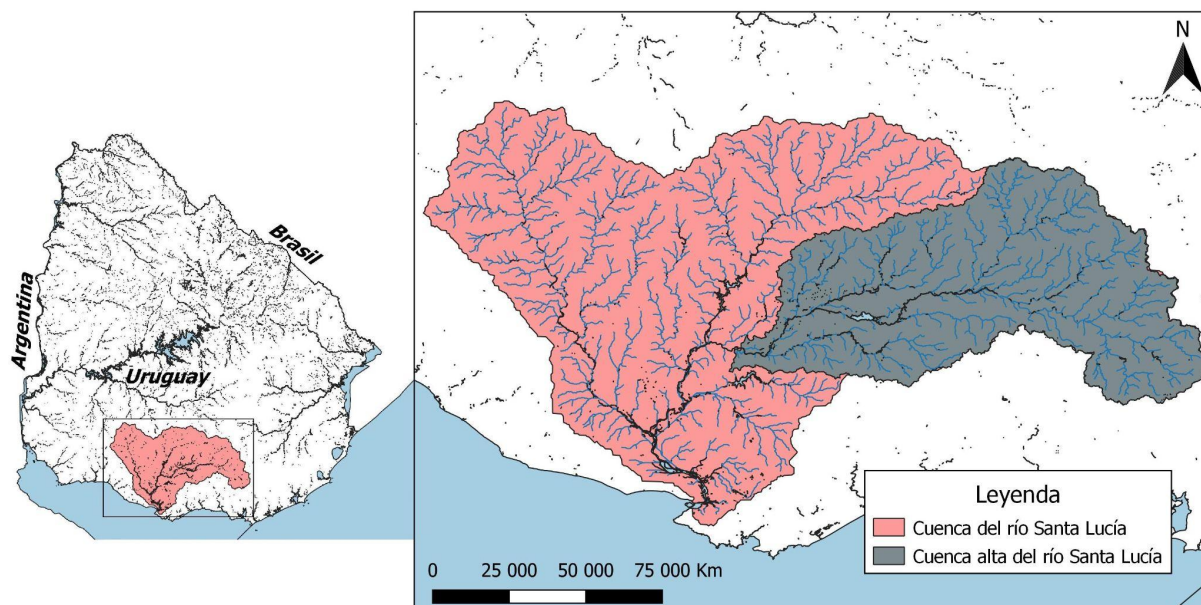


Figura 1: Ubicación de la cuenca del río Santa Lucía y la subcuenca de estudio: cuenca alta del río Santa Lucía.

Definición del problema de investigación.

El Plan Nacional de Aguas [MVOTMA, 2017] afirma que en Uruguay los principales usos de los recursos hídricos son el riego, el consumo humano, la generación hidroeléctrica y el uso industrial. La sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento, ineficiencias de uso y manejo, tanto en el campo como en la ciudad, ha tenido como resultado una afectación directa sobre la cantidad y calidad del agua.

Para gestionar de forma sostenible las diferentes demandas de uso de las aguas superficiales y subterráneas las autoridades responsables de la administración de los recursos hídricos necesitan herramientas de gestión que promuevan el uso,

aprovechamiento y manejo racional del mismo. Dentro de esas herramientas de gestión, los modelos hidrológicos operativos permiten mejorar la planificación y utilización de dicho recurso, gestionar períodos de sequía meteorológica e inundaciones, y evaluar escenarios de impacto del cambio climático y cambios en los usos del suelo.

Planteo de objetivos.

Objetivo general.

Desarrollar un modelo hidrológico distribuido y continuo de la cuenca alta del río Santa Lucía, como una herramienta de gestión. Dicho modelo, permitirá conocer la disponibilidad de los recursos hídricos en el territorio, realizar pronósticos y evaluar escenarios de las diferentes actividades antrópicas que puedan desarrollarse en las subcuencas de estudio. Para ello, se utilizará el modelo de transformación lluvia-escurrimiento HBV-96 [Lindstrom, 1997] y el tránsito hidrológico de onda cinemática [de Saint-Venant B., 1871].

Objetivo específico.

Incorporar productos satelitales: precipitación, humedad del suelo, evapotranspiración real y variación total de almacenamiento de agua. Los mismos serán utilizados como forzantes del modelo, así como también, en el proceso de calibración del mismo.

Hipótesis de trabajo.

Es posible desarrollar una herramienta de gestión hídrica a partir de la modelación hidrológica de la cuenca alta del río Santa Lucía con un paso de tiempo subdiario a diario, con una distribución espacial de 1Km x 1Km, e incorporando información satelital.

Estado del arte/Antecedentes y Marco teórico.

Los modelos hidrológicos son una representación de un sistema hidrológico donde se representa de manera simplificada la transformación de la lluvia en escurrimiento en una cuenca hidrográfica [Mejuto et al., 1997]. Atendiendo al grado de importancia que se le atribuye a la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos que se desarrollan en las cuencas de estudio, los modelos pueden clasificarse como agregados, semidistribuidos y distribuidos. Según Carpenter et al [2006] los modelos distribuidos tienen la capacidad de incorporar múltiples fuentes de datos que varían espacialmente: usos, características y propiedades hidráulicas del suelo, así como también de las principales entradas de los modelos, precipitaciones de alta resolución y temperatura. Según el autor, estos modelos no sólo facilitan las simulaciones y predicciones con una resolución más alta que los modelos agregados, sino que tienen el potencial de mejorar las predicciones hidrológicas en las escalas operativas actuales al tener incorporada la variabilidad espacial inherente y que históricamente ha sido agrupada en las características promedio de la cuenca [Smith et al., 2004; Boyle et al., 2001; Beven, 1992, 2002]. Sin embargo, la incertidumbre en las estimaciones de alta resolución de la precipitación (productos satelitales) y los parámetros del modelo, pueden disminuir las ganancias potenciales en la precisión de la predicción lograda debido principalmente a un mayor número de parámetros a calibrar y condiciones iniciales a definir [Beven, 2012].

La elección del tipo de modelo a implementar depende de su aplicación y de la disponibilidad de observaciones. Según Kling et al [2009], los modelos agregados, en los que la cuenca hidrográfica se trata como una única unidad homogénea, siguen siendo de uso generalizado, ya que dichos modelos tienden a ser paramétricamente parsimoniosos y ofrecen una alta eficiencia. Los modelos agregados son aplicados en general para predicción de caudales, evaluación de los recursos hídricos y análisis de escenarios de cambio climático. Por otro lado, se considera que los modelos distribuidos proporcionan una representación más realista de la heterogeneidad espacial de los procesos hidrológicos, que surge de la variabilidad espacial tanto en la precipitación como en las propiedades físicas de la cuenca (suelos, vegetación, topografía, etc.). Sin embargo, dado que los parámetros efectivos del modelo generalmente no pueden obtenerse de manera directa y deben estimarse de mediante calibración [Duan et al., 2006], provocan un aumento significativo en la complejidad de su estimación, que llevan a contrarrestar las ventajas teóricas de los modelos distribuidos. Estos modelos, son ampliamente utilizados como una herramienta útil en la gestión del territorio debido a que permiten evaluar los impactos generados por la antropización en lo que refiere a los cambios en los usos del suelo, cobertura vegetal, etc..

Boughton et al [2003] afirma que en los últimos años ha habido un incremento de uso y desarrollo de los modelos hidrológicos de simulación continua, destacando la eficiencia de éstos (frente a las simulaciones por evento) en calcular los estados antecedentes de humedad presentes en el suelo y su evolución temporal, de esta forma se logra reproducir de forma apropiada la respuesta y evolución de la cuenca a los eventos de precipitaciones contiguos en el tiempo.

La utilización de escalas temporales diarias en la modelación de cuencas hidrográficas permite incorporar la variabilidad climática, tanto espacial como temporal de una región (caso de estudio realizado para el Río de la Plata [Díaz et al, 1998]), afectando los diferentes mecanismos de generación de escurrimiento. Por ejemplo, la intensidad de precipitación afecta considerablemente qué procesos hidrológicos se activan en una cuenca [Sapriza-Azuri et al, 2015]. Los parámetros efectivos del modelo a calibrar también tendrán una fuerte dependencia a la resolución temporal y espacial seleccionada [Beven, 1995; Samaniego et al, 2010].

Desde el punto de vista de la gestión del recurso, la evaluación de permisos de tomas directas de cursos de agua necesita de modelos que permitan evaluar el recurso a pasos de tiempo diarios. Aún más, los sistemas de alerta temprana requieren de pasos de tiempo aún menores. Borah et al [2007], asegura que los modelos simples son generalmente más eficientes que los modelos integrales y sofisticados, sin embargo, sus aplicaciones se limitan a casos simplificados. Se necesitan modelos complejos y refinados (en lo que refiere a escalas temporales y espaciales) para la gestión integral actual y futura de los recursos hídricos, climáticos y ambientales.

En Uruguay, hace varias décadas que se viene trabajando en el desarrollo de modelos hidrológicos a escala de todo el país con el fin de ser utilizados por los organismos encargados de la gestión de los recursos. En particular se ha aplicado el modelo de Témez [1997] en paso mensual para la estimación de caudales en varias cuencas del país [Genta et. al 2001a, Genta et. al 2001b, Failache et. al 2006, MVOTMA 2017]. En cuanto a la generación de energía hidroeléctrica, en particular para el río Uruguay, la Comisión Técnica

Mixta de Salto Grande (CTM-SG) cuenta con un modelo de gestión implementado en Delft - FEWS [Werner et al., 2013; <http://www.delft-fews.nl/>], que recibe información en tiempo real y es capaz de estimar el estado de la cuenca y realizar predicción de aportes con un paso de tiempo de 3 horas. En el año 2017, el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) impulsó un programa que tuvo como fin fomentar el desarrollo de la agricultura regada en Uruguay a partir del estudio de los recursos hídricos en tres cuencas: Arapey, San Salvador y Yí (<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/>). Sin embargo, existe una gran carencia en dicha evaluación, ya que los efectos antrópicos son considerados de forma externa (no acoplados) y a un paso de tiempo mensual.

En los últimos años se han comenzado a desarrollar modelos hidrológicos de paso diario para algunas cuencas del país [Narbondo et al, 2018; Erasun et al, 2019] e incluso se han implementado modelos no continuos (por eventos) en sistemas de alerta temprana para previsión de avenidas [Silveira et al., 2015], constatándose, la necesidad de incorporar un modelo de simulación continua, que incorpore los estados antecedentes de humedad de agua en el suelo. Sin embargo, muy pocos trabajos son los que consideran los efectos antrópicos en los procesos de generación de escorrentía [Crisci et al, 2015]. Algunos trabajos previos [Gamazo et al, 2014] han mostrado la dificultad en poder calibrar modelos hidrológicos utilizando esta resolución temporal. Esto se debe principalmente a la incertidumbre en los datos observados de caudales y precipitaciones. En el caso de los caudales, las curvas de aforo a partir de las cuales se obtienen los datos de caudal presentan una gran incertidumbre. Genta et al [2001] analizando curvas de aforo para algunas estaciones del Uruguay mostraron que las incertidumbres son en el entorno al 20%, en promedio, para caudales de estiaje y aún mayores para caudales de avenidas (durante inundaciones no se afora).

Recientemente la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA) de Uruguay, a través del Departamento del Agua (del Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República) ha desarrollado y está próximo a ser puesto en funcionamiento en los servidores del estado uruguayo, un sistema de alerta temprana de inundaciones sobre Delft - FEWS en las ciudades de Artigas y Durazno [Gamazo et al, 2020]. En este trabajo se han utilizado modelos hidrológicos continuos en el tiempo, y agregados en el espacio; no contemplan la variabilidad espacial de las precipitaciones y de los procesos hidrológicos de generación de escorrentía.

Para la cuenca del río Santa Lucía, en el marco del Plan de Acción para la protección de la calidad ambiental y la disponibilidad de agua potable en la misma [MVOTMA, 2018], se ha conformado un grupo de investigadores enfocado en el estudio de la calidad del agua de la cuenca alta, donde se ha implementado el modelo hidrológico semi-distribuido en subcuencas y de paso de tiempo diario SWAT (Soil & Water. Assessment Tool) [Arnold et al, 1998], como un primer paso hacia una herramienta que permitirá diseñar políticas de gestión de calidad de agua y control de contaminantes, alineadas en torno al uso de suelo, para lograr los objetivos de calidad deseados en el Plan de Acción [Hastings et al, 2019].

Factibilidad.

Soy profesora asistente (Cargo Grado 2, 37 horas) del Departamento del Agua, Centro Universitario Regional (CENUR) Litoral Norte sede de la Universidad de la República (UdelaR), en Salto, Uruguay. El departamento (<http://agua.unorte.edu.uy/>) está conformado por un equipo de investigación multidisciplinario de alta dedicación en las áreas de hidrología, riego, química, geofísica y mecánica de los fluidos computacional, lo cual me asegura contar con el soporte de investigadores altamente formados en el área.

Llevaré a cabo las actividades descritas en este plan de tesis en el Departamento del Agua, donde cuento con el espacio físico para desarrollarlas; escritorio y computadora con acceso a internet y a servidores de cálculo intensivo. El departamento dispone de 2 servidores Dell Power Edge R720, cada servidor posee 2 procesadores Intel Xeon (R) CPU E5-2026V2, de 6 cores a 2.1GHz cada uno, con 128GB de memoria RAM DDR3. Cada equipo cuenta con 2 placas gráficas (para cálculo científico) NVIDIA Tesla K40 con 2880 cores a 745 MHz y 12GB de RAM. Se dispone además de un servidor de última generación, Dell PowerEdge R740 Server, con 2 procesadores Intel Xeon Gold 6137 con un total de 40 cores físicos, 128GB de RAM, 1 disco SSD de 1TB para escritura lectura de simulaciones, 1 disco de 2TB, una placa gráfica NVIDIA Tesla V100, con 5120 cores a 1455 MHz y 32 GB de RAM.

Diseño o marco metodológico.

Área de estudio.

La delimitación de las subcuencas afluentes a la cuenca del río Santa Lucía (ver Figura 1), definición de las redes de drenaje y direcciones de flujo se hará utilizando los datos disponibles de modelos digitales de terreno (MDT) de HydroSHEDS [Lehner et al., 2013] obtenidos de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM). Para llevar esto a cabo se utilizarán herramientas del Sistema de Información Geográfica Quantum GIS (QGIS).

Datos de entrada.

Para poder desarrollar el modelo hidrológico, es necesaria la recopilación de información hidrometeorológica de base.

Las principales entradas del modelo (forzantes) son la precipitación y la evapotranspiración potencial. Se utilizarán series de datos de las diferentes estaciones meteorológicas disponibles. Luego de analizadas las series temporales, se identificarán los años húmedos y secos para definir de forma propicia un período de calibración y validación (15 - 20 años). Se utilizará base de datos en grilla de productos como Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP) [Beck et al., 2017] y MERGE [Rozante et al., 2010] para las precipitaciones y WATCH Forcing Data ERA-Interim (WFDEI) [Weedon et al., 2014] para la evapotranspiración potencial.

El mapa de suelos de la cuenca proviene de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay, perteneciente al Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca [MGAP, 1976].

El mapa de uso de suelos ("Land cover") es derivado de la Agencia Espacial Europea (ESA) "The Land Cover Climate Change Initiative (CCI) Climate Research Data Package (CRDP)"

con una resolución de 300 m x 300m. El archivo contiene el uso de suelos desde 1992 a 2015 por lo que se podría evaluar posibles efectos en los cambios de uso del suelo.

Las formaciones geológicas presentes en la cuenca de estudio serán identificadas a partir del mapa geológico del Uruguay, escala 1:500.000, perteneciente a la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE) [Preciozzi et al., 1985].

Modelo hidrológico.

La modelación será de tipo continua, con un paso de tiempo diario y en grillas regulares con resolución espacial de 1 Km x 1 Km.

El modelo hidrológico a utilizar será el HBV-96 [Lindstrom, 1997] el cual permite simular los procesos de generación de escurrimiento para el pronóstico de caudales continuos. El tránsito de la escorrentía (superficial, subsuperficial y subterránea) generada en cada una de las celdas será propagado por la red de drenaje mediante el método de Onda Cinemática [de Saint-Venant, B., 1871].

Se realizará un análisis de sensibilidad de los parámetros a calibrar con el objetivo de entender mejor su comportamiento y su incidencia en los hidrogramas de salida de los modelos. Aquellos parámetros que sean insensibles serán descartados del proceso de ajuste.

El modelo se calibrará y validará para un período de 15 a 20 años (función de la disponibilidad y calidad de los datos). Para ello se utilizará información de estaciones fluviométricas (caudal) y se buscará incorporar la información de productos satelitales como: humedad del suelo (SMOS, ESA CCI SM, Gruber et al., 2017), evapotranspiración real (MODIS-MOD16, Mu et al., 2011) y variación de almacenamiento de agua en el sistema hidrológico (GRACE, Tapley et al., 2004); definiendo un problema multiobjetivo de optimización.

Para definir la bondad del ajuste se definirán varias funciones objetivos. Se aplicará una calibración multi-objetiva [Gupta et al., 1998] y se utilizará el código de Borg [Hadka et al., 2013] que implementa algoritmos del tipo genéticos para calibración automática de problemas multiobjetivos.

Se validará el modelo utilizando observaciones independientes al del proceso de calibración.

Una vez calibrado y validado el modelo, será utilizado para evaluar diferentes escenarios vinculados a la gestión hídrica: (i) probar el comportamiento del modelo para realizar pronósticos meteorológicos operacionales, utilizando archivos de pronósticos históricos como: Ensemble Prediction System (EPS) del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) [Molteni et al., 1996] y Global Ensemble Forecast System (GEFS) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-ensemble-forecast-system-gefs>), (ii) aumento del número de embalses en la cuenca.

Cronograma.

| Nº. | Actividades | Duración (meses) |
|------|--|------------------|
| I | Delimitación de cuencas. | 1 |
| II | Análisis de datos disponibles | 1 |
| III | Implementación de los modelos. | 2 |
| IV | Análisis de sensibilidad de los parámetros de los modelos e interpretación física de los mismos. | 1 |
| V | Calibración de los modelos. | 2 |
| VI | Validación de los modelos. | 1 |
| VII | Análisis de resultados obtenidos. | 2 |
| VIII | Redacción y presentación del proyecto. | 2 |

Bibliografía.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.

Beven, K. (1992). Future of distributed modeling. *Hydrologic Processes* 6 (3), 253–254.

Beven, K. (1995). Linking parameters across scales: subgrid parameterizations and scale dependent hydrological models. *Hydrological Processes*, 9(5-6), 507- 525.

Beven, K. (2001). How far can we go in distributed hydrological modelling?. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 5(1), 1-12.

Beven, K. (2002). Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. *Hydrological processes*, 16(2), 189-206.

Beven, K. (2012). Data for Rainfall–Runoff Modelling. *Rainfall–Runoff Modelling: The Primer*, 51-82.

Beck, H. E., Van Dijk, A. I., Levizzani, V., Schellekens, J., Gonzalez Miralles, D., Martens, B., & De Roo, A. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 589-615.

Boyle, D. P., Gupta, H. V., Sorooshian, S., Koren, V., Zhang, Z., & Smith, M. (2001). Toward improved streamflow forecasts: Value of semi-distributed modeling. *Water resources research*, 37(11), 2749-2759.

Borah, D. K., Arnold, J. G., Bera, M., Krug, E. C., & Liang, X. Z. (2007). Storm event and continuous hydrologic modeling for comprehensive and efficient watershed simulations. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(6), 605-616.

Boughton, W., & Droop, O. (2003). Continuous simulation for design flood estimation—a review. *Environmental Modelling & Software*, 18(4), 309-318.

Caro, A. S., & Bianchi, J. F. (2014). Modelación hidrológica a paso diario de la cuenca del río Luján, Provincia de Buenos Aires.

Carpenter, T. M., & Georgakakos, K. P. (2006). Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of hydrology*, 329(1-2), 174-185.

Crisci, M., Chreties, C., & Silveira, L. (2015). Simulación hidrológica continua en la cuenca del río Cuareim con el modelo MGB-IPH. *Innotec*, (10 ene-dic), 40-48.

Collischonn, W. (2001). Hydrologic simulation of large basins (in Portuguese), Ph.D. thesis, Inst. de Pesqui. Hidraul., Univ. Fed. do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

Collischonn, W., & Tucci, C. E. M. (2001). Hydrologic simulation of large basins. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 6(1), 95-118.

de Saint-Venant, B. (1871). Theory of unsteady water flow, with application to river floods and to propagation of tides in river channels. *French Academy of Science*, 73, 148-154.

Diaz, A. F., Studzinski, C. D., & Mechoso, C. R. (1998). Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *Journal of Climate*, 11(2), 251-271.

Duan, Q., Schaake, J., Andreassian, V., Franks, S., Goteti, G., Gupta, H. V., ... & Hogue, T. (2006). Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 3-17.

Gamazo, P., Bondarenco, M., Failache, N., Soler, J., Silveira, L., Chreties, C., Crisci, M. (2014). Modelación hidrológica a escala espacial del balance hídrico superficial, OEA Fundación desarrollo regional de Salto Grande, Informe de avances, p. 1-59.

Genta, J.L., Failache, N., Alonso, J., Bellón, D., Chao, R., Sordo, A., & Fernanández J., C. (2001). Balances hídricos superficiales en cuencas del Uruguay. Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, IMFIA. Ministerio de transporte y obras públicas. Dirección nacional de hidrografía. P. 84-115.

Goniadzki, D., & Bianchi, J. (2012). Modelación hidrológica de la cuenca del río Gualeguay para pronóstico y alerta hidrológico utilizando información de sensores remotos de microondas. *Actas del 1er Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research*, 34(4), 751-763.

Hadka, D., & Reed, P. (2013). Borg: An auto-adaptive many-objective evolutionary computing framework. *Evolutionary computation*, 21(2), 231-259.

Hastings, F., Mer F., Alonso, J., Navas, R., Kok, P., Badano, L., Neighbor, N., Baccino, A., Diaz, F., Baethgen, W., Willem Vervoort R. (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.

Kling, H., & Gupta, H. (2009). On the development of regionalization relationships for lumped watershed models: The impact of ignoring sub-basin scale variability. *Journal of Hydrology*, 373(3-4), 337-351

INTA (1990). Atlas De Suelos de la República Argentina, E 1:500.000 y 1:1.000.000. SAGyP, INTA CIRN-Proyecto PNUD ARG 85/019.

Lehner, B., & Grill, G. (2013). Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, 27(15), 2171-2186.

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., & Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of hydrology*, 201(1-4), 272-288.

Mejuto, M. F., Mayorga, A. V., & Fernández, S. C. (1997). La utilización de modelos en hidrología. *Ensayos: Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, (12), 305-318.

MGAP, Dirección de Suelos y Aguas (1976). "Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000".

Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T. N., & Petroliajigis, T. (1996). The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 122(529), 73-119.

Moore, R. J. (2007). The PDM rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(1), 483-499.

MVOTMA (2017). Plan Nacional de Aguas, del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA). [Consulta: 18/11/2019]. Disponible en <http://www.mvotma.gub.uy>.

MVOTMA (2018). Plan de Acción de la protección de la calidad ambiental de la Cuenca del Río Santa Lucía, Medidas de 2da Generación. Recuperado de: <https://www.mvotma.gub.uy/novedades/noticias/item/10012261-medidas-de-segundageneracion-para-cuenca-del-santa-lucia>

Rozante, J. R., Moreira, D. S., de Goncalves, L. G. G., & Vila, D. A. (2010). Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. *Weather and Forecasting*, 25(3), 885-894.

Samaniego, L., Kumar, R., & Attinger, S. (2010). Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46(5).

Sapriza-Azuri, G., Jódar, J., Navarro, V., Slooten, L. J., Carrera, J., & Gupta, H. V. (2015). Impacts of rainfall spatial variability on hydrogeological response. *Water Resources Research*, 51(2), 1300-1314.

Silveira, L., Chreties, C., Crisci, M., Usera, G., & Alonso, J. (2015). Sistema de alerta temprana para previsión de avenidas en la ciudad de Durazno. *Innotec*, (10 ene-dic), 56-63.

Smith, M. B., Seo, D. J., Koren, V. I., Reed, S. M., Zhang, Z., Duan, Q., ... & Cong, S. (2004). The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design. *Journal of Hydrology*, 298(1-4), 4-26.

Todini, E. (2007). A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(3), 1549-1592.

Tucci, C. E. M., Clarke, R. T., Collischonn, W., da Silva Dias, P. L., & de Oliveira, G. S. (2003). Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay River basin. *Water Resources Research*, 39(7).

Uriburu Quirno, M., Damiano, F., Borús, J., Lozza, H., & Villarreal, J. C. (2010). Modelación hidrológica en modo actualizado del arroyo Pergamino. In Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. 1. 2010 09 21- 24, 21 al 24 de Septiembre de 2010. Azul, Buenos Aires. AR.

Wagener, T., & Wheeler, H. S. (2006). Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of hydrology*, 320(1-2), 132-154.

Weedon, G. P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M. J., & Viterbo, P. (2014). The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resources Research*, 50(9), 7505-7514.

Werner, M., Schellekens, J., Gijsbers, P., van Dijk, M., van den Akker, O., & Heynert, K. (2013). The Delft-FEWS flow forecasting system. *Environmental Modelling & Software*, 40, 65-77.



Lic. Vanessa Erasun
Estudiante MRHZLL
De conformidad
25/06/2021



Dr. Ing. Gonzalo Sapriza Azuri
Tutor de tesis.
De conformidad
25/06/2021