

# Informe final publicable de proyecto Hacia una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Sistemas Hidrológicos Altamente Antropizados: Arroyo San Antonio - Acuífero Salto/Arapey

Código de proyecto ANII: FMV\_1\_2017\_1\_135656

20/11/2021

**GAMAZO RUSNAC, Pablo Andrés** (Responsable Técnico - Científico)

**FERRIZO, Héctor** (Investigador)

**ABRE, Paulina** (Investigador)

**BESSONE, Lucas** (Investigador)

**ABELENDIA FALCON, Esteban** (Investigador)

**NAVAS NUÑEZ, Rafael** (Investigador)

**DE SOUZA IBARRA, Romina** (Investigador)

**ALVAREDA MIGLIARO, Elena Maria** (Investigador)

**BLANCO, Carlos Nicolas** (Investigador)

**BLANCO GAUCHER, Gonzalo Homero** (Investigador)

**DUBOSC, Guillermo** (Investigador)

**RAMOS, Julián Andrés** (Co-Responsable Técnico-Científico)

**SAPRIZA AZURI, Gonzalo** (Investigador)



## **Resumen del proyecto**

Para el Sistema Acuífero Salto Arapey, donde se encuentra el arroyo San Antonio, se realizó un registro sedimentario para determinar la meteorización y evolución diagenética y de proveniencia mediante petrografía y geoquímica. Se realizó un mapeo geológico de superficie y una caracterización geofísica empleando varias técnicas. A partir de la información disponible se elaboró un mapa de suelos y de uso de los mismos. Mediante Geomática se procesaron imágenes satelitales para obtener el número de presas e invernaderos para evaluar el grado de formalismo en cuanto a permisos de aprovechamientos. Se realizaron 2 ensayos de bombeo y se procesaron 8 de OSE. Se instrumentó el área con 14 pluviógrafos, sensores de nivel en 20 pozos y 6 puntos en el arroyo, y en 3 de estos se desarrollaron curvas de aforo. Se registró información para el periodo 2018-2020. Se realizaron 2 campañas de muestreo para análisis fisicoquímico y microbiológico en 20 pozos y 6 puntos del arroyo. A partir de los relevamientos geológicos y geofísicos realizados, y de descripción geológica de perforaciones se construyó un modelo geológico 3D con el programa GMS, donde también se desarrolló un modelo hidrogeológico en MODEFLOW. Para el arroyo se desarrolló un modelo con el algoritmo HBV en la plataforma WFLOW. Ambos modelos presentaron un muy buen ajuste. Se detectó contaminación microbiológica y altos niveles de fósforo y nitrato en el arroyo y en algunos pozos, y niveles de arsénico por encima de 10 ug/L en pozos. A partir del modelo hidrológico se desarrolló una aplicación para obtener curvas de duración del flujo en cualquier punto del arroyo. Los modelos hidrológicos e hidrogeológicos muestran una importante conectividad entre el sistema acuífero y el arroyo. Mediante el modelo hidrogeológico se evaluaron escenarios de sobre explotación y se valoró su influencia en las descargas hacia el arroyo.

**Ciencias Naturales y Exactas / Ciencias de la Tierra y relacionadas con el Medio Ambiente / Geociencias multidisciplinaria / Geofísica, Geoquímica, Hidrología e Hidrogeol**

**Palabras clave: Caracterización de sistema hidrológico / Modelos matemáticos hidrológicos / Gestión de recursos hídricos /**

## **Introducción**

Existe una interacción creciente entre las actividades humanas y el medio ambiente. El crecimiento y desarrollo económico implican una mayor demanda de energía y recursos hídricos. Una adecuada y eficiente gestión de estos recursos es de vital importancia para cumplir con las demandas asociadas al crecimiento, la sustentabilidad ambiental/ecológica y adaptabilidad al cambio climático de los sistemas hídricos (Loucks, 2009). Se ha demostrado que la implementación de herramientas de gestión basadas en modelos hidrológicos contribuye notoriamente a una maximización de estos objetivos (Ross, 2018; Pulido-Velázquez et al., 2006; Cai et al., 2003; Sophocleous, 2000).

Estas herramientas de gestión, necesitan en primera instancia y de carácter fundamental una caracterización adecuada del funcionamiento del sistema. Esto incluye la definición de su geometría, propiedades hidráulicas, cuantificación de sus entradas/salidas, respuesta ante estímulos y tipo de conexión hidráulica entre el sistema de flujo superficial y subterráneo.

En base a esta información, sumada a una adecuada red de observaciones de las diferentes variables de estados, es posible construir modelos hidrológicos sobre el que se pueda apoyar la gestión de los recursos hídricos. En Uruguay se cuenta con una pobre caracterización de los principales sistemas hidrológicos del País sobre todo de los acuíferos, y los modelos hidrológicos desarrollados sólo en casos excepcionales han sido utilizados como herramienta de gestión (Gamazo et al., 2015).

Estos problemas ya han sido identificados por las propias autoridades, el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA, 2004), quienes alertan que la calidad de los recursos hídricos en Uruguay está sufriendo un proceso de deterioro. A su vez, se advierte que el uso no controlado del agua subterránea puede conducir a la contaminación o la sobreexplotación de los acuíferos. Actualmente hay situaciones donde se identifican conflictos por el uso del recurso, que hacen imprescindible un adecuado manejo y gestión del mismo (ejemplo cuenca del río Santa Lucía). Bossi (2000) coincide y destaca la necesidad de conocer de forma más precisa la geometría, espesores y propiedades hidráulicas de las formaciones geológicas. Carrión et al. (2011) consideran que conocer en detalle las características de un acuífero es relevante, no sólo para mejorar su explotación, sino para protegerlo de posibles contaminaciones, tanto naturales como antrópicas y evaluar la eficiencia en posibles procesos de remediación. También que debido a la intensiva explotación que se realiza de los acuíferos, los mismos deberían ser objeto de prioridad en la vigilancia, control y la

regulación de su uso.

Ramos (2015) asegura que, el agua subterránea en particular, está en una situación de riesgo creciente debido a factores tales como el crecimiento constante de la demanda de agua en conglomerados urbanos, la explotación descontrolada y la contaminación de los manantiales. Muchos de los problemas que afectan a las aguas subterráneas se relacionan con la falta de información a los efectos de coordinar la gestión y manejo de los recursos subterráneos.

En cuanto al problema de aplicación de modelos matemáticos para la gestión de recursos hídricos en Uruguay, la Dirección Nacional de Agua (DINAGUA), organismo encargado de otorgar los permisos de toma tanto de ríos como de acuíferos y de autorizar la construcción de presas, es relativamente limitada. La mayoría de los permisos de toma de aguas superficiales se basan en estimaciones realizadas a partir de coeficientes de escorrentía y las tomas de aguas subterráneas consideran conocimiento previo de los rendimientos de los acuíferos o de prudencia técnica.

Lo hasta aquí expuesto pone en evidencia la necesidad de aumentar el conocimiento sobre los recursos hídricos en Uruguay e incorporar estos conocimientos a la gestión. El desarrollo de modelos matemáticos cubre estas dos necesidades, ya que para su desarrollo es necesario caracterizar el sistema integrando información de varias disciplinas y una vez implementados, los modelos pueden ser utilizados para la gestión. Es por ello que el presente proyecto propone el desarrollo de modelos como herramientas para la gestión de los recursos hídricos del sistema hidrológico Arroyo San Antonio – Sistema Acuífero Salto Arapey.

El sistema hidrológico Arroyo San Antonio – Sistema Acuífero Salto Arapey (650 km<sup>2</sup>) se encuentra en una zona altamente antropizada. Los usos del suelo abarcan zonas urbanas y semiurbanas asociadas a la ciudad de Salto y zonas rurales con diferentes tipos de actividad agropecuaria (hortifruticultura, cultivos de secano, feedlots y campo natural). Es de destacar la existencia del vertedero municipal de la ciudad de Salto dentro del sistema con escaso grado de impermeabilización. Los usos del agua en el sistema hidrológico considerado son muy diversos, los principales usos son riego, abastecimiento de agua potable, control de heladas, abrevadero de ganado y recreacional. La demanda de agua en la zona es cubierta a partir de tomas de agua directa del Arroyo San Antonio y sus afluentes, represas/tajamares y perforaciones de agua subterránea en el Sistema Acuífero Salto Arapey (SASA). La intensificación de estas actividades y su gran concentración en un área relativamente reducida hace que sea de vital importancia una adecuada gestión de los recursos hídricos, tanto en cantidad como en calidad. Actualmente, según los datos de Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA) los permisos de toma directa del Arroyo San Antonio se encuentran totalmente agotados. La gran demanda, en especial de tomas directas del Arroyo San Antonio, motivó que en el año 2014 las diferentes organizaciones y usuarios del agua de la cuenca se coordinaran para la creación de Comisión de Cuenca del Arroyo San Antonio. Desde el momento de su creación dicha comisión consideró que el SASA debería ser incluido dentro del sistema por la coincidencia territorial y porque la mayoría de usuarios explota ambas fuentes de agua.

El SASA es una de las principales fuentes de agua para los diferentes productores de la zona, tanto para uso agroindustrial e inclusive para consumo humano y recreación. El mencionado acuífero es mixto, por tratarse de un acuífero sedimentario (Salto) sobre un acuífero fisurado (Arapey). Consiste en areniscas medias y conglomerádicas, de color rojizo, suprayacentes a basaltos en coladas, fracturados y alterados. Estos últimos corresponden a la Formación Arapey, la que desde el punto de vista hidrogeológico se comporta como un acuífero fisurado y que en determinadas áreas (alrededores de la ciudad de Salto) adquiere una potencialidad muy alta con perforaciones que erogan caudales superiores a los 60.000 l/h (Montaño, et al. 2006). Para las empresas perforistas, es de interés, en general, identificar el sistema de fracturas de la formación Arapey a la hora de ubicar una perforación hidrogeológica para asegurar caudales del orden mencionado. Ramos, J. (2016) recomendó realizar estudios de detalle utilizando métodos geofísicos combinados que permitan identificar zonas de debilidad subsuperficial con posibilidades colectoras de agua.

Por las características hidrogeológicas del SASA, es de esperar que se desarrolle una gran interacción directa con el sistema de drenaje superficial de la cuenca del Arroyo San Antonio. El caudal base del arroyo y afluentes puede estar en gran medida asociado a la descarga de agua subterránea del acuífero Salto y al drenaje subsuperficial de los suelos de la cuenca. Existen indicios de que este tipo de relación existe, como son perforaciones semi-surgentes y la presencia de vertientes/sangradores a lo largo del Arroyo San Antonio. Sin embargo, al no existir datos de elevación de agua y caudales en el Arroyo San Antonio, piezometría del acuífero detallada en las inmediaciones del arroyo, o un modelo de funcionamiento del flujo subterráneo es difícil poder afirmar que dicha conexión exista y aún menos poder cuantificarla.

Además de los problemas asociados a la cantidad de agua, el sistema presenta problemas asociados a la calidad. Se han constatado episodios de “booms” de algas en varios embalses en la cuenca, y se ha detectado la presencia de virus en agua subterránea y contaminación por nutrientes en varias perforaciones y en el propio Arroyo San Antonio (Gamazo et al., 2015b). A su vez dentro de la cuenca se encuentra ubicado el vertedero Municipal y funciona un feedlot, siendo estas dos actividades potenciales fuentes de contaminación tanto para el acuífero como para el arroyo.

La problemática expuesta hasta aquí deja en evidencia la necesidad real de avanzar en la caracterización de este

sistema y crear herramientas que faciliten la gestión del mismo. El presente proyecto plantea mejorar la caracterización de uno de los principales acuíferos de Uruguay, el SASA, y desarrollar un modelo matemático que servirá como herramienta para la gestión del acuífero. A su vez plantea caracterizar también el arroyo San Antonio, fuente de agua superficial cuya capacidad de toma se encuentra colmada según estimaciones de la DINAGUA, y sobre el cual hay indicios de que se encuentra hidráulicamente conectado con el SASA. Para este arroyo también se plantea el desarrollo de un modelo matemático como herramienta para la gestión del mismo. Las caracterizaciones que se realizarán sobre estos cuerpos de agua, además de relevar aspectos relacionados con la cantidad de agua y la hidrogeoquímica del acuífero, abordarán aspectos de calidad de las aguas, evaluando eventuales impactos de actividades potencialmente contaminantes en la cuenca, como los son el vertedero municipal y el funcionamiento de un feedlot.

El principal producto de este proyecto será el desarrollo de modelos que podrán ser tomados por la DINAGUA para trabajar en la gestión del sistema.

Para el desarrollo del proyecto es necesario realizar una caracterización de la geología de la zona (mediante un registro sedimentario, mapeo geológico de superficie y una caracterización geofísica) así como también una evaluación de los suelos y el uso de los mismos.

La caracterización del funcionamiento hidrológico tanto del sistema acuífero como del arroyo será realizada mediante la instalación de una red de monitoreo, la realización de curvas de aforo e interpretación de ensayos de bombeo.

La caracterización hidroquímica del sistema se desarrollará en base a campañas de muestreo de agua tanto superficial como subterránea.

### **Metodología/diseño del estudio**

Se detallan a continuación los métodos y metodologías implementadas durante el proyecto.

Para entender la estratigrafía y estructuras de las unidades Meso-Cenozoicas en Salto, se realizó un mapa geológico a escala 1:40.000, el cual se complementó con columnas estratigráficas basadas en descripción de 59 puntos y 78 muestras. 46 secciones delgadas teñidas se analizaron con un microscopio óptico Leica DM-2500. Los análisis modales se hicieron en 9 muestras contando entre 250 y 500 puntos según el método Gazzi-Dickinson. La petrografía convencional se acompañó de microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de difracción de rayos X. Estos últimos se realizaron en el CETMIC (CIC-CONICET, Argentina), usando un difractómetro Phillips PW1710, tanto sobre muestras de roca total no orientadas, como sobre la fracción arcilla orientada (en tres modos separados: glicoladas, secadas al aire y calentadas). Diez muestras fueron observadas usando un SEM Jeol NeoScope JCM-6000Plus. Las muestras fueron trituradas y molidas siguiendo procedimientos de rutina en los Laboratorios de Geología de la Sede Treinta y Tres del CURE. Los análisis geoquímicos se obtuvieron en Bureau Veritas Minerals Laboratories (Canadá), mediante ICP-ES y ICP-MS. El índice de alteración química (CIA; Nesbitt y Young, 1982) se calculó en base a las proporciones molares de  $Al_2O_3$ , la suma de  $CaO^*$  y  $Na_2O$ , y  $K_2O$ , donde  $CaO^*$  representa al Ca que reside en la fracción silicática solamente.

Para estudiar el subsuelo en los sectores en que no se contaba con información de perforaciones hidrogeológicas se relevaron 25 transectas de tomografía de resistividad eléctrica (ERT), adquiridas con un equipo modelo GD-10 de GEOMATIVE, que permite adquirir datos de SEV, ERT en 2D y 3D. Los datos se midieron con puestas con 24, 36, 48, 60 o 72 electrodos con separación entre electrodos de 10m y diferentes arreglos. Asimismo, se adquirieron 9 estaciones de TDEM con un equipo modelo AIE-2 de ELGEO. Para la medición se utilizó una única bobina (lazo coincidente) de forma cuadrada con 50 m de lado. Los datos de 37 estaciones SAMT fueron tomados de Ramos(2016), los cuales fueron adquiridos con un equipo modelo MTU-5A de la firma Phoenix Geophysics conectado a dos dipolos eléctricos ortogonales formados por dos pares de electrodos no polarizables con apertura MN de 50 m de longitud y a tres bobinas (magnetómetros) modelo AMTC30. Los datos fueron utilizados y reinterpretados. La información de los 30 SEV se obtuvo de una investigación hidrogeológica y geofísica realizada en 1993 en el marco del Programa de Cooperación EE.UU. - ROU con la colaboración de la DINAMIGE, en la que se exploraron 14 sitios distribuidos dentro del área de estudio. Según el informe, el método implementado fue el Schlumberger con apertura máxima de  $AB=600$  m. Los datos fueron digitalizados y reinterpretación en forma semiautomatizada fijando las profundidades en función de la información obtenida de las perforaciones ejecutadas luego de realizado el estudio mencionado, y se ajustó la resistividad. El error promedio obtenido en el ajuste fue del 3.8%. Los datos, al igual que los SAMT, fueron reinterpretados.

Todos los modelos geoelectrónicos obtenidos se interpolaron mediante el inverso de la distancia con anisotropía con suavizado automático. El volumen se discretizó en prismas rectangulares de 200 m de lado por 5 m de espesor, para una profundidad total de 100 m bnm.

Los datos de susceptibilidad magnética (55) se obtuvieron sobre afloramientos mediante un equipo modelo SM20 de la firma GF Instruments.

Para la caracterización hidroquímica se realizaron 2 campañas de muestreo. La primera fue del 1 al 3 de abril 2019 y la segunda, los días 23 y 24 de octubre del 2019. Se monitorearon 20 pozos y se recolectaron 6 muestras del arroyo San Antonio. Los muestreos sobre el arroyo se definieron según presencia o ausencia de actividades antropogénicas en los alrededores (ganadería, la agricultura, vertedero municipal). Se recogió una muestra compuesta contra de la corriente a 20-30 cm por debajo de la superficie y se colocó en frasco de PET de 500 ml para determinar los parámetros fisicoquímicos y T, CE (conductividad eléctrica), ORP (potencial redox) y OD (oxígeno disuelto) in situ. Se recogió otra muestra y se acondicionó en un matraz de vidrio esterilizado de 500 mL para análisis microbiológico. Todas se almacenaron a 4°C y se transportaron al Laboratorio de Agua y Suelos del Departamento del Agua para su posterior análisis. También se colectó una muestra en envase de vidrio color ámbar para envío a Laboratorio externo (DINAMIGE) para metales, metaloides y Fósforo total, y otra muestra en envase PET para envío al Laboratorio LAAI en Paysandú para determinación de detergentes, DBO5, Aceites y grasas, Sulfuro, CN, Nitrógeno Total y fenoles.

En las muestras de los 20 pozos se analizaron iones mayoritarios, dureza, alcalinidad, microbiológicos. En 4 pozos, elegidos de acuerdo a actividades antropogénicas cercanas posibles de originar contaminación, se colectaron dos muestras más, una muestra en envase de vidrio color ámbar para envío a Laboratorio externo (DINAMIGE) para metales, metaloides y Fósforo total, y otra muestra en PET enviada al Laboratorio LAAI en Paysandú para determinación de detergentes, aceites y grasas, y fenoles. Adecuadamente acondicionadas y conservadas a 4°C.

Todos los parámetros se analizaron por métodos oficiales de análisis APHA (Federation & APHA 2005). Para las mediciones in situ se utilizaron sondas multiparamétrica HACH HQ30d y SensION.

Se creó una base de datos espacial de un total de 32 pozos. Incluyendo 20 pozos de monitoreo y 12 pozos históricos de Abelenda E., 2016. Las estadísticas se realizaron en RStudio y para modelación hidroquímica EasyCHEM y PHREEQC.

Para identificar suelos y sus usos, se aplicaron técnicas geomáticas sobre imágenes satelitales Sentinel 2 y sobre las imágenes del vuelo nacional de IDE UY sobre las que se identificaron diferentes objetos de interés (ODI). Posteriormente, se utilizó la técnica de clasificación supervisada con muestra de entrenamiento. Para determinar el área cubierta por cada uno de los ODI, se utilizó la calculadora de área de QGIS.

En cuanto a la identificación de represas, se pudo observar, un resultado óptimo en cuanto a la detección de represas, a partir de la identificación de los cuerpos de agua en superficie mediante imágenes Sentinel 2. La información provista por DINAGUA indica que en la zona de estudio hay declaradas 35 represas en total, de las cuales 4 no están destinadas a uso de riego, sino a otros usos agropecuarios. Mediante el mapa generado a partir de las imágenes satelitales para la ubicación de embalses, se identificaron los embalses existentes en el área de estudio. Con esto se generó un nuevo mapa donde se agregan los embalses no registrados.

Para el estudio del comportamiento hidrológico del sistema, se instaló una amplia red de estaciones hidrometeorológicas que comenzó a operar en 2018. Se instalaron un total de 17 pluviómetros automáticos de tipo doble cubeta basculante. Para su instalación se requirió de bases conformadas por palets y bloques de hormigón, que acompañados por sensores permiten que el equipo permanezca inmóvil frente a fuertes vientos y tormentas. En algunos casos, se instalaron los pluviómetros en postes o fueron montados en bases de hormigón. Para los pluviómetros que carecían de borde biselado, se realizó una corona de alambre para evitar la presencia de aves.

Para el mantenimiento y la descarga de datos de los equipos, se realizaron salidas al campo bimensuales. El mantenimiento implica el cambio de baterías, limpieza, fumigación contra insectos y sincronización de reloj interno del instrumento. Se realizó un análisis de consistencia y homogeneidad para las observaciones pluviométricas de todos los equipos instalados, para verificar la sincronía entre todas las estaciones y descartar un eventual adelanto o retraso de la fecha y hora de cada estación.

Se instalaron a lo largo del curso de agua 6 limnigrafos (nivel de agua). Para ello se utilizaron sondas de presión con resolución temporal de 15 minutos. Tres de ellas también son estaciones de caudal ya que tienen definida la relación nivel-caudal: San Antonio Chico H1 (22,5 km<sup>2</sup>), Cabecera H2 (33,3 km<sup>2</sup>) y Ruta 3 H3 (106,8 km<sup>2</sup>). Las mismas fueron ubicadas estratégicamente en diferentes puntos de la cuenca para capturar la heterogeneidad de la respuesta hidrológica en su dominio.

Para construir las relaciones de nivel y caudal se realizaron mediciones directas de caudal mediante aforos con ADV, ADCP e imágenes de video. Para ello se utilizó un FlowTracker ADV SonTek, StreamPro ADCP Teledyne RDI 2000 kHz y videos obtenidos con cámaras de alta resolución, teléfonos celulares y drones. Las filmaciones realizadas captaron el movimiento del flujo, acompañado de trazadores en la superficie del agua (chips de madera), para evaluar la metodología para estimar caudales a partir de velocimetría por imágenes con el software RiVeR (Rectification of Image Velocity Results).

Adicionalmente, se utilizó el software HEC-RAS, para desarrollar un modelo hidrodinámico 1D en las secciones de aforo con mediciones directas limitadas. El objetivo fue reproducir la relación nivel-caudal en aquellos tramos con aforos limitados.

Para la modelación hidrológica superficial se utilizó la plataforma WFLOW y el modelo Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning (HBV) el cual consiste en una versión distribuida del modelo hidrológico agregado HBV-96 (Lindström et al., 1997). Para el tránsito de la escorrentía generada en cada celda por la red de drenaje el código utiliza el tránsito con onda cinemática (Ecuaciones de Saint-Venant 1871).

Con el fin de simplificar el modelo se le realizó un análisis de sensibilidad y se redujo el número de parámetros (Hornberger and Spear, 1981). Como función objetivo se utilizó el criterio de eficiencia de Kling-Gupta (Gupta et al., 2009).

En la evaluación del sistema subterráneo, se desarrolló un modelo matemático del Sistema Acuífero Salto Arapey (SASA). Para la construcción del modelo hidrogeológico, se utilizó información de perforaciones de diferentes fuentes (OSE, DINAGUA, PRENADER, DINAMIGE y empresas perforadoras Raúl Silva y GeoPer), se utilizó información de los relevamientos geofísicos, del relevamiento de afloramientos y la información de nivel piezométrico recolectada en tres campañas de relevamiento piezométrico en 41 perforaciones y de una red de monitoreo continuo con registradores de nivel automático instalados en 12 perforaciones.

Se consideraron como límites del área de estudio el arroyo Itapebí al norte, el límite de la cuenca del arroyo San Antonio al este (extendiendo un poco el área hasta alcanzar los límites norte y sur), el río Dayman al sur, y el río Uruguay y el lago de Salto Grande al oeste).

El desarrollo implicó la creación de un modelo geológico 3D donde se representaron todas las formaciones del SASA (Nueva Hespérides, Salto, Fray Bentos, Guichón, Arapey). A partir de estos sólidos se generaron dos unidades hidrogeológicas para la modelación matemática, una que agrega todas las formaciones sedimentarias y una para la formación basáltica. Esto se debe principalmente a que, en general, no se cuenta con información detallada sobre la geometría y las propiedades hidráulicas de las mismas. Es más, los pozos por lo general explotan indiscriminadamente todos los niveles donde existen aportes y por lo tanto los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de ensayos de bombeo y las observaciones de niveles piezométricos suelen integrar varias formaciones.

Para la construcción de dichos modelos se utilizó el software Groundwater Modeling System (GMS, Gurwin, & Lubczynski 2005; Izady et al. 2014) de la compañía Aquaveo en la versión 10.2. Dicho software también es utilizado para construir el modelo de flujo del sistema utilizando el código MODFLOW (McDonald & Harbaugh 2003; Harbaugh, 2005)).

Para la estimación de las extracciones del sistema se solicitó a DINAGUA la información sobre los caudales autorizados y se incluyó información de otras fuentes (OSE, PRENADER, DINAMIGE, empresas perforadoras Raúl Silva y GeoPer).

Para la estimación de los parámetros hidráulicos del SASA se interpretaron ensayos de bombeo de OSE y 2 ensayos realizados por el Departamento del Agua.

Para la estimación de la recarga se utilizó la herramienta EasyBal (Vázquez-Suñé, E. & Castro, 2002). El método requiere además de los datos necesarios para el cálculo de la ETP valores de Capacidad de Campo, el espesor radicular a considerar, Punto de Marchitez Permanente y un Coeficiente de Laminación.

## **Resultados, análisis y discusión**

El estudio geológico realizado tiene implicancias sobre las predicciones como reservorios de agua, ya que tanto el tipo como la cantidad de porosidad y la comunicación entre gargantas porales están influenciadas por procesos de disolución diferencial y cementación. La porosidad intergranular de la Fm. Arapey está parcialmente obliterada por autigénesis de heulandita-clinoptilolita y cementación de ópalo-calcedonia. Las areniscas de grano fino de la Formación Guichón (FmG) que afloran en Corralito y costa del Río Daymán presentan una porosidad primaria del orden del 20%. La illita rellena los espacios porales incluyendo las gargantas que conectan los poros eliminando la porosidad. La Fm. Fray Bentos (FmFB) se encuentra apoyada sobre la FmG (en Corralito y Río Daymán) y sobre los basaltos de la Fm. Arapey (en Arbisu y costa del Río Uruguay). Las litologías dominantes son vaques y diamictitas con cemento carbonático muestran porosidad secundaria generada por procesos de disolución a lo largo de los planos de estratificación; cloritas y esmectitas recubren los granos detríticos. Si bien la FmFB se considera como acuitardo, esta unidad podría estar jugando un rol importante como acuífero fisurado/kárstico en el sistema acuífero Salto, especialmente debido a que los procesos de disolución se encuentran asociados a los lineamientos principales.

Al sur del área, sobre FmG, se depositaron los espesores más importantes de areniscas y conglomerados inconsolidados de la Formación Salto (FmS). Se detecta la presencia de cemento hematítico y de forma subordinada relictos de cemento silíceo que reducen la porosidad y permeabilidad efectiva. En la ciudad de Salto, Colonia Garibaldi y la costa del Río Uruguay la FmS tiene una potencia que no supera los 6 metros, se apoya sobre la FmFB y se caracteriza por la

intercalación de arenas silicificadas con una porosidad primaria cercana al 10% pero con una permeabilidad reducida.

Desde el punto de vista geoelectrico, las imágenes de ERT mostraron anomalías verticales de baja resistividad en los basaltos asociadas a la presencia de fracturas y valores ascendentes con la profundidad, con una primera capa con valores bajos de resistividad (alteración y fracturamiento), seguida de un gradiente vertical creciente (transición basalto no masivo-basalto masivo). Con datos de SAMT se construyó un mapa de tipo de curvas donde se identificaron 4 zonas. Al NO la curva A-K es debida a cobertura sedimentaria de bajo espesor, seguida de basaltos alterados y basaltos masivos hasta profundidades de 1000 m donde se encuentra el Sistema Acuífero Guaraní (SAG). En el sector NE se observan curvas tipo K. La primera capa, corresponde a la zona de transición de los basaltos y la tercera corresponde al contacto con el SAG. Hacia el centro y sur se observan curvas tipo H-K donde la primera capa corresponde a formaciones sedimentarias no saturadas seguidas de valores bajos característicos de la zona saturada. En el SE se agruparon 4 sitios, los cuales tienen un comportamiento diferente y no se corresponden con las otras zonas. Los SEV al norte y al sur tienen curvas tipo H-A, mientras que al centro, tipo H. El comportamiento en profundidad es similar a los SAMT, y la diferencia en el tipo de curva es por la mayor resolución de los SEV en los primeros metros. El TDEM permitió esclarecer un sitio relevado por ERT en el cual no había podido interpretar la profundidad de Fm. Arapey. Con los datos medidos se hizo una caracterización de las formaciones presentes y se elaboró un modelo de resistividad en 3D.

Los datos medidos de susceptibilidad magnética muestran que hay diferencias significativas entre los litotipos presentes en el área, lo que constituye un complemento de interés para la cartografía geológica de detalle.

En cuanto a las aguas subterráneas, se determinó que resultaron mayoritariamente del tipo magnésica-cálcica-bicarbonatadas. Los pozos P4, P7 y P18 son del tipo mezcla con aguas del tipo sulfato cloruradas. En la segunda campaña el P4 y P7 muestran corrimiento hacia mezcla de clorurada sódica-bicarbonatada seguramente por interacción con agua de lluvia.

Mediante diagrama de Schöeller se estudió la evolución temporal del agua en el acuífero en una misma línea de flujo o en un mismo sitio, y procesos fisicoquímicos que estén ocurriendo como intercambio iónico, oxidación, reducción o mezclas de diversos tipos de aguas. El P18 podría estar en proceso de incorporación de sodio mediante intercambio iónico y el P11 incorporando cloruros y sulfatos esto puede deberse a mecanismos de propagación de contaminantes agrícolas desde la superficie como podemos ver en el P5, P11, P17, P18 (aumento en cloruros) y P18 y P7 (aumento en sulfatos).

Se evidenció ocurrencia de reacciones de disolución de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), de silicatos magnésicos y basaltos dolomíticos, con intercambios iónicos. Las aguas muestreadas en abril estarían sobresaturadas en aragonita, calcita y dolomita, con presencia de  $\text{CO}_2(\text{g})$  sobresaturado en agua. Si se comparan los índices de saturación de aquellos minerales cuyas aguas están sobresaturadas en los mismos, entre abril y octubre se observa hay algún proceso que podría estar quitando el calcio y el magnesio de las aguas, junto con una tendencia a aumentar la solubilidad del  $\text{CO}_2$ .

De manera peculiar, el As estaría relacionado con algún mineral que está liberando K y F-. Los altos niveles de fósforo, nitrato y sulfato en pozos podrían indicar contaminación agrícola-industrial.

Las aguas de Fm. Arapey estarían relacionadas con As, Mg,  $\text{NO}_3$  y CE, en cambio las de otras formaciones (Salto, Fray Bentos etc.) se relacionan más con pH y el Zn.

Según los resultados en arroyo, solo se evidenció contaminación por coliformes fecales, y fósforo total.

En casi el 50% de los pozos los niveles de arsénico total (tAs) detectados superan a los recomendados por las guías de la OMS para el agua potable (10  $\mu\text{g/L}$ ). El fósforo total presenta niveles por encima de los 25  $\mu\text{g/L}$  en cuatro de los 20 pozos. En cuanto a microbiológicos, se detectaron coliformes fecales en 9 de los 20 pozos analizados.

Con las herramientas geomáticas se procesaron imágenes satelitales para obtener un mapa de suelos y sus usos, el número de represas e invernaderos para evaluar el grado de formalismo en cuanto a permisos de aprovechamientos. Del análisis realizado, se obtuvo que la superficie cubierta por invernaderos es de 2.85  $\text{km}^2$ . Se estima que 126 pozos suministran agua a un área total de invernáculos de 0.93  $\text{km}^2$ . Mediante los datos que se tenían de los registros se estimó una demanda promedio total de 4.962.365  $\text{m}^3$ . Se pudieron identificar 64 embalses que no se encuentran en los registros de DINAGUA. Esto se puede deber a que el registro no esté actualizado y/o las coordenadas no son correctas. Asimismo, puede que algunos embalses actualmente no se encuentren operativos por esta razón no se encuentran registrados o que su registro esté en trámite.

Para el modelo matemático Arroyo San Antonio, se realizó un estudio de velocimetría por video en la estación ByPass, donde se utilizó el equipo StreamPro ADCP con el que se obtuvo un valor de 0.808  $\text{m}^3/\text{s}$ , mientras que con el software RiVeR el valor estimado fue de 0.8  $\text{m}^3/\text{s}$ . En la estación de aforo Cabecera, se utilizó el equipo Flow Tracker obtenido un valor correspondiente a 0.1088  $\text{m}^3/\text{s}$ , mientras que con el software RiVeR el valor estimado fue de 0.09  $\text{m}^3/\text{s}$ . Estos resultados muestran la viabilidad de la técnica para las condiciones en que se realizó la campaña.

La estimación de la relación nivel-caudal para caudales altos se realizó con apoyo de la herramienta HEC-RAS. Para la



estación Cabecera H2 y San Antonio Chico H1 se ajustaron curvas con un solo tramo y para la estación Ruta 3 H3 se ajustó una curva con 2 tramos.

El análisis de sensibilidad del modelo WFLOW-HBV revela que KGE es sensible sólo a 4 de los 12 parámetros del modelo. Los parámetros clasificados según el índice de sensibilidad son: PERC (0,49), KHQ (0,29), LP (0,24), ICF (0,23), N (0,16), HQ (0,16), BetaSeepage (0,10), K4 (0,09), Nriver (0,07), FCmult (0,07), AlphaNL (0,05), Cflux (0,04), donde el índice de sensibilidad es el número entre paréntesis. Los primeros 4 parámetros se mantienen para la optimización, mientras que los otros 8 se consideran valores constantes.

Los valores de KGE obtenidos para la calibración y validación estuvieron por encima de 0.70, lo cual indica un muy buen ajuste.

Las curvas de duración de caudales se calcularon con registros largos de caudal. En ausencia de registros extensos de caudal, la FDC se genera mediante simulación hidrológica, lo cual permite la predicción en sitios sin datos observados. Esta componente del proyecto, aplica el modelo distribuido WFLOW-HBV, que ha sido espacialmente validado de forma cruzada en un período de tiempo relativamente corto (3 años). Teniendo en cuenta esta limitación, el dominio temporal del modelo se ha ampliado a un período de 30 años (1991-2020) utilizando el largo registro de la estación agroclimática INIA-SG. Esta información se ha compartido con el paquete SanAntonioApp R (Navas, 2021), que permite realizar consultas de FDC por mes y ubicación. El usuario elige el mes con una entrada deslizante, y las ubicaciones se seleccionan con un simple clic en el mapa. (<https://rafaelnavas23.shinyapps.io/SanAntonioApp/>)

Del relevamiento continuo de niveles de piezométricos, realizado con registradores automáticos de nivel en 12 pozos, se pudo comprobar que los niveles estáticos presentaron variaciones máximas del orden de 1 metro. Dado que este margen de variación se encuentra dentro del margen de error de un modelo para un sistema con las características del SASA, se optó por desarrollar un modelo estacionario basado en los relevamientos piezométricos realizados en 3 campañas en 41 pozos del sistema.

Para el modelo se consideraron 844 perforaciones activas, explotado un caudal promedio de 198 m<sup>3</sup>/d con pozos que explotan caudales máximos en el orden de los 2.000 m<sup>3</sup>/d y pozos que explotan caudales mínimos del orden de 3 m<sup>3</sup>/d.

Se zonificó cada unidad hidrogeológica en 2 zonas para la conductividad hidráulica, para la recarga se consideraron 3 zonas y se consideró un valor de conductancia para cada cuerpo de agua superficial del contorno, mientras que para el San Antonio se consideró un valor por tramo.

Se calibró el modelo mediante PEST (Doherty, 2015) obteniendo un muy buen ajuste, con un coeficiente de correlación de 0.985 entre los valores observados y simulados y un promedio de diferencias de 0.33 m con una desviación estándar de 2.34 m.

Se obtuvieron valores de conductividad hidráulica razonables para ambas unidades hidrogeológicas (del orden 14.5 m/d para Arapey y 1.5 m/d para el sedimentario), y una alta conectividad vertical entre ambas unidades en la zona sur este. Los valores de conductancia obtenidos fueron altos para el río Uruguay y el Daymán, mientras que para el resto de los contornos fueron bajas. El arroyo San Antonio mostró tramos con alta y con baja conductancia.

Del balance hidráulico del sistema se comprobó que la recarga representa el 64% de la entrada de agua, y el resto ingresa principalmente por el Arroyo San Antonio. Las principales salidas del sistema se dan por los ríos Uruguay y Daymán. Si bien el 35 % del agua que ingresa al sistema lo hace por el arroyo San Antonio, el 28 % también sale por dicho arroyo, lo cual muestra la alta conexión existente entre el acuífero y el arroyo. Los bombeos representan el 28 % del volumen de salida del SASA.

Se evaluaron 3 posibles escenarios, uno duplicando los bombeos, otro reduciendo la recarga a un 80% y otro combinando ambos. En todos los escenarios la descarga del acuífero al arroyo San Antonio se vio afectada significativamente, llegando a reducirse hasta el 40 % de su valor actual en el escenario menos favorable.

## **Conclusiones y recomendaciones**

Del estudio petrográfico y geoquímico del registro de la Cuenca Chaco-Paraná (sector NW de la Cuenca Norte) se puede concluir que, en el entorno de la ciudad de Salto, muestra la proveniencia de las sucesiones Cretácicas (Fms. Arapey y Guichón) y su cobertura cenozoica (Fms. Fray Bentos y Salto) a través de la comprensión de los efectos que la meteorización y la diagénesis ejercieron sobre la composición detrítica original. Las sucesiones sedimentarias sufrieron bajo a moderada meteorización en condiciones de clima semiárido a árido.

Los procesos diagenéticos principales observados son cementación silíceo y carbonática, autigénesis de minerales de las arcillas y zeolitas, así como disolución de granos y cementos. Los cambios en la porosidad primaria y secundaria y en la permeabilidad incluyen reducción por cementación, autigénesis y compactación, pero también, aumento por disolución.

Más allá de los cambios composicionales post-depositacionales las rocas clásticas muestran una proveniencia de una fuente máfica y escaso reciclaje. Los datos geoquímicos y petrográficos sugieren una proveniencia principal del

basamento precámbrico, de rocas sedimentarias fanerozoicas y de los basaltos de la Fm. Arapey.

Los diferentes métodos geofísicos permitieron investigar el subsuelo dentro del área de estudio con diferente profundidad y resolución según se requería. Los métodos electromagnéticos permitieron estudiar zonas profundas que subyacen a una capa altamente resistiva complementando lo estudiado con los métodos eléctricos en corriente continua.

Con los datos obtenidos a partir de la inversión de los datos geofísicos, se logró caracterizar las formaciones presentes y construir un modelo de resistividad en 3D del subsuelo del área de estudio. La medición de susceptibilidad magnética, permite identificar litotipos, de interés para apoyar la cartografía geológica en superficie.

Los parámetros químicos, microbiológicos y fisicoquímicos seleccionados permitieron conocer si existían ingresos al sistema de componentes de actividades antropogénicas en la zona de estudio, que pudieran relacionarse al deterioro de la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos y la calidad de las aguas.

Las aguas subterráneas resultaron del tipo magnésica-cálcica-bicarbonatadas con algunas excepciones de mezcla clorurada. Se describieron hipótesis sobre la incorporación de minerales en las aguas y mediante qué procesos se estarían llevando a cabo.

En cuanto a la presencia de coliformes fecales en algunos pozos, es recomendable que el usuario tenga conocimiento de ello y desinfecte la misma antes de usarla. Su probable origen es la contaminación por materia fecal, que filtra a través de fugas en las fosas sépticas y que seguramente es transportada a través del medio poroso por los flujos subterráneos.

Los altos niveles de fósforo total y nitrato que presentan algunos pozos y los altos niveles de fósforo total sobre algunos sitios sobre el Arroyo podría ser uno de los factores que promueva la aparición de los signos de eutrofización sobre el Arroyo San Antonio, hacia la desembocadura sobre el Río Uruguay. El origen de estos nutrientes además de provenir de la descomposición de la materia orgánica, podrían provenir de fertilizantes, o agroquímicos.

En cuanto a los niveles de As total detectados, el 50% de los pozos en la primera campaña superaron los valores máximos recomendados para agua para consumo humano (OMS, 10ug/L). Esto amerita continuar estudiando para comprender los procesos que pueden estar sucediendo a nivel subterráneo que puedan explicar la liberación del mismo del mineral, de depósitos del tipo vidrio volcánico o fertilizantes. Este último, es menos probable ya que hace mucho tiempo se prohibió su uso en nuestro país.

Por lo tanto, estos resultados generados ayudarán a promover metodologías que apoyen a la gestión de los recursos hídricos que tengan en cuenta la prevención de la calidad del agua según su uso, pensando en el cuidado de la calidad del agua y del medioambiente, de manera que generar el uso de estos recursos hídricos de manera sustentable.

El procesamiento digital de imágenes, permitió realizar la identificación de diferentes objetos de interés dentro del AOI. En el caso de las imágenes del IDE UY, fue más exitosa la identificación de invernaderos, mientras que a partir de las imágenes Sentinel 2, se identificaron de mejor manera las represas.

Se instrumentó una red hidrométrica para la cuenca del Arroyo San Antonio con sensores de nivel en varios puntos del arroyo. Dichos equipos registraron valores en el periodo 2018-2020. Durante ese periodo se realizaron aforos y se desarrollaron las curvas de aforos que relacionan el nivel con el caudal y permiten obtener la serie temporal de caudal. Esto se realizó para 3 estaciones.

Las actividades realizadas vinculadas a aforos permiten afirmar que para los cauces estudiados y bajo las condiciones en que se realizaron los mismos, la técnica de velocimetría por imágenes brinda resultados similares a los obtenidos con equipos acústicos doppler.

Se implementó un modelo matemático del arroyo en la plataforma WFLOW con el modelo HBV. El modelo presentó ajuste aceptable con valores de KGE superiores a 0.7 en las 3 subcuencas consideradas. Los residuos de la modelación hidrológica superficial son coherentes con los resultados de la modelación subterránea. Dichos residuos están correlacionados con la recarga/descarga del acuífero. Futuros trabajos deberán estar orientados a desarrollar modelos de error y corregir dichos sesgos mediante técnicas matemáticas y estadísticas.

Se desarrolló la aplicación SanAntonioApp, la cual a su vez es un paquete R. La aplicación contiene el modelo WFLOW-HBV de la cuenca de captación de San Antonio, el conjunto de datos de entrada, las salidas del modelo y las herramientas de visualización interactivas de las curvas de duración del flujo. La aplicación puede usarse para estimar la frecuencia de un flujo dado o el flujo para una frecuencia dada en cualquier punto del arroyo, lo cual es útil para estimar la disponibilidad de agua.

A partir de información litológica de pozos, relevamientos geológicos de afloramientos y campañas de geofísica se desarrolló un modelo 3D de las formaciones geológicas que componen el SASA.

Se instrumentó con sensores de nivel el sistema y se realizaron campañas de relevamiento piezométrico. Los datos obtenidos en el periodo 2018-2020 mostraron que el SASA no presentó variaciones significativas de nivel por lo que el sistema puede modelarse como estacionario.

La principal entrada de agua del SASA es a través de la recarga 317,565 m<sup>3</sup>/d (64 %) y de los cuerpos de agua superficial

179,483 m<sup>3</sup>/d (36 %), donde casi la totalidad de esta agua proviene del Arroyo San Antonio. A su vez, este arroyo representa una importante salida de agua del SASA, con 140,680 m<sup>3</sup>/d (lo cual representa el 28 % de las salidas) lo que deja una recarga neta del Arroyo al SASA de 32,555 m<sup>3</sup>/d (7% de las entradas). En cuanto a los bombeos del SASA representan el 28 % de las salidas (138,107 m<sup>3</sup>/d. La principal entrada de agua al SASA proveniente del Arroyo San Antonio se centra en el tramo 1 de este arroyo. Dicho tramo coincide con la estación de caudales H3 del modelo hidrológico superficial. Esta zona presenta un sesgo con sobreestimaciones para el modelo hidrológico superficial, lo cual puede deberse a una pérdida por infiltración que el modelo superficial no es capaz de captar. Este resultado vincula el modelo hidrológico superficial y el subterráneo y muestra la importante vinculación entre el SASA y el Arroyo San Antonio.

En cuanto a los escenarios evaluados se comprobó que un aumento en la explotación del SASA o la disminución de sus entradas tiene un impacto sobre la descarga que el SASA realiza sobre el Arroyo San Antonio.

El presente proyecto muestra lo estrechamente vinculados que se encuentran el SASA y el Arroyo San Antonio, lo cual es de suma importancia desde el punto de vista de la gestión ya que de acuerdo a los criterios manejados por la DINAGUA se ha alcanzado el máximo de permisos para extracciones en el arroyo. Los resultados indican que un aumento en la explotación del acuífero repercutirá en una menor descarga hacia el arroyo reduciendo el caudal del mismo.

#### Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos se recomienda realizar esfuerzos para realizar relevamientos piezométricos en la red propuesta de forma semestral y mantener divers en algunos puntos para evaluar posibles variaciones en el comportamiento cuasi estacionario que el acuífero está presentando.

Si bien el modelo hidrológico superficial desarrollado presenta muy buenos resultados, sería adecuado incrementar las estaciones con registro de nivel y curva de aforo. Al menos para el tramo entre las estaciones H2 y H2 (arroyo del sauce) y el tramo al norte (Cañada del Ubajai). Esta instrumentación permitiría establecer una mejor relación entre el acuífero y el sistema hidrológico superficial especialmente en aquellos tramos del río que presenten comportamiento intermitente.

A vez, la estrecha vinculación entre los cuerpos de agua subterráneos y superficiales indica que sería conveniente evaluar realizar una modelación conjunta subterránea y superficial. El desarrollo práctico de este tipo de modelos es relativamente reciente, no más de 2 décadas (Maxwel et al. 2014), y no tiene antecedentes en nuestro país. Los resultados del presente proyecto indican que el Arroyo San Antonio y el SASA representan una gran oportunidad para aplicar este tipo de modelos.

Los métodos y metodologías aplicados en esta investigación son recomendados implementar en futuras investigaciones para seguir avanzando en el conocimiento de sistemas hidrológicos de Uruguay.

## Referencias bibliográficas

- Abre, P., Blanco, G., Gaucher, C., Frei, D., & Frei, R. (2020). Provenance of the Late Ediacaran Rocha Formation, Cuchilla Dionisio Terrane, Uruguay: Tectonic implications on the assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, 342, 105704. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105704>.
- Blanco, G., Abre, P., Ferrizo, H., Gaye, M., Gamazo, P., Ramos, J., Banega, R., Erasun, V., Alvareda, E., Sapriza, G., Saracho, (2019). Petrografía Sedimentaria del Acuífero Salto, Uruguay. *Proceedings of the IX Congreso Uruguayo de Geología*, Trinidad, Uruguay, pp. 133.
- Blanco, G., Rajesh, H. M., Gaucher, C., Germs, G. J., & Chemale Jr, F. (2009). Provenance of the Arroyo del Soldado Group (Ediacaran to Cambrian, Uruguay): implications for the paleogeographic evolution of southwestern Gondwana. *Precambrian Research*, 171(1-4), 57-73.
- Bossi, J., Campal Gennari, N., Ferrando, L. A., Gancio, F., Montaña, J. R., Morales, H. L., ... & Sprechmann Heidenreich, P. W. (1998). Carta geológica del Uruguay: a escala 1/500.000 (No. 55 (899) CAR).
- Bossi, J., Caggiano, A., & Oliveira, R. (2000). Regiones geológicas para aplicación agronómica. Montevideo, Facultad de Agronomía.
- Bossi, J. (2006). Magmatismo hipoabisal básico gondwánico: un nuevo aporte al reconocimiento de terrenos tectono-estratigráficos en Uruguay. *Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología*, 13, 34-48.
- Bossi, J., Ferrando, L., Montaña, J., Campal, N., Morales, H., Gancio, F., ... & Sprechmann, P. (2001). Carta Geológica del Uruguay: Escala 1/500.000: Versión 2.0. CD-ROM). Montevideo: Facultad de Agronomía.
- Bossi, J., & Gaucher, C. (2004). The Cuchilla Dionisio Terrane, Uruguay: an allochthonous block accreted in the Cambrian to SW-Gondwana. *Gondwana Research*, 7(3), 661-674.
- Cai, X., McKinney, D. C., & Lasdon, L. S. (2003). Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management. *Journal of water resources planning and management*, 129(1), 4-17.
- Carrión, R., Heinzen, W., Massa, E. (2011). "Otra mirada al agua subterránea en el Uruguay", *Uruguay Ciencia* N° 12. ISSN 1688 - 3934. 9-12.
- Catanha, M., Sacasas León, C., & Pérez Lazo, J. (2014). Criterios para localizar zonas acuíferas en Caimbambo, Angola. *Ingeniería Hidráulica y ambiental*, 35(3), 20-32.
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172.
- Doherty, J. (2015). Calibration and uncertainty analysis for complex environmental models. Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing.
- Estación experimental Cajamar, (2005). Dosis de riego para los cultivos hortícolas bajo invernadero en Almería. Almería España.
- Fedo, C. M., Wayne Nesbitt, H., & Young, G. M. (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10), 921-924.
- Federation, W. E., & APH Association. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA.
- Gamazo P, Ramos J, Olivera M, (2015) evaluación y actualización de los modelos del SAG de zonas piloto de Uruguay, Informe técnico DIANGUA
- Gaucher, C., Bossi, J., Blanco, G., (2009). Palaeogeography. Neoproterozoic-Cambrian evolution of the Río de la Plata Palaeocontinent. En: Gaucher, C., Sial, A. N., Halverson, G. P., & Frimmel, H. E. (Eds.). (2009). Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, global change and evolution: a focus on South Western Gondwana. Elsevier., pp. 131-141.

- Gomasasca, M. A. (2010). Basics of geomatics. *Applied Geomatics*, 2(3), 137-146.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- Gurwin, J., & Lubczynski, M. (2005). Modeling of complex multi-aquifer systems for groundwater resources evaluation—Swidnica study case (Poland). *Hydrogeology Journal*, 13(4), 627-639.
- Hansen, R. O., Racic, L., & Grauch, V. J. S. (2005). Magnetic methods in near-surface geophysics. In *Near-surface geophysics* (pp. 151-176). Society of Exploration Geophysicists.
- Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process (pp. 6-A16). Reston, VA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hornberger, G. M., & Spear, R. C. (1981). Approach to the preliminary analysis of environmental systems. *J. Environ. Mgmt.*, 12(1), 7-18.
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A. N., Alipoor, A., Joodavi, A., & Brusseau, M. L. (2014). A framework toward developing a groundwater conceptual model. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(9), 3611-3631. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0971-9>
- Lindström, H., Södergren, S., Solbrand, A., Rensmo, H., Hjelm, J., Hagfeldt, A., & Lindquist, S. E. (1997). Li<sup>+</sup> ion insertion in TiO<sub>2</sub> (anatase). 2. Voltammetry on nanoporous films. *The Journal of Physical Chemistry B*, 101(39), 7717-7722.
- Loucks, D. P. (2000). Sustainable water resources management. *Water international*, 25(1), 3-10.
- Maxwell, R. M., Putti, M., Meyerhoff, S., Delfs, J. O., Ferguson, I. M., Ivanov, V., ... & Sulis, M. (2014). Surface?subsurface model intercomparison: A first set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. *Water resources research*, 50(2), 1531-1549.
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., & original authors of MODFLOW. (2003). The history of MODFLOW. *Groundwater*, 41(2), 280-283.
- MGAP-DIEA, (2020). Anuario estadístico agropecuario 2020. Montevideo, Uruguay.
- Milani, E. J., & Zalan, P. V. (1999). An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America. *Episodes-News magazine of the International Union of Geological Sciences*, 22(3), 199-205.
- MVOTMA, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. «Segunda Comunicación Nacional a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático». Unidad del Cambio Climático. (2004), 44-46. Disponible en [https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/urync2\\_1.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/urync2_1.pdf) Acceso noviembre 2021.
- Nesbitt, H., & Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *nature*, 299(5885), 715-717. doi:<http://dx.doi.org/10.1038/299715a0>
- Orellana, E. (1972). *Prospección geoelectrica en corriente continua* (Vol. 1). Madrid: Paraninfo.
- Perdomo, S., Ainchil, J., Kruse, E. VII Congreso Hidrogeológico Argentino (Salta, 2011). Disponible en <http://hdl.handle.net/10915/26452> acceso mayo 2016.
- Pulido-Velázquez, M., Andreu, J., & Sahuquillo, A. (2006). Economic optimization of conjunctive use of surface water and groundwater at the basin scale. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(6), 454-467.
- Ramos, J. (2015) "Influencia del Lago de la Represa de Salto Grande sobre el Acuífero Salto Chico". Tesis en opción al grado de Master (inédita), Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.
- Ramos, J., de Souza, R., Blanco, N., Saravia, C., Bentancur, O., Cánepa, P., Ferreira, Á., de los Santos, J., (2014). Utilización de la energía geotérmica para calefacción de invernaderos. Salto, Uruguay.
- RAMOS, J. (2016). Caracterización geólogo-geofísica de un sector del sistema acuífero Salto-Arapey mediante el empleo del SAMT y técnicas geomáticas. Tesis de Maestría en Geofísica Aplicada, Departamento de Geociencias, CUJAE, Cuba.
- Ramos, J., Gamazo, P., Saracho, A., Rodríguez, W., Carraz, O., (2017). Caracterización geoelectrica de un sector de los acuíferos Salto y Arapey mediante el empleo de SEV y sondeos audiomagnetotéluricos. *Revista SUG N°20*, 30, 36.

- Ross, A. (2018). Speeding the transition towards integrated groundwater and surface water management in Australia. *Journal of hydrology*, 567, e1-e10.
- Simpson, F., & Bahr, K. (2005). *Practical magnetotellurics*. Cambridge University Press.
- Sophocleous, M. (2000). From safe yield to sustainable development of water resources—the Kansas experience. *Journal of hydrology*, 235(1-2), 27-43.
- Telford, W. M., Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.
- Ubilla, M., (2004). La Formación Fray Bentos (Oligoceno Tardío) y los mamíferos más antiguos de Uruguay. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. and Martínez, S. (eds.): *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos minerales, Cenozoico*, DI.R.A.C. Facultad de Ciencias, Montevideo, pp. 83-104.
- Vázquez-Suñé, E. y Castro, A., 2002. *Planilla Easy-Bal - Curso Internacional de Hidrología Subterránea*. Barcelona.
- Veroslavsky, G., Aubet, N., MARTÍNEZ, S., HEAMAN, L. M., Cabrera, F., & Mesa, V. (2019). Late Cretaceous stratigraphy of the southeastern Chaco-Paraná Basin ("Norte Basin"—Uruguay): the maastrichtian age of the calcretization process. *Geociências*, 38(2), 427-449.
- Veroslavsky, G., Montaña, J., (2004). Sedimentología y estratigrafía de la Formación Salto (Pleistoceno). En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. and Martínez, S. (eds.): *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos minerales, Cenozoico*, DI.R.A.C. Facultad de Ciencias, Montevideo, pp. 147-166.
- Will, T. M., & Frimmel, H. E. (2018). Where does a continent prefer to break up? Some lessons from the South Atlantic margins. *Gondwana Research*, 53, 9-19.

## **Licenciamiento**

Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. (CC BY-NC-ND)