

CUANTIFICACIÓN DE LOS FLUJOS DE RETORNO EN SISTEMAS IRRIGADOS MEDIANTE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Gonzalo Medina¹, Andrés Saracho¹, Elena Alvareda¹, Mario Perez Bidegain², Rafael Navas¹

RESUMEN: Los flujos de retorno podrían presentar un aporte fundamental en los cursos naturales de los sistemas irrigados, por lo que su medición precisa es esencial. Esta cuantificación podría realizarse mediante la conductividad eléctrica como variable predictiva para estimar las entradas de flujo base en tramos de río entre puntos de monitoreo. La conductividad, que refleja la concentración de iones cargados, puede medirse con sensores económicos, en intervalos de tiempo similares a los de la medición de nivel y caudal. Este estudio tiene como objetivo mostrar resultados preliminares de la evaluación de la conductividad eléctrica como variable predictiva del caudal de los flujos de retorno del riego. El área de estudio se encuentra en la cuenca del Arroyo Tala (Salto, Uruguay), dedicada a la producción agrícola-ganadera, con riego por inundación en arroz y riego por aspersión (pivot) en maíz y soja. La instrumentación incluye sensores para el registro continuo de conductividad, niveles de agua y mediciones esporádicas de caudal, pH y temperatura a lo largo del cauce principal y sus afluentes. Para el análisis se utilizarán modelos aditivos generalizados, que permitirán establecer relaciones flexibles entre la conductividad, el nivel del agua y el caudal. Los resultados preliminares de la zafra 2024-2025 muestran una correlación negativa entre conductividad y caudal, y una correlación positiva entre nivel y caudal. También se observan diferencias en la conductividad entre estaciones adyacentes, lo que podría reflejar la heterogeneidad de usos y tipos de suelo en la cuenca. Este enfoque podría reducir costos, mejorar la precisión de los datos y permitir un monitoreo en tiempo real, además de cuantificar los retornos del riego como aportes al caudal ambiental.

PALABRAS CLAVE: Flujos de retorno, conductividad eléctrica, medición del caudal, riego.

¹Departamento del Agua, CENUR – Litoral Norte, Universidad de la República,
gonzalomedinasena@gmail.com

²Departamento de Suelos y Aguas – Facultad de Agronomía, Universidad de la República,
mperezb@fagro.edu.uy

QUANTIFICATION OF RETURN FLOWS IN IRRIGATED SYSTEM USING ELECTRICAL CONDUCTIVITY

ABSTRACT: Return flows could provide a crucial contribution to the natural courses of irrigated systems, so their precise measurement is essential. This quantification could be carried out through electrical conductivity as a predictive variable to estimate base flow inputs in river sections between monitoring points. Conductivity, which reflects the concentration of charged ions, can be measured with low-cost sensors at time intervals similar to those used for measuring water level and flow rate. This study aims to present preliminary results from the evaluation of electrical conductivity as a predictive variable for the flow rate of return flows from irrigation. The study area is located in the Arroyo Tala watershed (Salto, Uruguay), dedicated to agricultural-livestock production, with flood irrigation for rice and sprinkler irrigation (pivot) for corn and soybeans. The instrumentation includes sensors for continuous recording of conductivity, water levels, and occasional measurements of flow rate, pH, and temperature along the main channel and its tributaries. Generalized additive models will be used for the analysis, which will allow flexible relationships to be established between conductivity, water level, and flow rate. Preliminary results from the 2024-2025 season show a negative correlation between conductivity and flow rate, and a positive correlation between water level and flow rate. Differences in conductivity between adjacent stations are also observed, which could reflect the heterogeneity of land use and soil types in the watershed. This approach could reduce costs, improve data accuracy, and allow for real-time monitoring, as well as quantify irrigation return flows as contributions to environmental flow rates.

KEYWORDS: Return flows, electrical conductivity, flow measurement, irrigation.

INTODUCCIÓN

El flujo de retorno se refiere al agua proveniente de ríos, arroyos o represas, que se utiliza en los sistemas de riego agrícola y que, después de ser aplicada a los cultivos, regresa a los cuerpos de agua cercanos, como ríos, arroyos o incluso acuíferos subterráneos. Esta agua juega un papel crucial en el ciclo hídrico, ya que puede contribuir a aumentar el caudal base de los ríos. Su manejo adecuado es esencial para evitar la contaminación de los recursos hídricos, preservar la salud de los ecosistemas y mantener el caudal ambiental.

Este flujo de retorno puede manifestarse de diversas maneras. La escorrentía superficial se refiere al agua que no es absorbida por el suelo o que drena de los canales de riego, fluyendo hacia los cuerpos de agua cercanos. Este tipo de retorno es el más común y significativo en el sistema de riego del estudio (inundación) (Figura 1). Por otro lado, la infiltración y el flujo subterráneo ocurren cuando parte del agua de riego se infiltra en el suelo. Dependiendo de la topografía y las características del terreno, esta agua puede llegar a los ríos o arroyos a través de los acuíferos subterráneos. Este tipo de flujo de retorno es especialmente relevante para la recarga de las fuentes de agua subterránea.



Figura 1. Pérdidas de riego por superficie que actúan como flujo de retorno por escorrentía superficial.

Actualmente, la legislación de Uruguay para el cálculo del caudal ambiental no considera el flujo de retorno del riego, ni siquiera en los sistemas de riego menos eficientes, como el riego por inundación utilizado en el cultivo de arroz. Esto podría estar generando un aporte significativo de agua aguas abajo de estos sistemas de riego.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, es fundamental determinar y cuantificar de manera precisa el aporte de los flujos de retorno a los cursos naturales en los sistemas irrigados. En la actualidad, una alternativa para cuantificar las pérdidas de riego es mediante la medición de los caudales en las zanjas donde se conducen las aguas excedentes (ver Figura 1). La medición, que se realiza aforando en diferentes puntos donde se descarga el flujo de retorno, puede ser bastante precisa, pero resulta costosa y requiere mucho trabajo de campo, lo que implica desventajas.

Una alternativa para la cuantificación podría ser el uso de la conductividad eléctrica como variable predictiva para estimar las entradas de agua en tramos de río. La conductividad, que refleja la concentración de iones cargados, puede medirse con sensores económicos en intervalos de tiempo similares a los utilizados para la medición del flujo en los cursos naturales (Gonzales et al., 2009; Miller et al., 2014).

El objetivo de este estudio es evaluar los beneficios de la conductividad eléctrica como variable predictiva del caudal de los flujos de retorno del riego. Este enfoque podría reducir los costos, mejorar la precisión de los datos y permitir un monitoreo en tiempo real, además de facilitar la cuantificación de los retornos del riego como aportes al caudal ambiental. En Uruguay, aún no existen datos sobre la relación entre conductividad eléctrica y caudal. Sin embargo, se ha estudiado esta relación en cuencas australianas (Cartwright & Miller, 2021), donde se encontró que la conductividad está inversamente correlacionada con el caudal.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se encuentra en la cuenca del Arroyo El Tala (Salto, Uruguay), dedicada a la producción agrícola-ganadera, con riego por inundación en arroz y riego por aspersión (pivot) en maíz y soja. La instrumentación incluye sensores para el registro continuo de conductividad, niveles de agua y mediciones esporádicas de caudal, pH y temperatura a lo largo del cauce principal y sus afluentes.

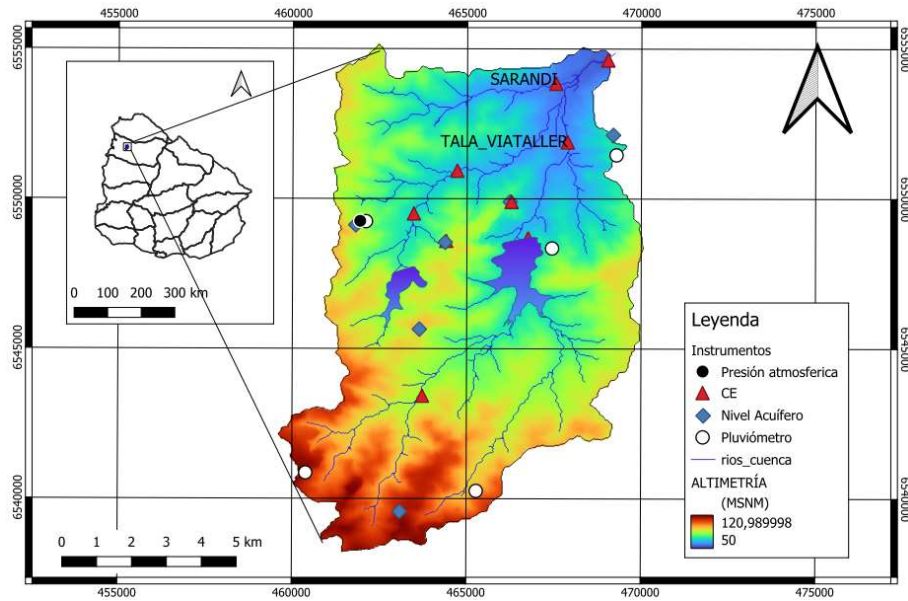


Figura 2. Red de monitoreo de la cuenca del Arroyo del Tala y modelo digital de elevación.

En septiembre y octubre 2024, antes del comienzo de la zafra 2024-2025, se colocaron sensores de conductividad eléctrica en agua (Figura 3) y de nivel de agua en varios puntos de la cuenca, tanto aguas arriba como aguas abajo de la represa que se utiliza para riego de los diferentes cultivos. Además, ya se contaba con un sensor de presión atmosférica instalado en las oficinas del predio, protegido de las inclemencias climáticas. El sensor permite compensar la información extraída de los sensores de nivel, donde se resta la presión atmosférica quedándonos solamente con la altura de la columna de agua.



Figura 3. Sensor de CE y nivel de agua, Sitio de aforo “Tala Vía Taller”.

Se buscó que los sensores de conductividad y nivel de agua quedarán colocados en sitios con diferente grado de intensificación (Figura 4). En la parte alta de la cuenca, en una zona poco intensificada donde los cursos de agua están en zonas de pasturas naturales principalmente, se colocó sensores, tanto en los cursos de agua naturales como, como en canales de riego y en pozos subterráneos. Luego se colocó otro grupo de

sensores en la zona de influencia de la represa. Por último, se colocó sensores en la zona baja de la cuenca donde el uso del suelo está más intensificado. Esta zona tiene cultivos de soja y maíz de secano y bajo riego con pivot, y cultivo de arroz regado por superficie por inundación. En todas las zonas ya se contaba con pluviómetros instalados, que entre otras cosas nos permite determinar para cada sitio de medición, si un aumento del nivel de agua esta explicado por precipitaciones o por efecto del riego.



Figura 4. Instalación de sensores de CE y nivel de agua en diferentes sitios superficiales (cañadas, arroyos, canales de riego) y subterráneos (pozos para agua de ganado y doméstico). Instalación en sitio “Tala Via Taller (imagen izquierda arriba). Imagen abajo a la izquierda, e imágenes del centro instalación de sensor en canal con agua durante riego de arroz, imagen a la derecha sensor en canal y en pozo subterráneo a 100 metros para estudiar interacción entre agua superficial y subterránea influenciada por riego (imagen de canal con agua y sin agua).



Figura 5. Medición de caudal con medidor de velocidad acústica en sitio “La Magdalena” parte alta de la cuenca, aguas arriba de la represa.

Por otra parte, aproximadamente cada 15 días se realizan aforos con medidor de velocidad acústica (ADV) (Figura 5) de los cursos naturales y medición de CE, pH y temperatura con un equipo portátil, en los mismos sitios donde fueron colocados los sensores de CE y nivel. Se utilizan sensores de presión y CE para realizar el monitoreo en tiempo continuo. En cada recorrida se afora en los mismos sitios, se bajan los datos de CE y nivel.

Una vez que se realicen todas las mediciones y obtenidos los datos (duración del proyecto dos años) se utilizará el Modelo Mixto Aditivo Generalizado (GAMM, por sus siglas en inglés), el cuál es una aproximación estadística de trabajar con datos faltantes, muestras espaciadas irregularmente en el tiempo y analizar datos correlacionados. A su vez, los modelos GAMM pueden incorporar múltiples variables predictoras e identificar su importancia. Este modelo nos permitirá inferir del total del flujo de agua en los cauces naturales cuanto corresponde al flujo de retorno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6, se observa los diferentes parámetros medidos y calculados para un sitio de muestreo no influenciado por el riego (Tala_viataller). En cambio, en la Figura 7, se puede ver los mismos parámetros para un sitio de muestreo ubicado al pie de una chacra de arroz, muy influenciada por las pérdidas del riego (Sarandí). Estos dos sitios de muestreo si bien están en cursos de agua diferentes, están muy cerca en distancia (4km) por lo que la precipitación es similar. Para ambos sitios se tuvo en cuenta el mismo período de tiempo, donde se analiza desde antes de comenzar a regar (1 de diciembre 2024) hasta la última toma de datos (1 de febrero 2025). Además, durante este período no se produjeron precipitaciones significativas, por lo que la influencia del riego en el sitio Sarandí fue muy marcada

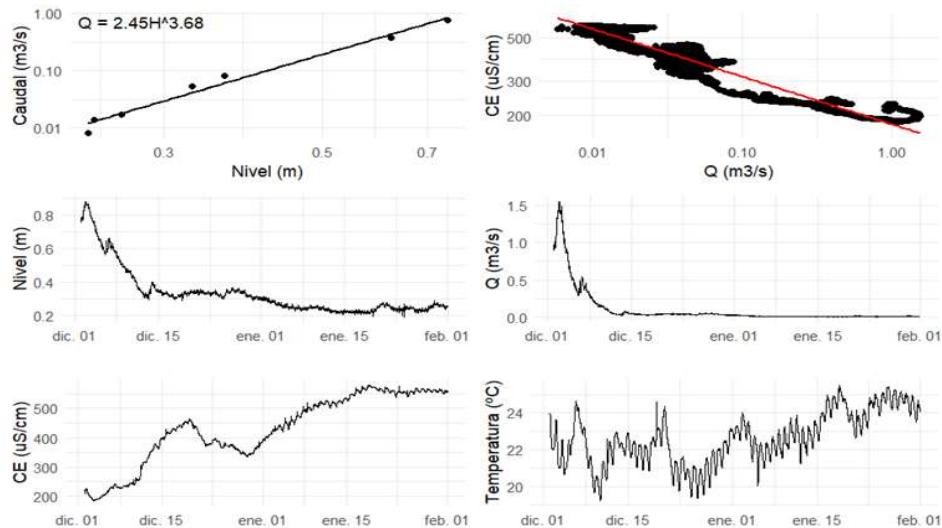


Figura 5. Sitio sin influencia del riego (Tala_Viataller). Relación caudal/Nivel, CE/Caudal y nivel, caudal, CE y temperatura para un mismo período de tiempo.

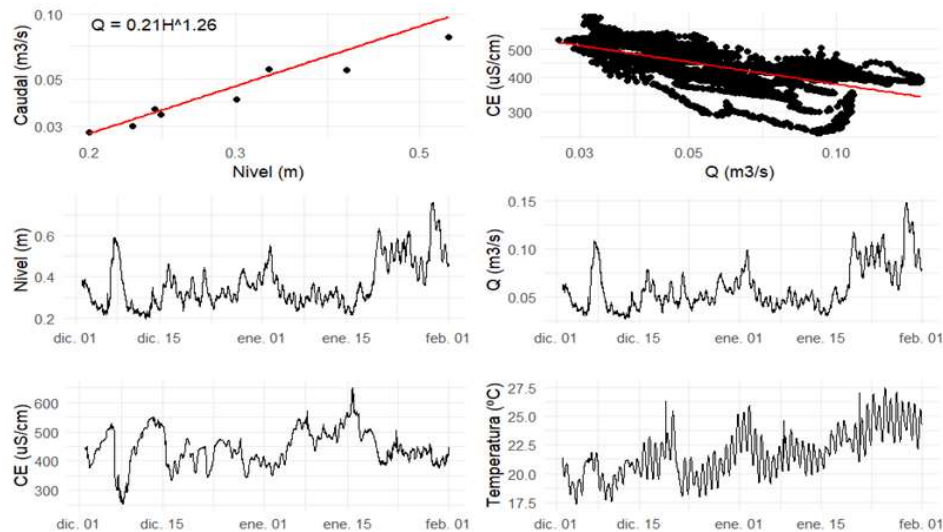


Figura 6. Sitio con influencia del riego (Sarandí). Relación caudal/Nivel, CE/Caudal y nivel, caudal, CE y temperatura para un mismo período de tiempo.

Teniendo en cuenta la variación de amplitud de Caudal en el período para Sarandí, se puede observar que el caudal máximo es 6 veces mayor que el caudal mínimo para de lo que se infiere que el efecto del riego pudiera ser significativo ya que no se produjeron precipitaciones en este período. En Tala_viataller durante las precipitaciones de principios de diciembre el nivel de agua y el caudal alcanzan su pico máximo para el período analizado (casi 0,9 m y 1,5 m³/s, respectivamente) y luego comienzan a descender de manera bien marcada y luego durante toda la segunda quincena de diciembre y todo el mes de enero se mantiene en niveles bien bajos. En cambio, para el sitio Sarandí, el comportamiento es mucho más irregular. Vemos que, si bien también muestra un pico en el nivel de agua y el caudal a principios de diciembre también

explicado por las precipitaciones, a partir del 14 de diciembre cuando se empieza a regar una de las chacras de arroz que se encuentra al lado del curso de agua, ambos parámetros vuelven a aumentar. En los días posteriores también se comienzan a regar otras melgas que también tienen mucha influencia sobre el sitio de muestreo de Sarandí. Este comportamiento de oscilaciones de ambos parámetros durante este período se explica por la gestión y direccionamiento del riego diario, por momentos direccionando más el agua hacia las melgas que tienen mayor influencia sobre el sitio de muestreo de Sarandí (momentos en donde aumenta el caudal) y en otros momentos direccionando el agua a melgas que descargan el agua (pérdidas del riego) aguas abajo del sitio de muestreo o a otro curso de agua (momentos en que baja el caudal).

Teniendo en cuenta únicamente los gráficos de la Figura 6 (sitio Tala_vía taller), podemos analizar el comportamiento de los diferentes parámetros sin el efecto del riego. La relación entre el nivel y caudal es positiva, y con una muy alta correlación ($R^2 = 0,98$). En cambio, la relación CE-caudal es negativa con una correlación que sigue siendo muy alta ($R^2 = 0,90$). Teniendo en cuenta los parámetros por separado para un mismo período de tiempo, se observa que para este sitio tanto el caudal como el nivel luego de las precipitaciones de principios de diciembre comienzan a descender y se mantiene bajo durante todo el período, reafirmando la correlación positiva observada en gráfico que relaciona ambas variables. Sin embargo, la CE luego de las precipitaciones (donde presenta valores bien bajos) comienza a subir teniendo pequeñas oscilaciones, pero mostrando una clara tendencia a ir aumentando, confirmando la correlación negativa con el caudal, observado en gráfico que correlaciona ambas variables. En cuanto a la temperatura, si bien el comportamiento es más errático, se puede observar una tendencia que a medida que baja el caudal y el nivel y aumenta la CE aumenta la temperatura.

Para el sitio Sarandí, que como ya se comentó está muy influenciado por el riego, si bien las correlaciones entre variables se mantienen, los valores de R^2 no son tan altos. Teniendo en cuenta la relación entre nivel y caudal vemos que continúa siendo positiva, pero esta vez el R^2 es de 0,81 lo que podría explicarse por ser una sección de medición más compleja con presencia de plantas acuáticas. En cuanto a la relación CE-caudal se observa que continúa siendo negativa al igual que el otro sitio, pero la gran diferencia es que el R^2 es muchísimo más bajo, siendo este de 0,414. En este particular, el descenso de la correlación podría estar explicado por ciclos de histéresis en la relación CE-Caudal (Soldi et al, 2024). Adicionalmente, la CE refleja la concentración de iones cargados y

por lo tanto presenta gran variación de acuerdo con la concentración iones y composición del agua y en este sentido el agua del riego presenta gran variabilidad de acuerdo al manejo del cultivo como: momento y dosis de fertilización, aplicación de herbicidas, caudal de riego, tipo de suelo donde se está regando, escorrentía y transporte de nutrientes. Como se puede apreciar en la gráfica de nivel y caudal para el mismo período, estos tienen un pico los primeros días de diciembre explicados por la lluvia (al igual que en el sitio Tala_Víataller) y luego baja y se mantiene bajo por un par de días hasta que vuelve a presentar un pico alrededor del 14 de diciembre que es cuando se inicia el riego de arroz en la zona de muestreo. Para este mismo período la CE presenta el comportamiento inverso a el caudal, como ya fue mencionado. Luego de comenzado el riego hasta el final del período de evaluación todos los parámetros presentan fluctuaciones explicadas por el riego ya que no se produjeron precipitaciones.

CONCLUSIONES

Los resultados preliminares de la zafra 2024-2025 muestran una correlación negativa entre conductividad y caudal, y una correlación positiva entre nivel y caudal. El nivel es una variable que puede predecir muy bien el caudal de un curso natural para caudales bajos. Sin embargo, con el nivel solamente no es posible separar y cuantificar la procedencia de las aguas en forma robusta. La CE parecería aportar información complementaria, que permitiría inferir el flujo de retorno del riego.

La utilización de sensores que permitan monitorear diferentes puntos de los cursos naturales, en sitios con diferente intensificación permitiría no solo mejorar la gestión del riego, sino que también podría reducir costos, mejorar la precisión de los datos y permitir un monitoreo en tiempo real de las pérdidas, además de brindar más insumos para intentar cuantificar los retornos del riego como aportes al caudal ambiental.

Las pérdidas del riego por superficie en chacras de arroz son un aporte fundamental para los cursos de agua naturales, provocando grandes incrementos en el caudal natural de un curso de agua si éste se encuentra cerca de una chacra regada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARTWRIGHT, I., & MILLER, M. P. (2021). Temporal and spatial variations in river specific conductivity: Implications for understanding sources of river water and hydrograph separations. **Journal of Hydrology**, 593, 125895. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125895>

GONZALES, A. L., NONNER, J., HEIJKERS, J., & UHLENBROOK, S. (2009). Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**

MILER, M. P., SUSONG, D. D., SHOPE, C. L., HEILWEIL, V. M., & STOLP, B. J. (2014). Continuous estimation of baseflow in snowmelt-dominated streams and rivers in the U pper C olorado R iver B asin: A chemical hydrograph separation approach. **Water Resources Research**, 50(8), 6986-6999. <https://doi.org/10.1002/2013WR014939>