

# CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA EN UN SISTEMA HIDROLÓGICO NO TÍPICO. CASO DEL SECTOR LLANO DE LA CUENCA DEL ARROYO DEL AZUL (ESTADO DE AVANCE)

Luisa Fajardo <sup>1</sup>, Ilda Entraigas<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Becaria de Estudio de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff".

[luisafajardog.28@gmail.com](mailto:luisafajardog.28@gmail.com)

<sup>2</sup>Investigador Asociado de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff".

[ilda@faa.unicen.edu.a](mailto:ilda@faa.unicen.edu.a)

## Introducción

La cuenca del arroyo del Azul se ubica en la zona central de la provincia de Buenos Aires, entre los 58° 51' y 60° 10' de longitud oeste y 36° 09' y 37° 19' de latitud sur y es uno de los ambientes hidrológicos del país más monitoreados y analizados desde distintas perspectivas disciplinarias. Abarca una superficie de 6.237 km<sup>2</sup> y como formas destacables se reconocen un sub-ambiente serrano hacia el sur de la cuenca con altitudes por sobre los 200 msnm (pendiente media del terreno del 5 %), y un sub-ambiente de llanura hacia el norte, por debajo de los 130 msnm (con pendientes que varían entre 0,5 y 0,8 %), con una zona de transición entre ambos, caracterizada por suaves ondulaciones. En el sector más bajo, sumamente llano, con sus suelos nátricos y drenaje deficiente, se desarrolla principalmente la cría ganadera extensiva en un matriz de pastizales naturales interrumpida por las numerosas cubetas y lagunas de carácter mayoritariamente semi-permanente y por dunas parabólicas y longitudinales.

El efecto de las lluvias en las distintas zonas de la cuenca es diferente en función de la pendiente. Las precipitaciones que caen en la zona sur generan escurrimientos superficiales que se concentran rápidamente en los cauces de los arroyos, mientras que en la zona norte el agua se acumula en forma de charcos o lagunas sobre la superficie. Así, el agua antes de infiltrarse se traslada en forma de manto o levemente canalizada, movilizada por la suave pendiente local (Fuschini Mejía, 1994). En este sector de la cuenca, entonces, no se tiene la superficie tributaria definida, sino una anarquía entre los diferentes niveles de disipación. Desde el punto de vista hidrológico, lo más notable del comportamiento del agua en cuencas tan deprimidas como la del Azul es la acumulación del agua sobre la superficie, y la interacción que se establece entre las aguas superficiales y las subterráneas, conformando un Sistema Hidrológico No Típico (Fertonani y Prendes, 1983).

Para analizar el comportamiento de sistemas hidrológicos en zonas de llanura se utilizan modelos matemáticos que permiten representar la respuesta de estos sistemas ante un evento, pero el principal inconveniente en zonas donde el relieve es muy suave es que los conceptos de divisorias de aguas y convergencia del flujo hacia una red de drenaje, con frecuencia no son válidos. Como consecuencia, los modelos hidrológicos clásicos, y las correspondientes metodologías de implementación y calibración tienen poca o ninguna aplicabilidad. Fertonani y Prendes (1983) postulan que en zonas de bajo relieve, el agua sobre el terreno no tiene una única dirección de

escurrimiento, sino que se mueve en forma desordenada, indefinida e imprevisible, siendo los escurrimientos en este caso areales y mantiformes. Esto provoca que, durante las inundaciones, el concepto de convergencia del deslizamiento hacia una red de drenaje que es la principal vía de movimiento del agua, no sea aplicable. La capacidad de los cauces es muy pequeña, y el valle de inundación no está bien definido. Además, se produce un fenómeno de llenado y encadenamiento de áreas bajas y el agua ocupa, de manera discontinua, superficies del orden de centenas o miles de kilómetros cuadrados. Así, los anegamientos son de poca profundidad, generalmente menos de un metro, y con un tiempo de permanencia muy largo en relación al área de aporte (no es rara una lámina de agua de algunas decenas de centímetros durante 10, 15, 20 o más días).

Entender el modo en el que se presenta la conectividad hidrológica es crucial para la comprensión del comportamiento y la dinámica de una cuenca (Lane et al., 2003; McDonnell et al., 2007; Pringle, 2003; Tetzlaff et al., 2007). La conectividad hidrológica hace referencia a la conexión que se establece entre los elementos de una cuenca (Ocampo et al., 2006; Pringle, 2003) y contempla dos aspectos: la conectividad estructural que se refiere a los patrones espaciales en el paisaje, como la distribución de las unidades ambientales que influyen en los patrones de transferencia del agua y en las trayectorias de flujo; y el aspecto funcional de la conectividad que se refiere a cómo esos patrones espaciales interactúan con los procesos de la cuenca para producir escorrentía, conexión entre flujos y, por lo tanto, la transferencia de agua en la cuenca (Turnbull et al., 2008).

Reconocer la importancia de la topografía como parámetro que controla estos procesos, es la clave para la comprensión de la dinámica de la conectividad hidrológica (Bracken y Croke, 2007; Turnbull et al., 2008; Wainwright et al., 2011), conjuntamente con la consideración de las características del paisaje, el patrón de la distribución de la humedad del suelo y las vías de flujo subsuperficial.

### **Trabajo previo realizado referente a este proyecto:**

En la cuenca del arroyo del Azul se han llevado adelante algunos estudios en los que se ha analizado la topografía y su participación en distintos procesos hidrológicos (Scioli, 2010, 2013; Ares, 2014; Guevara Ochoa, 2015) pero todos ellos involucran sectores de la zona serrana. En la zona más llana, en cambio, se ha estudiado la función de diversos ambientes en la conectividad paisajística (Migueltorena et al., 2014), pero sin la consideración de la topografía. El desafío del presente plan de trabajo es determinar la conectividad hidrológica en un sector de la cuenca que se comporta como un Sistema Hidrológico No Típico, a partir de involucrar características topográficas, paisajísticas, de la humedad del suelo y del flujo de las aguas subterráneas. Este objetivo estará basado en premisas que han sido formuladas o sugeridas por diversos investigadores, pero que no han sido puestas a prueba en ambientes como el que aquí se propone, es decir, en un ambiente extremadamente llano, expuesto a anegamientos periódicos y sometidos a pastoreo.

A pesar de la acentuada planicie del terreno de la zona analizada, la topografía controla la producción de la escorrentía y los anegamientos, y participa en la conectividad difusa que provoca que la escorrentía superficial llegue al cauce principal

a través de vías terrestres temporarias de flujo (Croke et al., 2005). Por otro lado, la conectividad dinámica (aquella que se refiere al hecho de que las conexiones internas en la cuenca varían a diferentes escalas de tiempo debido a los cambios en la disponibilidad de agua superficial y subsuperficial) puede inferirse a partir de la asunción de que un mayor contenido de humedad del suelo implica un grado mayor de conectividad (Fitzjohn et al., 1998; Leibowitz y Vining, 2003). Esto es, que los patrones de humedad del suelo que surgen luego de eventos de lluvias importantes reflejan cómo el agua se mueve a través de la cuenca, y así expresan la vinculación de los depósitos de agua al colmatarse y producir conexiones hidrológicas (Tezloff et al., 2011). Por otro lado, algunos autores (Ali et al., 2011, 2012) han sugerido que, probablemente, el monitoreo de la dinámica del nivel freático a través de piezómetros ubicados en unidades del paisaje con diferentes coberturas, permitiría un acercamiento al entendimiento de cómo aquellos depósitos de agua se colmatan (o vacían) y cómo se vinculan (o se aíslan) para producir (o interrumpir) los flujos conectores.

## **Objetivos**

### **Objetivo General:**

Entender la interacción entre las características topográficas y los procesos a nivel de cuenca, como una manera de concebir la dinámica de la conectividad hidrológica.

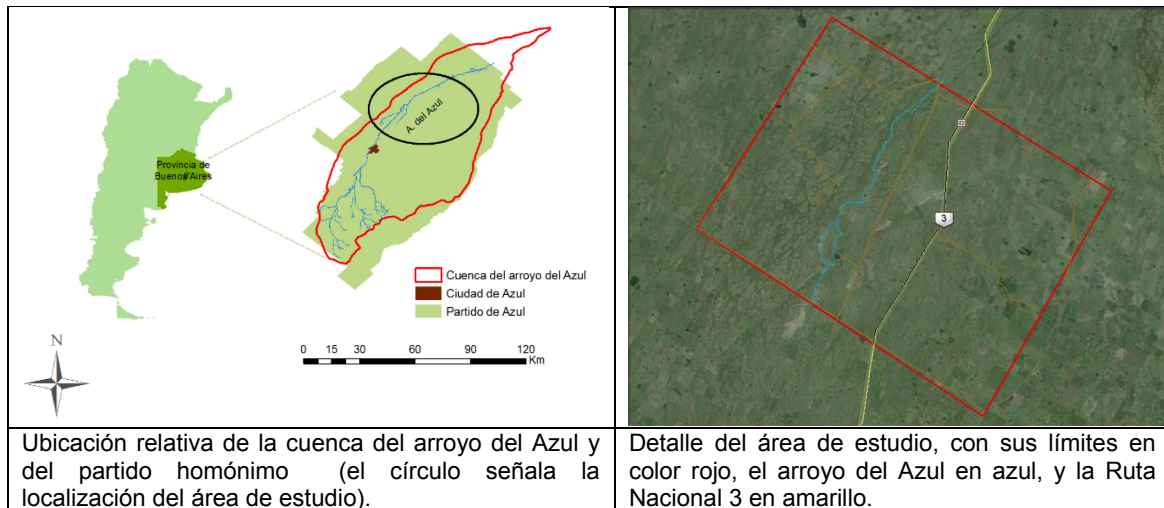
### **Objetivos Específicos:**

Determinar la conectividad hidrológica estructural en la matriz de pastizales naturales sometidos a anegamientos prolongados y pastoreo en el sector llano de la cuenca del Azul.

Analizar la manera en que la conectividad estructural se traduce en flujos de agua y, así, deducir la dinámica de funcionamiento del sistema en condiciones hidrológicas contrastantes.

## **Metodología**

El área de estudio es un sector llano de la cuenca del arroyo del Azul que contempla una superficie de 20 km x 15 km (30.000 ha), ubicada entre los caminos vecinales de Shaw, Parish, camino viejo a Las Flores y camino viejo a Cacharí (Figura 1), y en cuyo interior se encuentran elementos del paisaje muy significativos al momento de evaluar la conectividad hidrológica (arroyo del Azul, cañadón de Gutiérrez, Ruta Nacional 3, vía del ferrocarril, caminos rurales, dunas parabólicas, numerosas cubetas de deflación, etc.)



**Figura 1. Localización relativa del área de estudio.**

Teniendo en cuenta los factores responsables de la conectividad hidrológica en un Sistema Hidrológico No Típico, se consideraron a las variables topográficas, paisajísticas, de la humedad del suelo y del flujo de las aguas subterráneas. Para la caracterización de la topografía de la zona de estudio, se realizó el relevamiento topográfico de zonas naturales y accidentes artificiales (caminos, rutas) mediante la ocupación GPS, la medición se realizó con 2 equipos geodésicos simple frecuencia (Promark II Thales), configurados para el trabajo, uno en modo Stop and Go para la información del terreno con tiempo de ocupación de 1 minuto y cinemático para las vías y rutas nacionales con un tiempo de medición de 5 segundo por medida, la metodología se desarrolló teniendo un equipo en un punto de control IGN, el cual sirvió de base para las mediciones realizadas con el otro equipo. Dicha información será usada como base para la corrección del Modelos Digital de Elevación (ALOS-PALSAR), que tiene una celda de 12,5 metros y es compatible con la equidistancia de la toma de información.

En cuanto al monitoreo de variables relacionadas con el escurrimiento superficial del agua, la humedad, temperatura y conductividad eléctrica de los suelos, se seleccionaron sitios de muestreo distribuidos homogéneamente en el área de estudio, así se consultó la red de piezómetros del IHLLA a partir de la cual resultaron elegidos 7 de ellos. A estos se sumaron otros 9 piezómetros pertenecientes al proyecto “Estructura, funcionamiento y dinámica de los pastizales naturales sometidos a anegamientos prolongados y pastoreo en el sector llano de la cuenca del arroyo del Azul” (03/I037). Por último, a fin de cubrir los distintos sectores del área de estudio, se construyeron 5 nuevos piezómetros con una profundidad aproximada de 7 a 8 metros. Así, quedó conformada una red de 21 piezómetros que son relevados específicamente para el presente proyecto en diferentes situaciones hídricas de la cuenca.

Los muestreos de las variables edáficas se midieron en estos mismos sitios, más otros 11 sitios que fueron seleccionados a partir del análisis de imágenes satelitales en las cuales fue posible diferenciar vías preferenciales de escurrimiento de agua superficial (Figura 2). En total, son 31 sitios en los que se registra la humedad, la temperatura y la conductividad eléctrica de los suelos a los 10 y a los 20 cm de profundidad.

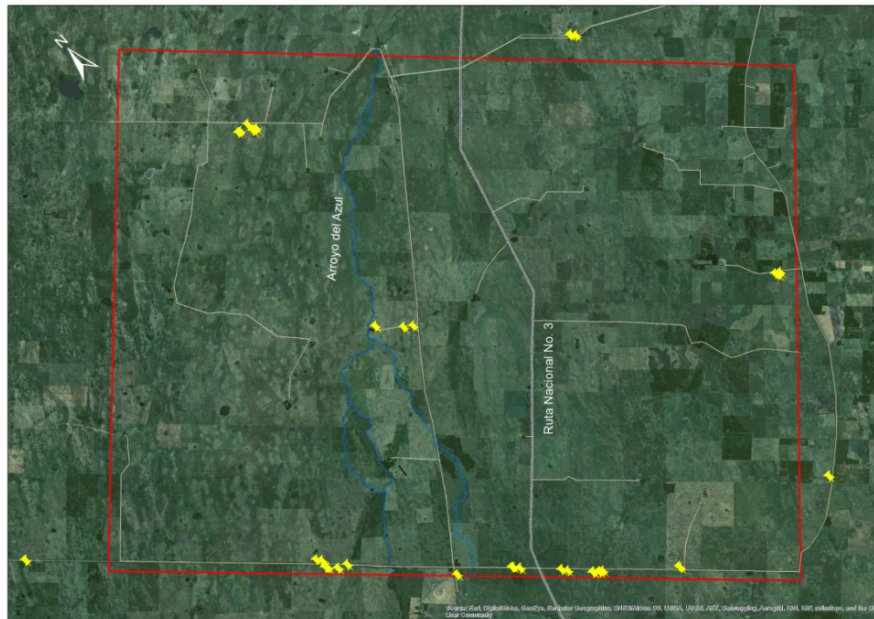


Figura 2. Mascara de humedad zona de estudio, imagen satelital Landsat 8 marzo 2017; puntos elegidos para muestreo.

### Resultados parciales

Del relevamiento topográfico del terreno se obtuvo un total de 1425 puntos pertenecientes a los caminos vecinales de Shaw, Parish y el camino viejo a las Flores y la Ruta nacional N° 3, y 1445 puntos correspondientes al terreno natural (Figura 3). Ambos conjuntos de puntos se almacenaron en una de cálculo (Excel) para ser exportados en un SIG (ArcGis), donde se registró un identificador del punto, sus coordenadas absolutas y su elevación elipsoidal y respecto al nivel medio del mar (Tabla 1).

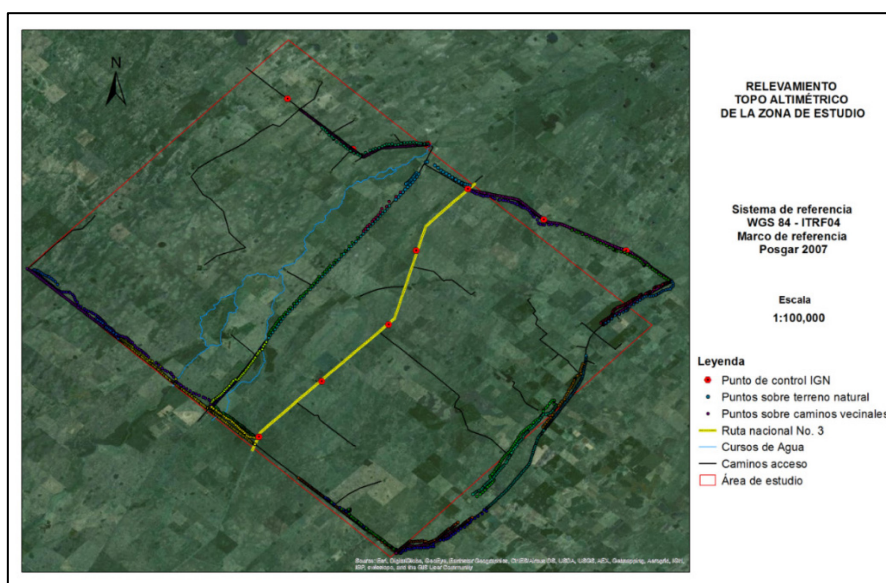


Figura 3. Relevamiento topo altimétrico realizado en el área de estudio.

**Tabla 1. Fragmento de archivo Excel (a modo de muestra), de la información de puntos relevados a campo.**

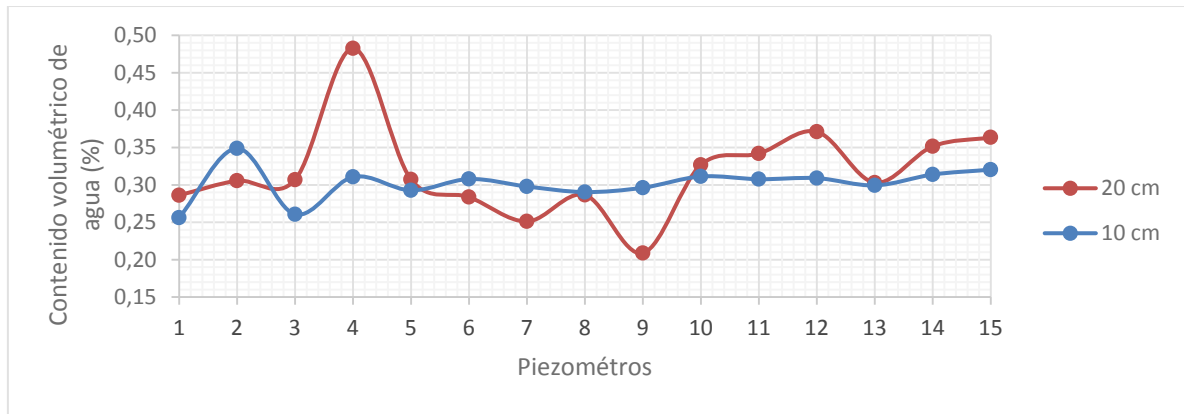
Punto	Latitud	Longitud	Altura Elipsoidal h	Altura OrtométricaH	N
FLO1	-36° 41' 9.417"	-59° 38' 41.607"	130.120	112.955	17.165
FLO2	-36° 41' 8.923"	-59° 38' 41.607"	129.780	112.615	17.165
FLO3	-36° 41' 7.335"	-59° 38' 40.649"	129.740	112.576	17.164
FLO4	-36° 41' 6.611"	-59° 38' 41.188"	129.709	112.545	17.164
FLO5	-36° 41' 5.961"	-59° 38' 41.008"	129.411	112.247	17.164
FLO6	-36° 41' 5.479"	-59° 38' 41.085"	129.327	112.164	17.163
FLO7	-36° 41' 4.414"	-59° 38' 41.638"	129.309	112.146	17.163

Además de la descripción del relieve en la zona mediante la medición de puntos sobre la topografía, se realizó una caracterización fisicoquímica de las aguas recolectadas en cada uno de los piezómetros distribuidos en la zona de estudio (Tabla 2), con la intención de conocer los valores base que describen el tipo de agua.

**Tabla 2. Descripción físico química de piezómetros a partir de la campaña de muestreo del mes de febrero.**

id	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Na (ppm)	K(ppm)	Cl (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (ppm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	F (ppm)	CE
4	10.06	4.74	179.80	10.53	23.83	44.54	391.42	1.57	782
5	43.77	16.30	133.01	9.24	24.92	47.83	465.13	1.01	926
6	46.19	15.57	213.46	10.57	26.66	66.31	615.09	1.31	1168
7	17.38	12.26	396.00	11.16	62.67	134.88	785.39	1.99	1689
8	49.19	15.48	174.35	13.35	20.08	34.49	551.55	1.23	998
9	63.48	21.87	154.73	24.05	33.07	15.42	653.22	1.13	1138
10	60.47	13.72	132.14	11.88	19.26	18.55	505.80	1.32	897
11	50.81	11.37	78.61	8.64	10.67	8.74	373.63	0.66	661
13	43.34	13.12	136.25	11.61	25.42	18.99	505.80	1.18	898
14	92.09	12.55	64.59	10.07	14.87	11.31	475.30	0.65	804
15	57.76	12.84	94.51	12.20	19.19	17.40	437.17	1.03	812

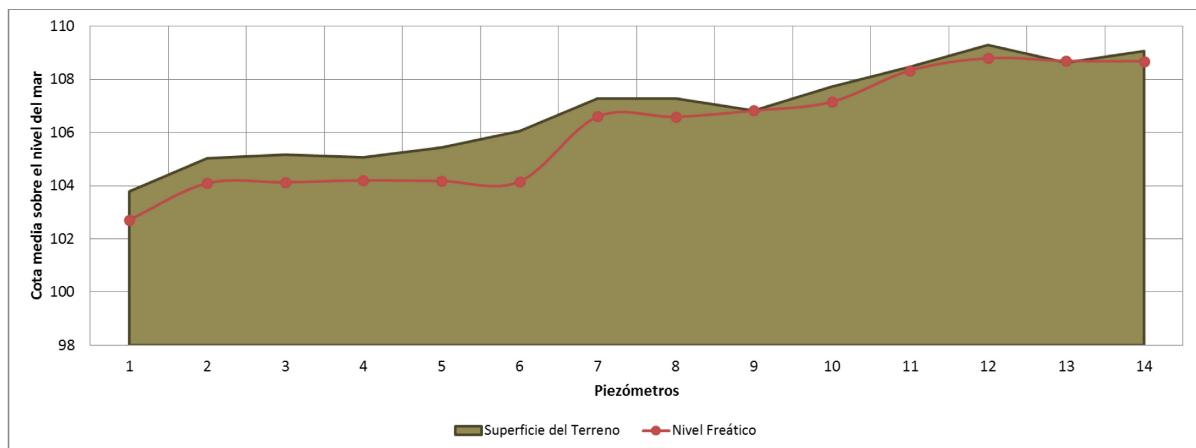
Adicional a lo anterior, en lo transcurrido del año se han llevado a cabo cuatro campañas de muestreos de suelo, registrándose la humedad, la temperatura y la conductividad eléctrica (a los 10 y a los 20 cm de profundidad). A modo de ejemplo, la figura 4 muestra un fragmento de la campaña correspondiente al mes de abril donde se relaciona el contenido volumétrico de agua (humedad del suelo) en dos profundidades (10 y 20 cm respectivamente) a lo largo de la transecta sobre el camino de Shaw.



**Figura 4. Fragmento de los registros de humedad del suelo (campana del mes de abril).**

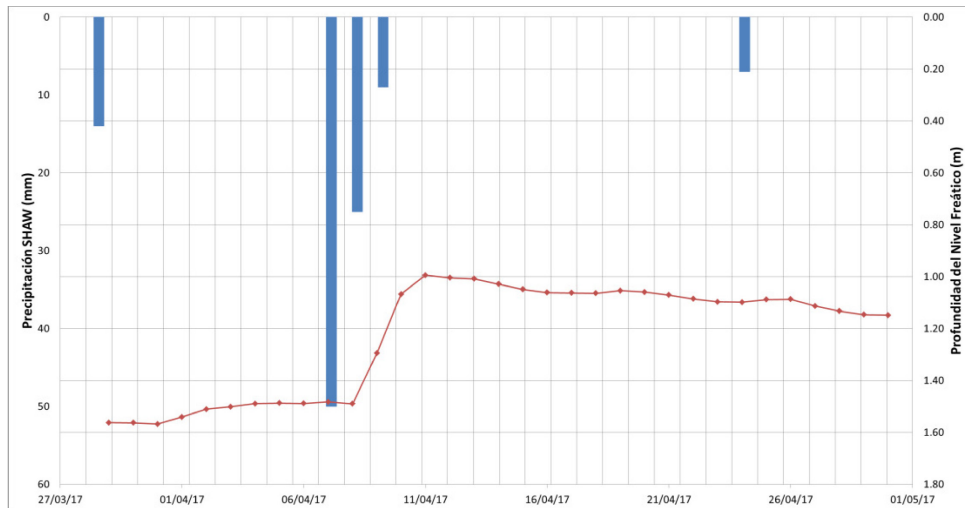
Los suelos resultaron poseer un contenido de humedad más homogéneo entre ellos a los 10 cm de profundidad, mientras que los registros correspondientes a los 20 cm de profundidad son más disimiles entre ellos, mostrando un comportamiento irregular. Estos datos obtenidos serán luego relacionados y discutidos a la luz de los análisis de suelos que se llevarán adelante en diferentes calicatas que se describirán en el área de estudio.

Por otro lado en los diferentes muestreos se midieron los niveles freáticos de los piezómetros, los cuales fueron nivelados con GPS, donde se obtuvo su cota relativa al nivel medio del mar. En la figura 5 se detalla la cota de la superficie del terreno y los niveles piezométricos para la campaña de muestreo del mes de abril.



**Figura 5. Cotas de la superficie del terreno y de los niveles freáticos (campana de abril).**

Además, en el área de estudio se cuenta con los registros continuos de un pluviómetro y un limnógrafo. Dicha información permite evaluar la respuesta de los niveles freáticos ante los eventos de lluvia (en la figura 6 se detalla un fragmento de dichos registros).



**Figura 6. Registro de datos de precipitación y niveles freáticos durante el mes de abril.**

### **Consideraciones finales de esta primera etapa**

En este primer período de trabajo, las tareas llevadas a cabo han estado abocadas principalmente a la selección de los sitios de muestreo para las diferentes variables implicadas en el proyecto y, a posteriori, a la realización de las primeras campañas de muestreo. Todos los datos recolectados hasta ahora se corresponden a momentos en que la zona de estudio se encuentra hidrológicamente saturada. A medida que transcurre el año, se llevarán adelante campañas de muestreo en las que los suelos y los niveles freáticos presentarán estados diferentes, por lo que se podrá elaborar un modelo conceptual más completo referido a las diferentes situaciones de los parámetros involucrados en la conectividad hidrológica y relaciones que se establecen entre ellos.

### **Referencias**

- Ares, M. G. 2014. Lluvia, escurrimiento y producción de sedimentos en una microcuenca agrícola del sistema de Tandilia. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP).
- Ali, G. A., L'Heureux, C., Roy, A. G. Turmel, M. C., Courchesne, F. 2011 Linking spatial patterns of perched groundwater storage and stormflow generation processes in a headwater forested catchment. *Hydrological Processes* 25 (25), 3843-3857.
- Ali, G. A., Tetzlaff, D., Soulsby, C., McDonnell, J. J. 2012. Topographic, pedologic and climatic interactions influencing streamflow generation at multiple catchment scales. *Hydrological Processes* 26 (25) 3858-3874. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8416>.
- Bracken, L. J. y Croke, J. 2007. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff dominated geomorphic system. *Hydrological Processes* 21, 1749-1763.
- Croke, J. 2005. Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. *Geomorphology* 68 (3-4), pp. 257-268.

- Fertonani, M.E. y Prendes, H. 1983. Hidrología en área de llanura. Aspectos conceptuales, teóricos y metodológicos. En: M.C. Fuschini Mejía (Ed.) Hidrología de las Grandes Llanuras. Coloquio de Olavarría. UNESCO. Secretaría Nacional de Recursos Hídricos. Vol. 3: 787-864.
- Fitzjohn, C. Ternan, J. L. y Williams, A.G. 1998. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: Implications for runoff and erosion control. *Catena* 32 (1), pp. 55-70.
- Fuschini Mejía, M.C. 1994. El agua en las llanuras. UNESCO/ORCYT, Montevideo.
- Lane, S. N. 2003. Land management, flooding and environmental risk: new approaches to a very old question. Proceedings of CIWEM Conference, Harrogate, UK.
- Guevara O. C. 2015. Una metodología para el manejo integral de extremos hídricos en una cuenca rural en zona de llanura. Caso de Estudio: Cuenca Arroyo Santa Catalina, Provincia de Buenos Aires. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Ciencias Naturales y Museo (UNLP).
- Leibowitz, S. G. y Vining, K. C. 2003. Temporal connectivity in a prairie pothole complex. *Wetlands* 23 (1), pp.13-25.
- McDonnell, J. J. 2007. Moving beyond heterogeneity and process complexity: a new visión for watershed hydrology. *Water Resources Research* 43 (7); doi: 10.1029/2006WR005467.
- Migueltorena, M. V., Entraigas, I. y Varni, M. 2014. La conectividad paisajística en el sector llano de la cuenca del arroyo del Azul. 2 Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras.
- Pringle, C. 2003. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological Processes* 17 (13), pp. 2685-2689.
- Scioli, C. 2010. Modelación del escurrimiento superficial en áreas de llanura: implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla. Tesis Maestría, Universidad Nacional de Rosario
- Tetzlaff, D. 2007. Connectivity between landscapes and riverscape – a unifying theme in integrating hydrology and ecology in catchment science? *Hydrological Processes* 21 (10), pp. 1385-1389.
- Tetzlaff, D., McNamara, J. P. y Carey, S. K. 2011. Measurements and modelling of storage dynamics across scales. *Hydrological Processes* 25, 3831-3835.
- Turnbull, L., Wainwright, J. y Brazier, R.E. 2008. A conceptual framework for understanding semi-arid land degradation: ecohydrological interactions across multiple-space and time scales. *ecohydrology* 1, 23-34.
- Wainwright, J. y Bracken, L. J. 2011. Runoff generation, overland flow and erosion hillslope, in\_ Thomas, D.S.G. (Ed.), *Arid Zone Geomorphology*, 3rd ed. John Wiley and Sons, Chichester.