

EL CAUDAL BASE COMO REFLEJO DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS A ESCALA CUENCA: UN ESTUDIO DE CASO EN CUENCAS HIDROLÓGICAS DE LLANURA

BASEFLOW AS A REFLECTION OF HYDROLOGICAL PROCESSES AT THE WATERSHEDS SCALE: A CASE STUDY IN PLAIN WATERSHEDS

Romina Marcovecchio ⁽¹⁾, Sebastián Dietrich ⁽²⁾, María Soledad Gualde ⁽³⁾ y María Emilia Zabala ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff" y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Tandil, Argentina.

e-mail: rmarcovecchio@ihlla.org.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7470-9117>

⁽²⁾ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff" y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Azul, Argentina.

e-mail: sebadietrich@ihlla.org.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7937-4061>

⁽³⁾ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff" y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Azul, Argentina.

e-mail: msgualde@ihlla.org.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5348-9047>

⁽⁴⁾ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff" y Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Azul, Argentina.

e-mail: mzabala@ihlla.org.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9974-3861>

RESUMEN

El caudal base es un componente clave del ciclo hidrológico, ya que refleja procesos hidrológicos a escala de cuenca. En la cuenca del arroyo del Azul, un sistema de llanura caracterizado por movimientos verticales y almacenamiento predominante sobre el escurrimiento superficial, se ha estudiado el caudal base, pero no su relación con la variabilidad climática. Este trabajo identifica el caudal base en la zona media del arroyo y analiza sus variaciones estacionales en función de la estacionalidad de las precipitaciones, moduladas por el Sistema Monzónico Sudamericano (SMSA). Se utilizó un filtro digital recursivo para identificar el caudal base, cuyos resultados se analizaron considerando la relación cuadrática propuesta por Varni et al. (2019) entre el caudal base y el nivel freático. Los resultados indican que el caudal base representa entre el 60-90% del caudal total durante la fase activa del SMSA (octubre-febrero) y entre el 40-70% en la fase inactiva (marzo-septiembre). Además, la metodología empleada otorga un sentido físico a los filtros digitales al vincularlos con la variabilidad del nivel freático. Este análisis proporciona una visión integral de la dinámica estacional del caudal base y su relación con el ciclo hidrológico y climático.

Palabras clave: Caudal base, BFI, Acuífero Pampeano, Descargas, Variabilidad climática.

ABSTRACT

Baseflow is a key component of the hydrological cycle, reflecting hydrological processes at the watershed scale. In the Azul stream basin, a plain hydrological system characterized by predominant vertical movements and storage over surface runoff, baseflow has been studied, but its relationship with climate variability remains unexplored. This study identifies baseflow in the middle section of the Azul stream and analyzes its seasonal variations in relation to precipitation seasonality, modulated by the South American Monsoon System (SAMS). A recursive digital filter was used to identify baseflow, and the results were analyzed considering the quadratic relationship proposed by Varni et al. (2019) between baseflow and groundwater level. The findings show that baseflow accounts for 60-90% of total flow during the active phase of SAMS (October-February) and 40-70% during the inactive phase (March-September). Furthermore, the proposed methodology provides a physical interpretation of digital filters by linking them to groundwater level variability. This analysis offers a comprehensive understanding of the seasonal dynamics of baseflow and its relationship with the hydrological cycle and climate variability.

Keywords: Baseflow, BFI, Pampean Aquifer, Discharge, Climate Variability.

INTRODUCCIÓN

El intercambio de agua y energía entre la atmósfera y la superficie terrestre es un proceso clave del ciclo hidrológico. A través de la precipitación y la evapotranspiración el agua se desplaza entre ambos sistemas, estableciendo así el vínculo entre lo que se denominan las cuencas atmosféricas y las hidrológicas (van der Ent et al., 2010). Los procesos hidrológicos describen los movimientos del agua en las cuencas hidrológicas, cómo parte del ciclo hidrológico (McMillan, 2022). Así, los procesos hidrológicos no solo regulan los flujos y los almacenamientos de agua, sino que también conectan la atmósfera con la hidrosfera. En este marco, la variabilidad climática cobra relevancia en la circulación y distribución del agua en las cuencas hidrológicas, influyendo tanto en el proceso de recarga de los acuíferos como en la interacción entre el agua subterránea y superficial (Winter et al., 1998; Batista et al., 2018).

El caudal base se destaca como un componente relevante del ciclo hidrológico, ya que refleja los procesos que ocurren a escala de cuenca, integrando la influencia de la variabilidad climática y la dinámica del acuífero (Guisiano et al., 2024). El caudal base es definido por Singh (1969) “*como el flujo neto hacia la corriente desde el almacenamiento del agua subterránea en el acuífero libre*” (McMahon y Nathan, 2021). Constituye el componente del caudal total que se asocia a las descargas del almacenamiento del agua subterránea y mantiene el caudal de los cursos de agua entre los eventos de precipitación, contribuyendo considerablemente a sostener los procesos ecohidrológicos. En este sentido, la evaluación de la interacción entre el agua superficial y el agua subterránea es fundamental para el manejo del recurso hídrico y la gestión de ecosistemas dependientes del agua subterránea (Winter et al., 1998; Woessner, 2000; Sophocleous, 2002).

La tasa en que el agua subterránea descarga en ausencia de recarga fue uno de los primeros campos de investigación en la hidrología; así como es un ejercicio tradicional de la misma la separación del escurrimiento directo y el caudal base. El caudal base, es el componente del caudal asociado a las descargas desde el almacenamiento subterráneo y es utilizado en análisis regionales para describir los parámetros que caracterizan la disminución del caudal en ausencia de recarga. El caudal base suele asociarse a un parámetro característico de cada cuenca

hidrológica, conocido como la constante de recesión, el cual forma parte de su curva de recesión. Esta constante se relaciona con la geomorfología de la cuenca y es indicadora de las características del flujo en la misma. Si bien existen muchas técnicas de separación del caudal base y el escurrimiento directo, es importante resaltar que la mayoría de las mismas son metodologías aproximadas, ya que la complejidad de los procesos hidrológicos es tal, que incluso el término caudal base, es más bien de carácter conceptual más que una descripción precisa de los orígenes del agua (Nathan y McMahon, 1990). Las técnicas de separación de caudal base y escurrimiento directo, se basan en la ecuación de recesión, ecuación (1):

$$Qt = Q_0 e^{(-\alpha * t)} \quad (1)$$

donde Qt es el caudal en el tiempo t , que es igual a la descarga inicial Q_0 , mientras que $e^{(-\alpha * t)}$ es la constante de recesión.

El modelo de recesión exponencial y el marco teórico para el desarrollo de algoritmos de filtrado se construyeron bajo el supuesto de que el caudal de salida es linealmente proporcional a su almacenamiento (Eckhardt, 2005; Eckhardt, 2008). A partir de la ecuación (1) se definen técnicas gráficas, las cuáles son aplicables a eventos de crecida y recesión, así como también, técnicas automatizadas para la separación de caudal base a partir de la aplicación de filtros digitales. Las técnicas de separación de hidrogramas basadas únicamente en el hidrograma son arbitrarias y no pueden validarse sin datos de campo. Sin embargo, las técnicas automatizadas son comparables con las técnicas de separación manual basadas en la curva maestra de recesión (Nathan y McMahon, 1990).

Otras metodologías que permiten identificar el caudal base son las denominadas metodologías con trazadores, las cuáles son más efectivas ya que consideran los procesos físicos y químicos. Guisiano et al. (2024) realizan la calibración de métodos automatizados para la separación del hidrograma, identificando los componentes del caudal mediante EMMA (End-Member Mixing Analysis, por sus siglas en inglés) y definen los trazadores óptimos para el caudal base a través de los cuales calibran el filtro digital recursivo (Lyne y Hollick, septiembre, 1979; Chapman, 1991; Chapman y Maxwell, enero, 1996; Eckhardt, 2005). Es la primera vez que se realiza la calibración de un método automatizado con trazadores.

En la cuenca del río Quequén Grande (provincia de Buenos Aires), Alcaraz et al. (2024) utiliza valores de 3H para separar la escorrentía directa y caudal base. Estos autores calculan que la proporción de caudal base varía entre 36-88% por evento de crecida. Si bien la metodología de trazadores presenta resultados que son conceptualmente más precisos, estos son costosos dado el elevado número de muestreos que deben realizarse. Y estudios anteriores como Gonzales et al. (2009) han identificado un buen ajuste de los filtros digitales a los trazadores hidroquímicos e isotópicos con diferencias de aproximadamente 10%.

En la cuenca del arroyo del Azul, Varni et al. (2019) usan un filtro digital recursivo para calcular el caudal base que descarga al arroyo en la estación de aforo Seminario (Figura 1), e identifican que el caudal base tiene una relación cuadrática con la altura del nivel freático. Este trabajo se realizó a partir del análisis de la piezometría en 6 piezómetros de 10 m de profundidad pertenecientes a la red de monitoreo del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) (Figura

1). El filtro digital utilizado, es un filtro digital recursivo, correspondiente al filtrado de paso bajo de un hidrograma (Lyne y Hollick, septiembre, 1979; Eckhardt, 2005; Varni et al., 2019), que se basa en que, en el espectro de frecuencia de un hidrograma, las ondas largas tendrán mayor probabilidad de estar asociadas al caudal base, mientras que la variabilidad de alta frecuencia será causada principalmente por la escorrentía directa.

La cuenca del arroyo del Azul es un sistema hidrológico de llanura, donde dominan los movimientos verticales del agua y el almacenamiento sobre la escorrentía superficial. En estos sistemas, las descargas por evapotranspiración alcanzan el 90% de la descarga total del sistema (Usunoff et al., 1999). Aunque se ha avanzado en el conocimiento sobre las descargas y el caudal base en la cuenca del arroyo del Azul (Varni et al., 2019; Guevara Ochoa et al., 2020; Zabala et al., 2021), aún no se comprende completamente la relación entre la variabilidad climática y la interacción entre el agua superficial y subterránea.

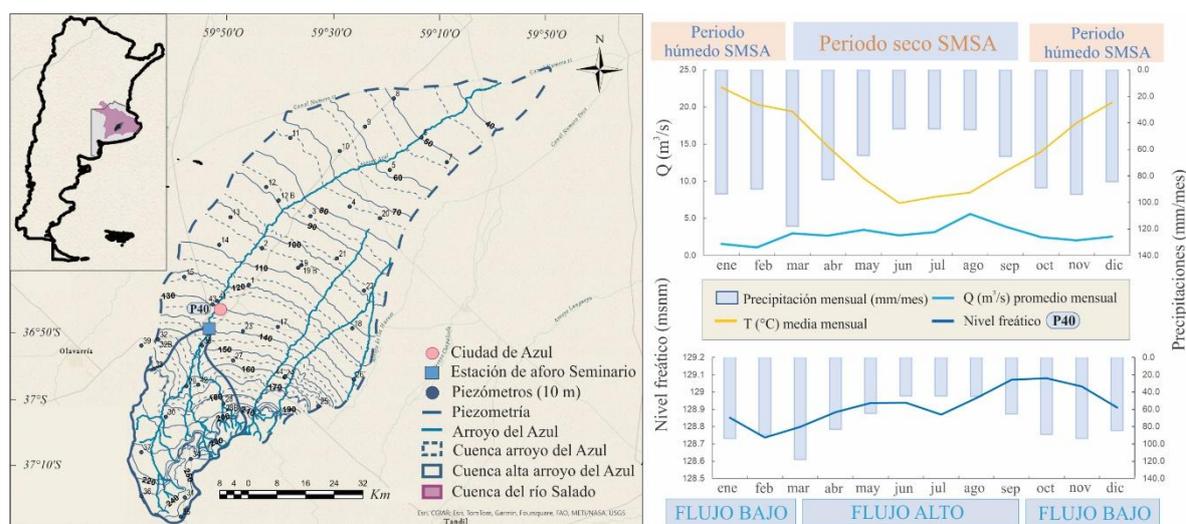


Figura 1. Izquierda superior: ubicación de la cuenca del río Salado y de la cuenca del arroyo del Azul. Izquierda centro: ubicación de la cuenca del arroyo del Azul y sitios de estudio. Derecha: evolución temporal de las variables meteorológicas e hidrológicas.

OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo son identificar el caudal base en la zona media de la cuenca del arroyo del Azul (Partido de Azul, Buenos Aires) y analizar sus variaciones estacionales en relación con las variables meteorológicas. Comprender la magnitud, frecuencia y origen de los flujos que sostienen el caudal del arroyo, dado que esto es clave para la gestión

adecuada del recurso hídrico y la protección de los ecosistemas dependientes del agua subterránea.

SITIO DE ESTUDIO

La cuenca hidrológica del arroyo del Azul se ubica en la llanura pampeana, en el centro de la provincia de Buenos Aires (Argentina) y constituye una subcuenca

de la cuenca del río Salado. Posee un área de 6237 km² y su cauce principal es el arroyo del Azul, el cual escurre de SO a NE durante 160 km hasta ser interceptado por el Canal 11 (Figura 1).

La cuenca del arroyo del Azul puede subdividirse en función de las pendientes topográficas en cuenca alta, con pendientes entre 5-0.5% y en cuenca baja con pendientes igual o menores a 0.2% (Sala et al., 1987). La cuenca alta se caracteriza por un fuerte control estructural, el cual se expresa en una red de drenaje con diseño dendrítico, mientras que en cuenca baja la red de drenaje se caracteriza por estar pobremente definida y los cursos de agua suelen ser paralelos a subparalelos al curso principal debido a la baja pendiente topográfica.

Desde el punto de vista morfoestructural la cuenca del arroyo del Azul está ubicada en los ámbitos del sistema de Tandilia y la cuenca tectónica del Salado; limitadas por la escarpa de falla denominada “Costa de Heusser” (Teruggi y Kilmurray, 1975). Durante el Cenozoico tardío, una cubierta sedimentaria continental extensiva se acumula en ambas unidades morfoestructurales, sobreyaciendo los afloramientos del Precámbrico del sistema de Tandilia, dando origen al actual paisaje de llanura (Zárate y Rabassa, 2005).

Dentro de las secuencias sedimentarias cenozoicas se diferencian dos secuencias sedimentarias principales. La secuencia sedimentaria inferior, neógena, es principalmente de origen fluvial con menores eventos eólicos. Está conformada principalmente por facies conglomerádicas, arenosas y arcillosas. La secuencia sedimentaria superior, cuaternaria, está compuesta principalmente por sedimentos de origen eólico y episodios fluviales dispersos, con una corteza calcárea generalizada. Esta secuencia la conforman principalmente facies limosas y arcillosas de forma subordinada. Las secuencias sedimentarias están separadas por una facie conglomerádica. Ambas secuencias sedimentarias constituyen el acuífero Pampeano, el cual se caracteriza por ser un sistema multicapa que presenta un espesor de 100-120 m en la ciudad de Azul (Gualde et al., 2024). El acuífero Pampeano presenta una conductividad hidráulica horizontal (Kh) de 5 m/d y una conductividad hidráulica vertical (Kv) de 0.5 m/d (Varni y Usunoff, 1999). La superficie freática en el área analizada se encuentra entre la equipotencial de 250 msnm y la isopieza de 130 msnm, y las líneas de flujo convergen hacia el NE en la estación de aforo Seminario (Figura 1).

La recarga total anual promedio es de 250 mm; siendo los meses de marzo y agosto cuando se producen las mayores recargas del acuífero freático. La profundidad del nivel freático varía entre 1-5 m de profundidad. Alcanzando las mayores profundidades el mes de febrero, influenciado por las mayores descargas por evapotranspiración de los meses de diciembre, enero y febrero (Varni et al., 2019). Las descargas verticales del acuífero freático a la atmósfera tienen un promedio anual de 105 mm (Marcovecchio y Varni, 2020). Guevara Ochoa et al. (2020) estimaron el valor medio de las descargas del acuífero freático al arroyo del Azul en 34 mm/año. Sumado a esto, Varni et al. (2019) identifica que las descargas del acuífero freático al arroyo del Azul mantienen una relación con la altura de la superficie freática que puede expresarse a través de una función cuadrática. Estas descargas del acuífero freático que sostienen al arroyo del Azul en períodos con ausencia de precipitaciones, mantienen las temperaturas estacionales relativamente estables, así como también los contenidos de oxígeno disuelto (Varni et al., 2019).

En cuenca alta la recarga es local, y los flujos locales dan origen al flujo base. A partir de la escarpa de falla “Costa de Heusser”, el espesor del acuífero Pampeano en la cuenca del arroyo del Azul comienza a ser considerable permitiendo el desarrollo de flujos regionales. Si bien los flujos regionales están fuera del alcance de los cuerpos y cursos de agua superficial, se espera que parte de estos flujos regionales alimenten las descargas en la zona media del arroyo del Azul y que aumenten hacia cuenca baja donde son relevantes en el volumen de agua transportado por el acuífero (Varni et al., 2007; Zabala et al., 2021).

La dirección de escurrimiento del agua superficial y subterránea es hacia el NE, hacia la cuenca del Salado. El arroyo del Azul, en la estación de aforo Seminario (Figura 1) tiene un caudal promedio anual de 2.84 m³/s (Zabala et al., 2021). Se considera a la estación de aforo Seminario, como el cierre de cuenca alta. Esta subcuenca presenta un área de 1044.85 km², y el arroyo del Azul es el cauce principal, resultado de la confluencia del arroyo Azul superior con el afluente Videla, al que luego se suma el Santa Catalina.

Si bien la distribución de las precipitaciones en Sudamérica depende de su localización geográfica y la estacionalidad, se puede considerar que esta distribución depende principalmente del Sistema

Monzónico Sud Americano (SMSA), el cuál es un sistema atmosférico complejo cuyas características dependen de la combinación de diferentes variables para su desarrollo. Algunas de ellas son la posición e intensidad del Anticiclón Sudamericano y el flujo de humedad del Amazonas (Raia y Cavalcanti, 2008). El SMSA presenta dos estaciones bien definidas, una estación lluviosa (noviembre-marzo) y una estación seca (mayo-septiembre). Estos períodos se caracterizan por tener diferentes sistemas de circulación en los altos y bajos niveles de la atmósfera (Ferreira y Reboita, 2022). Además, estos mismos autores identifican áreas de Sudamérica con comportamientos homogéneos de la precipitación, asociándolos a los sistemas atmosféricos que actúan sobre ellos. En este marco regional, la provincia de Buenos Aires corresponde al sur de la cuenca de La Plata, la cual presenta un ciclo anual de la precipitación monzónico, con mayores precipitaciones durante el verano (diciembre, enero y febrero) y menores en invierno (junio, julio y agosto). En el verano, debido a la disponibilidad de energía solar, el intenso calentamiento de la superficie terrestre favorece el desarrollo de sistemas convectivos. Además, esta región recibe humedad y calor desde latitudes tropicales por la corriente de chorro sudamericana de nivel bajo (South American Low Level Jet) principalmente en el verano, justificando las mayores precipitaciones en esta estación. Es así que, las precipitaciones durante la estación húmeda del SMSA son sostenidas principalmente por Sistemas Convectivos de Mesoescala (MSC) y en la estación inactiva del Monzón Sudamericano las precipitaciones están asociadas mayormente a sistemas frontales (Raia y Cavalcanti, 2008).

METODOLOGÍA

Se cuenta con series de datos meteorológicos e hidrológicos diarios para el período 1/12/2020-4/06/2024 (1282 días).

Los datos de precipitación y temperatura diaria proceden de la estación Juan Carlos Ceraldi del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), ubicada en la ciudad de Azul, en la margen SE de la estación de aforo Seminario (Figura 1). Los datos de caudales derivan de la estación de aforo Seminario (estación 4069 del Sistema Nacional de Información Hídrica Nacional) y son recolectados por una estación limnométrica de registro automático horario perteneciente y operada por el Instituto de Hidrología

de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff". La altura del nivel freático (NF) es registrada por el IHLLA con frecuencia diaria, en el piezómetro denominado P40, localizado en la ciudad de Azul (cuenca media, aguas abajo de la estación de aforo Seminario) (Figura 1). Es el piezómetro con mayor registro diario disponible en las cercanías del arroyo, el cuál ha sido registrado desde diciembre de 1991 hasta la actualidad. Al respecto, Varni et al. (2014) identifican que la relación entre los niveles de descarga y distancia a la descarga varía menos que el nivel freático en el punto de observación, por lo cual, los descensos anuales y la profundidad media anual del nivel freático mantienen una relación inversa que presenta un $r^2 = 0.87$ y obtiene una relación aceptable entre la variabilidad del nivel freático anual y el caudal base anual en la estación de aforo Seminario ($r^2 = 0.73$). P40 tiene una profundidad de 7.7 m. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los datos disponibles.

Tabla 1. Variables meteorológicas e hidrológicas utilizadas para el análisis. N = 1282.

Variables	Frecuencia	Unidad	Responsable
Precipitación	Diaria	mm	SMN
Temperatura	Diaria	°C	SMN
Caudal	Diaria	m ³ /s	IHLLA
NF P40	Diaria	msnm	IHLLA

Las series de datos diarias de caudales y niveles freáticos presentaban valores faltantes. Para completarlas se utilizó el método de interpolación lineal implementado en la librería Pandas del lenguaje de programación Python (Reback et al., 2020).

El análisis estacional se realizó en función de la distribución anual de las precipitaciones generadas por el SMSA, considerando la fase húmeda de octubre a febrero y la fase seca de marzo a septiembre. Se analizaron los promedios mensuales y anuales de las series diarias de precipitación, temperatura, caudales y niveles freáticos, correspondientes al período comprendido entre diciembre de 2020 y junio de 2024. Además, se evaluaron eventos de recesión para el mismo intervalo temporal.

Por otro lado, se realizó la separación del hidrograma de la estación de aforo Seminario. La técnica aplicada en este trabajo permite dividir al caudal en dos componentes, la escorrentía directa y el caudal base. La misma se denomina filtro digital recursivo (Rodríguez et al., 2000) y fue propuesta por Lyne y Hollick (septiembre, 1979). Entre algunos de los muchos artículos en los que se encuentra utilizada

podemos citar a Nathan y McMahon (1990), Eckhardt (2005) y Varni et al. (2013, 2019). En este caso, para la serie de caudales diarios (m^3/s) de la estación Seminario (período 2003-2024) se utilizó el parámetro de ajuste $\alpha = 0.95$ (Nathan y McMahon, 1990; Eckhardt, 2005). Luego, para esta serie se realizaron 5 pasadas del filtro digital recursivo. Para evaluar y cuantificar la relación entre los resultados de las 5 pasadas del filtro y las demás variables del conjunto de datos (precipitación, temperatura, altura NF), se realizó una correlación de Spearman multivariada con la librería `scipy.stats`. (Virtanen et al., 2020). Esta correlación permitió identificar el filtro digital que tiene la mejor relación con la variabilidad del nivel freático.

Cómo se mencionó anteriormente, Varni et al. (2019) identificaron una relación cuadrática entre la altura del acuífero freático y el caudal base en el arroyo del Azul, presentada en la ecuación (2):

$$Q_b = 0.56 * LP^2 - 118.77 * LP + 6297.4 \quad (2)$$

siendo Q_b el valor del caudal base (m^3/s) y LP la altura del nivel freático (msnm) en el piezómetro 19B (La Posta).

Este conocimiento antecedente, y la identificación del filtro digital que representa el comportamiento del caudal base en la cuenca del arroyo del Azul, permitió el análisis de la relación entre el filtro digital seleccionado y la altura del acuífero freático mediante un modelo de regresión lineal, con una función polinómica de grado 2 con la librería `sklearn` (Pedregosa et al., 2011).

Para el modelo de regresión, se asume que, a la misma altura del nivel freático, el menor valor del filtro digital corresponde a la descarga del acuífero, basados en el supuesto de que el flujo de salida del acuífero es linealmente proporcional a su almacenamiento (acuífero Dupuit-Boussinesq) (Brutsaert y Nieber, 1977); mientras que valores mayores indican la presencia de flujos subsuperficiales además de la descarga del acuífero freático. El ajuste de la ecuación se llevó a cabo utilizando los valores mínimos de caudal base para cada altura del nivel freático, sin eliminar valores atípicos o datos con variaciones considerables de caudal base en alturas sucesivas. Esta decisión buscó evitar el sobreajuste del modelo. Se empleó una regresión polinómica de segundo grado, ajustando los parámetros para que la parábola se aproximó asintóticamente a $0.2 m^3/s$ a partir de 128.5 msnm,

correspondiente al menor caudal base identificado para esta altura del acuífero freático.

Por último, para realizar el análisis estacional de las descargas del acuífero freático al arroyo del Azul, se calculó el Índice de Caudal Base (en inglés BFI, Baseflow Index). El BFI es la relación entre el caudal base y el caudal total (Gustard et al., 1992). Se utilizó el caudal base calculado a partir del modelo de regresión cuadrática en función de la altura del nivel freático. Se realizó el promedio mensual del BFI diario y se exploró la relación del BFI promedio mensual con las variables meteorológicas e hidrológicas a través de una correlación multivariada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de las variables meteorológicas e hidrológicas

Durante el período de estudio, la precipitación media anual fue de 1011 mm, distribuidos en 531 mm durante la fase húmeda (octubre a febrero) y 480 mm en la fase seca (marzo a septiembre). Las temperaturas promedio registradas alcanzaron $19^\circ C$ en la fase húmeda y $11^\circ C$ en la fase seca. Estos resultados sugieren una marcada estacionalidad en el régimen hídrico de la región, impulsada por distintos mecanismos meteorológicos en cada fase del SMSA (Figura 2). Ferreira y Reboita (2022) destacan que las precipitaciones de la fase húmeda se originan principalmente en tormentas convectivas, en concordancia con Sarochar et al. (2005), quienes observaron que en la región pampeana las mayores precipitaciones ocurren entre noviembre y febrero, siendo el 75% del total anual producto de eventos convectivos. A diferencia de la fase seca SMSA, donde las precipitaciones se asocian con el ingreso de frentes fríos (Raia y Cavalcanti, 2008).

En la Figura 2 se presentan los promedios mensuales obtenidos para las variables meteorológicas e hidrológicas analizadas, clasificando los meses según la estacionalidad del SMSA.

En el mismo período, se identificaron 25 eventos de recesión hídrica, con un promedio anual de 7 eventos de recesión. En la estación de aforo Seminario, los caudales promedio fueron de $2.5 m^3/s$ durante la fase húmeda y de $3.9 m^3/s$ en la fase seca, por lo que podríamos definir que la estación de flujo alto del arroyo del Azul se corresponde con la estación seca del SMSA.

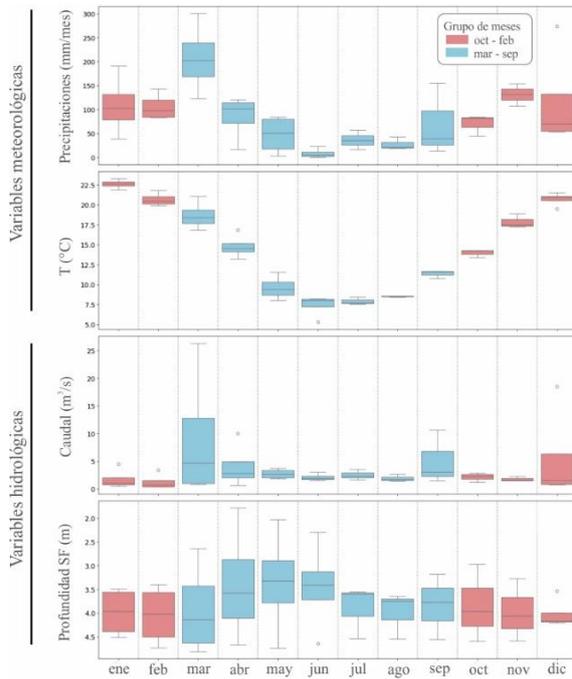


Figura 2. Promedios mensuales (diciembre 2020-junio 2024) de variables meteorológicas [precipitación y temperatura (T)] e hidrológicas [Profundidad superficie freática (SF) y caudal]. Fase activa del SMSA: octubre-febrero; fase inactiva: marzo-septiembre.

Por otro lado, la profundidad media de la superficie freática (SF) medida en el piezómetro 40 (P40) fue de 3.9 m durante la fase húmeda y de 3.7 m en la fase

seca (Figura 2). Este patrón indica una leve disminución en el nivel freático durante la fase de mayor precipitación, lo que podría estar vinculado a los patrones de recarga y descarga característicos de la región pampeana. Varni et al. (2019) sugieren que las descargas por evapotranspiración (EVT) alcanzan sus niveles más altos durante los meses de diciembre, enero y febrero, lo cual podría contribuir a explicar la disminución observada en la profundidad de la superficie freática durante la fase húmeda.

Separación del hidrograma

Los resultados de separación del hidrograma se presentan en la Figura 3, donde se puede observar el caudal total en relación a los 5 filtros analizados. Los filtros 1 y 2 corresponden a una respuesta rápida del caudal base a los eventos de tormenta, y los filtros 3, 4 y 5 a respuestas diferidas del caudal base a los eventos de tormenta.

La relación entre las variables meteorológicas, hidrológicas y los resultados aportados por el filtro digital fueron descritas mediante un análisis de correlación multivariado. Este análisis permitió identificar al filtro 'n3' como caudal base en la estación de aforo Seminario, debido a la fuerte correlación hallada entre dicho filtro y la variabilidad del nivel freático. Siendo el coeficiente de correlación 0.65 con un p-valor significativo ($1.59 \cdot 10^{-152}$) [Figura 4-Izquierda. Ver valor de NF (msnm) vs. 'n3'].

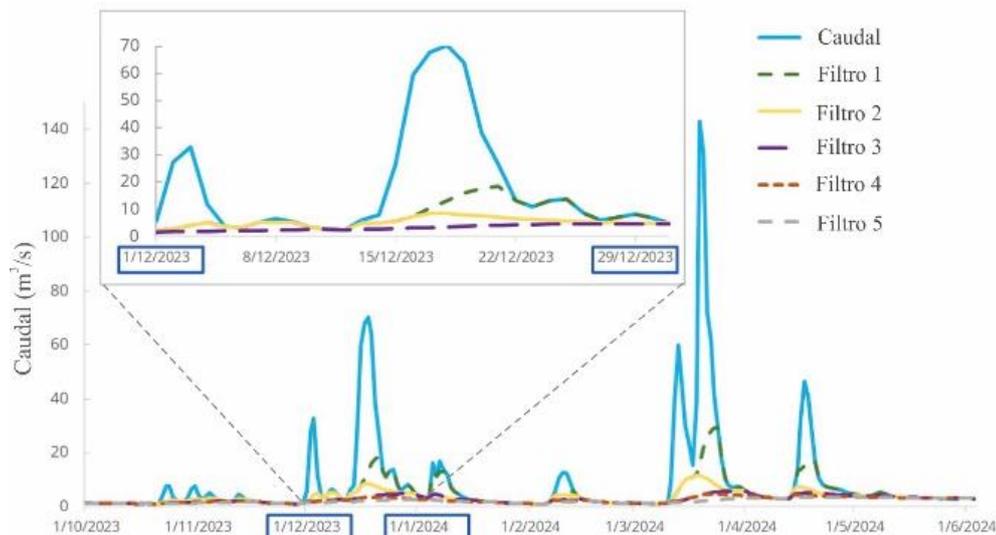


Figura 3. Separación del hidrograma de la estación de aforo Seminario con el filtro recursivo digital (Rodríguez et al., 2000). Detalle de los filtros 1, 2 y 3 en relación al comportamiento del caudal total durante dos eventos de crecida durante el mes de diciembre 2023.

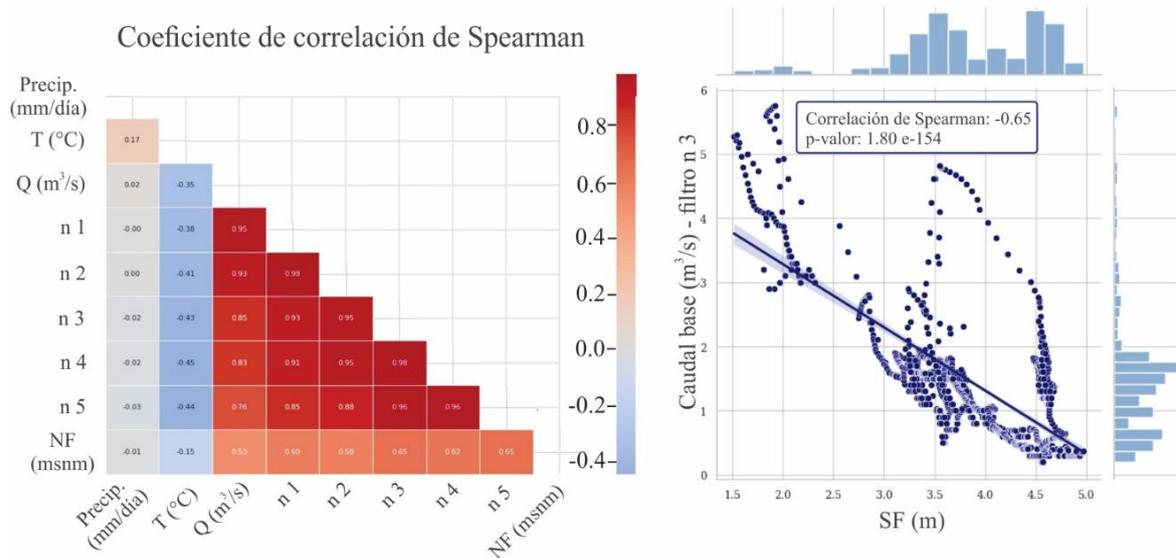


Figura 4. Izquierda: Análisis de correlación multivariada (coeficientes de correlación de Spearman). Derecha: Diagrama de dispersión de la relación profundidad de la SF en P40 y caudal base.

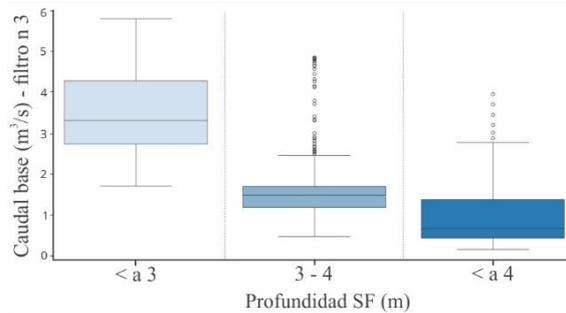


Figura 5. Relación entre la profundidad del acuífero freático en P40 y el caudal base definido a través del filtro digital.

Del análisis de la relación entre la variabilidad del nivel freático (P40) y la variabilidad del caudal base (filtro n3), se observó que cuando la profundidad de la superficie freática (PSF) es inferior a 3 m, el caudal base oscila entre 2.7 y 6 m³/s. En rangos de profundidad entre 3 y 4 m, el caudal base disminuye, variando entre 1.2 y 1.7 m³/s; y cuando la PSF se sitúa a más de 4 m de profundidad, el caudal base se reduce aún más, fluctuando entre 1.4 y 0.5 m³/s; siendo los mínimos valores de caudal base observados de 0.2 m³/s (Figura 5).

Estas observaciones coinciden con Varni et al. (2019), quienes concluyeron que el caudal base depende poco de la variabilidad del nivel freático cuando el mismo se encuentra a grandes profundidades. Según estos autores, a partir de una profundidad de 2.5 m, el caudal base comienza a aumentar en aproximadamente 1 m³/s por cada 50 cm de ascenso del nivel freático.

Como se mencionó en la metodología, se ajustaron los caudales base según el filtro digital n3 en función de los niveles freáticos medidos en P40, entendiendo a los niveles freáticos como la elevación de la superficie freática respecto al nivel del mar. Con lo cual, se obtuvo la ecuación (3):

$$y = \max(0.39x^2 - 100.79x + 6467.63, 0.2) \quad (3)$$

con un valor de ajuste R^2 de 0.49. El ajuste se muestra en la Figura 6.

En coincidencia con lo identificado por Varni et al. (2019) la relación entre el caudal base y el nivel freático es caracterizada por una ecuación cuadrática, indicando que el caudal base no aumenta de forma lineal con el ascenso del nivel freático y se incrementa de forma acentuada cuando los niveles son someros. Sin embargo, el valor de R^2 indica que la altura del nivel freático explica solo el 50% del caudal base obtenido mediante el filtro digital, sugiriendo que otros procesos también contribuyen significativamente al caudal base.

El análisis de la relación entre niveles freáticos y los caudales base, muestra que a partir de los 2.7 m de profundidad (equivalente a 130.5 msnm en P40), el comportamiento del caudal base en función de la profundidad de la SF cambia de forma significativa: se observa un incremento marcado del caudal base cuando la profundidad de la SF es más somera que 2.7 m, mientras que tiende a estabilizarse en aproximadamente 0.2 m³/s cuando la superficie

freática alcanza los 4 metros de profundidad (128.5 msnm en P40). Esta observación, junto con la profundidad promedio de la superficie freática durante la época húmeda del Monzón Sudamericano (3.9 metros), sugiere que otros procesos, como los flujos subsuperficiales, podrían ser un componente relevante del caudal base durante los meses de octubre a febrero. El análisis de los errores estacionales también permite identificar que los valores que presentan mayor discrepancia entre lo

observado y lo predicho corresponden a caudales base elevados asociados con niveles freáticos profundos. Esta situación se presenta principalmente durante la fase húmeda del Monzón Sudamericano.

Finalmente, aquellos caudales base que se encuentran por debajo de la curva de regresión para un determinado valor del nivel freático, podrían ser atribuidos a efectos locales o efectos de la evapotranspiración.

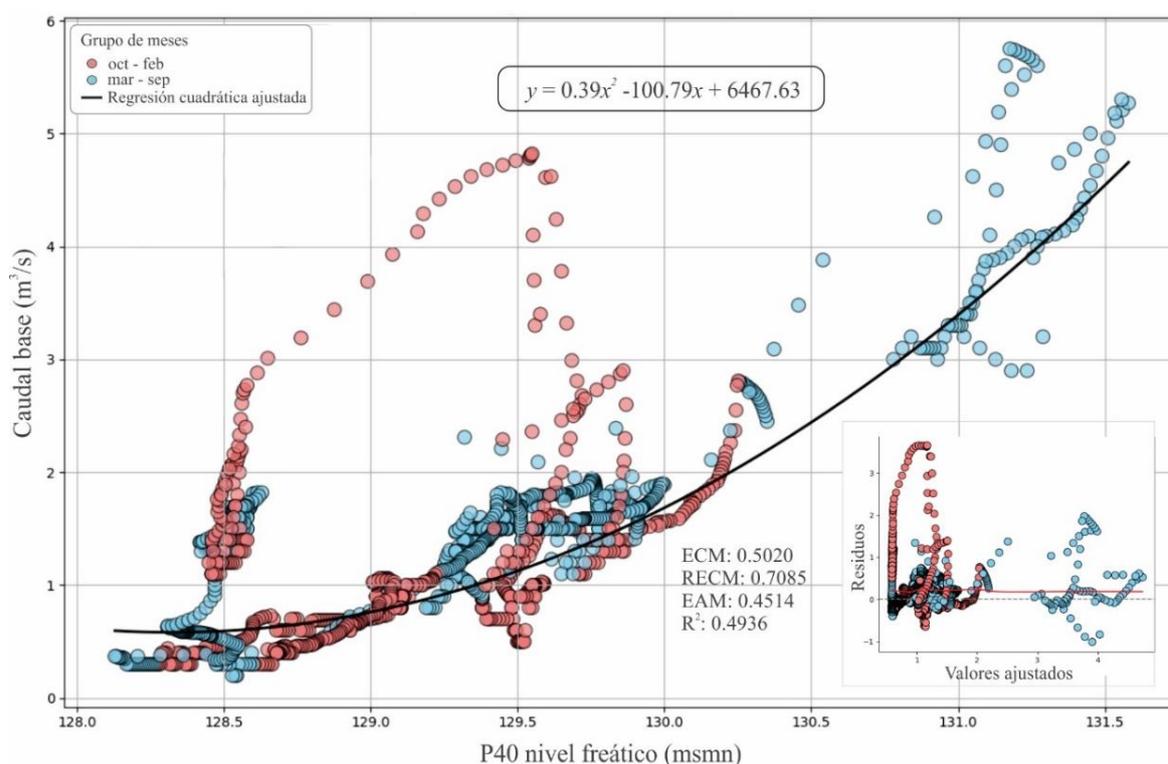


Figura 6. Modelo de regresión polinómica de grado 2. Residuos vs. valores ajustados, mostrando mayor desviación de los valores esperados entre octubre y febrero.

El caudal base anual promedio aportado por las descargas del acuífero freático, calculado entre diciembre de 2020 y junio de 2024, es de 1.14 m³/s, lo que equivale a 34.6 mm/año en la estación de aforo Seminario. Este valor es consistente con la estimación realizada por Guevara Ochoa et al. (2020), quienes, a través de modelación acoplada SWAT-MODFLOW, definieron un promedio anual de descargas subterráneas al arroyo del Azul en 34 mm/año con cierre en la estación Seminario. Así como también definieron que son mayores las descargas subterráneas hacia el arroyo durante el invierno y primavera, y menores en verano, debido a la variación

de la evapotranspiración. Lo cual es consistente con el análisis desarrollado a través de la ecuación de regresión cuadrática, quien indica que las mayores descargas del acuífero freático ocurren cuando el nivel freático se encuentra a una profundidad menor a los 3 m. Esta situación es identificada principalmente entre los meses de marzo-septiembre, en coincidencia con la estación seca del SMSA.

En la Figura 7 se puede observar la relación entre el caudal total, el caudal base registrado por el filtro digital y el caudal base proveniente de las descargas del acuífero freático.

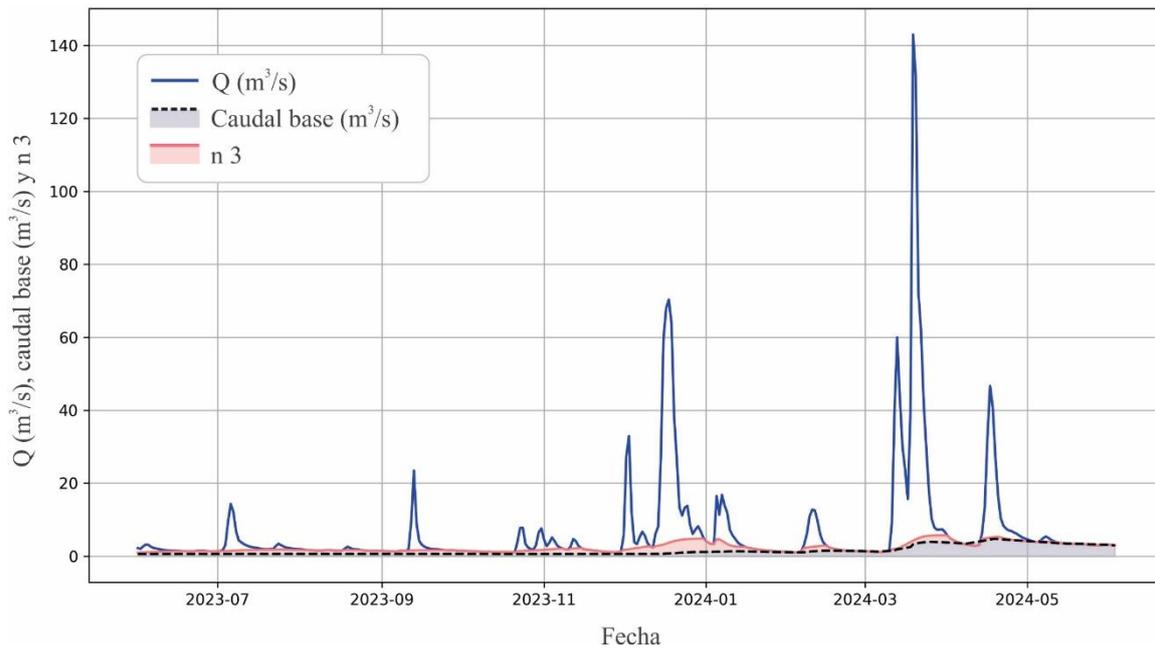


Figura 7. Separación del hidrograma (junio 2023-junio 2024). Caudal total, caudal base identificado por el filtro digital (n3) y descargas del acuífero freático modelado por la ecuación de regresión 3.

En los eventos de recesión el caudal total coincide con las descargas del acuífero freático y en eventos de crecida, el filtro digital se diferencia de las descargas del acuífero freático. Estas diferencias podrían estar asociadas al desarrollo de otros flujos que responden con retraso a los eventos de tormenta como los flujos subsuperficiales (Nathan y McMahon, 1990).

Análisis estacional del BFI

A partir del análisis de los promedios mensuales del BFI en el período analizado, en la Figura 8, podemos observar que, durante los meses de enero y febrero, el arroyo se sostiene principalmente por las descargas del acuífero freático, representando las descargas del acuífero el 90% del caudal total. Diciembre muestra

la mayor variabilidad del BFI, con valores que oscilan entre el 10% y el 90% de las descargas del acuífero en relación con el caudal total. Durante los meses de marzo a septiembre, que corresponden a la estación seca del SMSA y coinciden con la estación de flujo alto del arroyo, las descargas del acuífero representan entre un 45% y 75% del caudal total (Figura 8). Resultados similares fueron logrados por Alcaraz et al. (2024), quienes estimaron la proporción de caudal base en eventos de tormenta durante el mes de marzo utilizando la separación del hidrograma con 3H . Los valores encontrados por estos autores oscilan entre el 36% y el 47%. Esta similitud respalda la validez de los métodos de separación de hidrogramas mediante filtros digitales, los cuales permiten la separación del hidrograma en series de tiempo continuas.

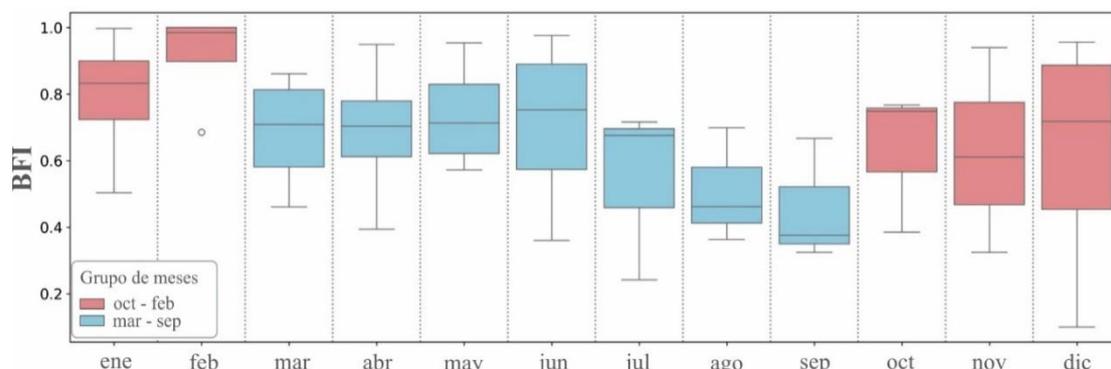


Figura 8. Distribución mensual del BFI. Fase activa del SMSA: octubre-febrero; fase inactiva: marzo-septiembre.

La correlación multivariada del BFI con las variables meteorológicas e hidrológicas es baja; sin embargo, muestra una correlación moderada con la temperatura mensual ($r = 0.28$) y un valor p significativo (6.8×10^{-2}). Esta relación entre las proporciones del BFI y las variables meteorológicas e hidrológicas es coherente con los hallazgos de Varni et al. (2019) y Guevara Ochoa et al. (2020), quienes destacan la evapotranspiración como un proceso clave que influye en la interacción entre el agua superficial y subterránea.

La variabilidad estacional en la relación entre las descargas del acuífero y el caudal total, junto con la correlación multivariada de los promedios mensuales del BFI con variables meteorológicas e hidrológicas, resalta la influencia del proceso de evapotranspiración en los componentes del caudal total, especialmente durante la fase húmeda del SMSA. En esta fase, entre los meses de octubre a febrero, la relación entre el filtro digital y la variabilidad del nivel freático evidencia la contribución de los flujos subsuperficiales al caudal base, debido a un nivel freático más profundo, resultado de una mayor evapotranspiración. Por el contrario, durante la fase seca del SMSA, entre los meses de marzo a septiembre, el nivel freático es más somero, lo que incrementa la participación del agua subterránea en el caudal total. No obstante, aunque el caudal base es mayor debido a niveles freáticos más superficiales, el componente de escurrimiento directo representa una proporción más significativa del caudal total en comparación con los meses de octubre a febrero.

CONCLUSIONES

El análisis del caudal base permite comprender las variaciones de almacenamiento del acuífero freático, asociadas a la variabilidad climática y la variabilidad en la interacción del agua superficial y el agua subterránea. Esto nos acerca a la comprensión en cómo las relaciones entre los flujos atmosféricos controlan los procesos hidrológicos que son sustento de ecosistemas que dependen de las aguas subterráneas.

Este estudio identificó y cuantificó la variabilidad mensual de los componentes del caudal total del arroyo del Azul en el período diciembre 2020-junio 2024 en la cuenca alta del arroyo del Azul. Se observó que el caudal total promedia $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$ durante la fase húmeda del SMSA y $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ durante la fase seca en la estación de aforo Seminario. Así mismo, se

identificó que, el caudal base presenta un comportamiento estacional muy marcado, variando entre 60-90% del caudal total entre octubre-febrero, la fase húmeda del SMSA, y entre 40-70% durante la fase seca del SMSA. Durante la fase húmeda, el caudal base es aportado principalmente por las descargas del acuífero freático y el incremento de los procesos de evapotranspiración debido a las mayores temperaturas genera una mayor capacidad de almacenamiento en la zona no saturada, lo que reduce el aporte de la escorrentía directa al caudal total, y favorece el desarrollo de flujos subsuperficiales. Por el contrario, en la fase seca, el mayor almacenamiento en la zona no saturada incrementa la contribución de la escorrentía directa al flujo del arroyo.

Además, los resultados confirman la relación cuadrática entre el nivel freático y el caudal base, propuesta por Varni et al. (2019); y se propone una metodología que permite dar un significado físico a los filtros digitales, al vincular su resultado con la variabilidad del nivel freático.

Finalmente, los valores de caudal base derivados del filtro digital $n3$ que no se ajustan al modelo cuadrático entre el caudal base y el nivel freático podrían explicarse por la presencia de flujos subsuperficiales. Como siguiente paso, se propone validar esta metodología mediante el uso de trazadores y análisis de mezcla. Esto permitirá mejorar la precisión en la identificación de los componentes del caudal total y, por ende, avanzar en el desarrollo de herramientas más robustas para el análisis hidrológico.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Leticia Rodríguez por la versión modificada del filtro digital recursivo.

Agradecemos especialmente al Doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Ambiente y Salud de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

REFERENCIAS

Alcaraz, E., Basaldúa, A., Quiroz-Londoño, O. M., Dapeña, C., Ibarra, E., Copia, L. y Martínez, D. (2024). Using ^3H as a tracer to study streamflow components in large plain catchments on temperate climate. *Hydrological Processes*, 38(8), e15264. <https://doi.org/10.1002/hyp.15264>

- Batista, L. V., Gastmans, D., Sánchez-Murillo, R., Saeta Farinha, B., Rodrigues dos Santos, S. M. y Kiang, C. H. (2018). Groundwater and surface water connectivity within the recharge area of Guarani aquifer system during El Niño 2014–2016. *Hydrological Processes*, 32(16), 2483-2495. <https://doi.org/10.1002/hyp.13211>
- Brutsaert, W. y Nieber, J. L. (1977). Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau. *Water Resources Research*, 13(3), 637-643. <https://doi.org/10.1029/WR013i003p00637>
- Chapman, T. G. (1991). Comment on “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses” by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Resources Research*, 27(7), 1783-1784. <https://doi.org/10.1029/91WR01007>
- Chapman, T. G. y Maxwell, A. I. (enero, 1996). *Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments* (Paper de Conferencia). Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; preprints of papers, 1, 1 (pp. 539-545). ISBN: 0858256495. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia.
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19(2), pp. 507-515. <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- Eckhardt, K. (2008). A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*, 352(1–2), pp. 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.01.005>
- Ferreira, G. W. S. y Reboita, M. S. (2022). A new look into the South America precipitation regimes: observation and forecast. *Atmosphere*, 13(6), 873. <https://doi.org/10.3390/atmos13060873>
- Gonzales, A. L., Nonner, J., Heijkers, J. y Uhlenbrook, S. (2009). Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(11), 2055-2068. <https://doi.org/10.5194/hess-13-2055-2009>
- Gualde, M. S., Arrouy, M. J., Zárate, M., Dietrich, S. y Gregorini, C. A. (2024). The missing sedimentological section linking the Neogene and Quaternary of the Tandilia system and the Salado basin, Buenos Aires province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 136, 104833. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104833>
- Guevara Ochoa, C., Medina Sierra, A., Vives, L., Zimmermann, E. y Bailey, R. (2020). Spatio-temporal patterns of the interaction between groundwater and surface water in plains. *Hydrological Processes*, 34(6), 1371-1392. <https://doi.org/10.1002/hyp.13615>
- Guisiano, P. A., Santoni, S., Huneau, F., Mattei, A. y Garel, E. (2024). Using natural tracers and calibrated analytical filter to highlight baseflow contribution to mountainous Mediterranean rivers in a context of climate change. *Journal of Hydrology*, 641, 131842. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131842>
- Gustard, A., Bullock, A. y Dixon, J. M. (1992). *Low flow estimation in the United Kingdom*. IH Report No. 108. Published by the Institute of Hydrology. ISBN 0 948540 45 1. Wallingford, UK. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/6050/1/IH_108.pdf
- Lyne, V. y Hollick, M. (septiembre, 1979). *Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling* (Paper de Conferencia). Institute of engineers Australia National Conference, Vol. 79, No. 10, pp. 89-93. Barton, Australia: Institute of Engineers Australia. https://www.researchgate.net/profile/Vincent-Lyne/publication/272491803_Stochastic_Time-Variable_Rainfall-Runoff_Modeling/links/54f45fb40cf299c8d9e6e6c1/Stochastic-Time-Variable-Rainfall-Runoff-Modeling.pdf
- Marcovecchio, R. y Varni, M. (2020). Una aproximación a las descargas por evapotranspiración del acuífero freático pampeano en la cuenca del Arroyo del Azul (llanura pampeana). *Cuadernos del CURIHAM*, 26, 13-19. <https://doi.org/10.35305/curiham.v26i0.149>
- McMahon, T. A. y Nathan, R. J. (2021). Baseflow and transmission loss: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: WAREs Water*, 8(4), e1527. <https://doi.org/10.1002/wat2.1527>
- McMillan, H. (2022). A taxonomy of hydrological processes and watershed function. *Hydrological Processes*, 36(3), e14537. <https://doi.org/10.1002/hyp.14537>
- Nathan, R. J. y McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26(7), pp. 1465-1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... y Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830. <https://www.jmlr.org/papers/volume12/pedregosa11a/pedregosa11a.pdf>
- Raia, A. y Cavalcanti, I. F. A. (2008). The life cycle of the South American Monsoon system. *Journal of Climate*, 21(23), pp. 6227-6246. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2249.1>

- Reback, J., McKinney, W., Jbrockmendel, Van den Bossche, J., Augspurger, T., Cloud, P., ... y Winkel, M. (2020). pandas-dev/pandas: Pandas 1.0.5. Zenodo. <https://zenodo.org/records/3898987>
- Rodríguez, L. B., Vionnet, C. A., Parkin, G. y Younger, P. L. (2000). Aplicación de un método automático para la separación de las componentes del hidrograma [Conference Proceedings (inc. Abstract)]. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba, Argentina.
- Sala, J., Kruse, E., y Agugliano, R. (1987). *Investigación hidrogeológica de la Cuenca del arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires*. Unpublished technical report. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, La Plata, 231 p. ISSN 0325-1225. <https://digital.cic.gba.gov.ar/handle/11746/2025>
- Sarochar, R. H., Ciappesoni, H. H., y Ruiz, N. E. (2005). Precipitaciones convectivas y estratiformes en la Pampa Húmeda: una aproximación a su separación y aspectos climatológicos de ambas. *Meteorologica*, 30(1-2), 77-88. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-468X2005000100005&script=sci_arttext
- Singh, K. P. (1969). Theoretical baseflow curves. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(6), 2029-2048. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0002203>
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10, 52-67. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10040-001-0170-8>
- Teruggi, M. y Kilmurray, J. T. (1975). *Relatorio Geología de la provincia de Buenos Aires*. VI Congreso Geológico Argentino, Bahía Blanca, Argentina, pp. 55-77.
- Usunoff, E., Varni, M., Weinzettel, P. y Rivas, R. (1999). Hidrogeología de grandes llanuras: La pampa húmeda argentina. *Boletín geológico y minero*, 110(4), 47-62. https://www.researchgate.net/publication/260943068_Hidrogeologia_de_Grandes_Llanuras_la_Pampa_Humeda
- van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaeffli, B. y Steele-Dunne, S. C. (2010). Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 46, W09525. <https://doi.org/10.1029/2010WR009127>
- Varni, M. R., Barranquero, R. S. y Zeme, S. (2019). Groundwater and surface water interactions in flat lands: the importance of ecological and flow regulation perspectives. *Sustainable Water Resources Management*, 5, 1791-1801. <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00334-1>
- Varni, M. R., Comas, R., Weinzettel, P. y Dietrich, S. (2013). Application of the water table fluctuation method to characterize groundwater recharge in the Pampa plain, Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1445-1455. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.833663>
- Varni, M. R. y Usunoff, E. J. (1999). Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 7, 180-187. <https://link.springer.com/article/10.1007/s100400050190>
- Varni, M. R., Weinzettel, P., Zabala, M. E. y Usunoff, E. (2007). Hidroquímica del acuífero freático del arroyo Azul en base al muestreo de agua a diferentes profundidades. En: E. L. Díaz, J. R. Tomás, M. Santi, M. Paris y O. Dalla Costa (Eds.), *V Congreso Argentino de Hidrogeología - 1a ed.* (pp. 211-220). Buenos Aires: Asociación Civil Grupo Argentino de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos AIH. <https://www.cohife.org.ar/wp-content/uploads/2024/02/Ficha-76-V-Congreso-Argentino-de-Hidrogeologia.pdf>
- Varni, M. R., Zeme, S. A., Weinzettel, P. y Dietrich, S. (2014). *Relación entre recarga al acuífero freático y otros términos del balance hídrico en Azul, centro de la Provincia de Buenos Aires*. En: Memorias del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Santa Fe: Universidad Nacional del Litoral. <https://digital.cic.gba.gov.ar/items/901ea210-23e9-4169-bc33-2da8af72a849>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., ... y SciPy 1.0 Contributors (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L. y Alley, W. M. (1998). *Ground water and surface water: A single resource*. U.S. Geological Survey Circular: 1139. Denver, Colorado. ISBN 0-607-89339-7. 79 p. <http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/pdf/circ1139.pdf>
- Woessner, W. W. (2000). Stream and fluvial plain ground water interactions: Rescaling hydrogeologic thought. *Groundwater*, 38(3), 423-429. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00228.x>
- Zabala, M. E., Gorocito, M., Dietrich, S., Varni, M. R., Murillo, R. S., Manzano, M. y Ceballos, E. (2021). Key hydrological processes in the Del Azul Creek basin, sub-humid Pampean Plain. *Science of the Total Environment*, 754, 142258. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142258>

Zárate, M. y Rabassa, J. (2005). *Geomorfología de la provincia de Buenos Aires*. En: Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, pp. 119-138. Universidad Nacional de La Plata. https://www.researchgate.net/publication/288184736_Geomorfologia_de_la_provincia_de_Buenos_Aires

LICENCIA

Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución -No Comercial -Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)



Tipo de Publicación: ARTÍCULO

Trabajo recibido el 27/11/2024, aprobado para su publicación el 16/12/2024 y publicado el 30/12/2024.

Este trabajo se enmarca dentro de la EDICIÓN ESPECIAL (2024): 40 años del Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff" (IHLLA), de la revista Cuadernos del CURIHAM.

COMO CITAR

Marcovecchio, R., Dietrich, S., Gualde, M. S. y Zabala, M. E. (2024). El caudal base como reflejo de los procesos hidrológicos a escala cuenca: un estudio de caso en cuencas hidrológicas de llanura. *Cuadernos del CURIHAM, Edición Especial (2024): 40 Años del IHLLA*. e06. <https://doi.org/10.35305/curiham.ed24.e06>

ROLES DE AUTORÍA

Romina Marcovecchio, Sebastián Dietrich, María Soledad Gualde y María Emilia Zabala participaron de manera conjunta en el proceso de investigación, la conceptualización y la creación y redacción del manuscrito. Romina Marcovecchio es la responsable de la compilación, el análisis e interpretación de los datos; Sebastián Dietrich estuvo a cargo de la validación y supervisión de la metodología empleada; María Soledad Gualde fue la encargada de la curaduría gráfica del trabajo; y María Emilia Zabala fue la supervisora de la redacción y escritura del manuscrito. Todos los autores aprobaron la versión final para su publicación y son capaces de responder respecto al manuscrito.