Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 internacional

Morfometría de la Cuenca del Río Areco, Provincia de Buenos Aires, Argentina
Juan Francisco Zanandrea, Fernanda J. Gaspari, Santiago Perdomo, Patricia Laurencena
AUGM DOMUS, (11), e009, artículos, 2024
ISSN 1852-2181 | https://doi.org/10.24215/18522181e009
https://revistas.unlp.edu.ar/domus
Asociación Grupo Montevideo | Universidad Nacional de La Plata
La Plata | Buenos Aires | Argentina

MORFOMETRÍA DE LA CUENCA DEL RÍO ARECO, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

MORPHOMETRY OF THE ARECO BASIN, BUENOS AIRES PROVINCE, ARGENTINA

Juan Francisco Zanandrea [1,2]
jfzanandrea@conicet.gov.ar | https://orcid.org/0009-0000-6552-2529

Fernanda J. Gaspari [3,4]
https://orcid.org/0000-0002-0676-9107

Santiago Perdomo [1,2]
https://orcid.org/0000-0003-0957-6068

Patricia Laurencena [3]
https://orcid.org/0000-0003-0018-9926

1. Universidad Nacional de San Antonio de Areco | Argentina
Departamento de Ciencias Naturales y Exactas
Centro de Investigaciones y Transferencia del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (CITNOBA)

2. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) | Argentina

3. Universidad Nacional de La Plata | Argentina
Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE), Facultad de Ciencias Naturales y Museo

4. Universidad Nacional de La Plata | Argentina
Cátedra Manejo de Cuencas Hidrográficas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (FCAyF)

AUGM DOMUS
Revista Electrónica de los Comités Agua, Energía y Medio Ambiente

Recibido 05/02/24 | Aceptado 05/08/24 | Publicado 27/09/24

RESUMEN

El análisis morfométrico de una cuenca hidrográfica consiste en el estudio de sus características geométricas y topográficas, tales como el área, la forma, la red de drenaje, la jerarquía de los cursos de agua y el relieve. Estos parámetros permiten evaluar el comportamiento hidrológico superficial y su vulnerabilidad frente a fenómenos naturales como fuertes crecidas que pueden derivar en inundaciones, conformando una herramienta básica para la modelación hidrológica. El objetivo del trabajo fue caracterizar y analizar morfométricamente la cuenca hidrográfica del río Areco, Argentina. La metodología fue la determinación de parámetros de forma, de drenaje y de relieve con base geoespacial, aplicando teledetección, con el sistema de información geográfica QGIS 3.28 Firenze, en conjunción con complementos estadísticos y planillas de cálculos. Los resultados alcanzados expresan un área total de 3.994,57 km^2, perímetro de 439,06 km, longitud máxima de 110,80 km y ancho medio de 36,05 km. Estas características expresan que la cuenca posee forma ligeramente alargada según el Factor Forma (FF= 0,33), en coherencia con el coeficiente de Gravelius que indica forma rectangular-oblonga (Kc= 1,96). El río Areco posee un orden de drenaje de grado 5, una longitud máxima del curso de agua de 135,14 km, con una densidad de 0,31, una frecuencia de 0,06 y una pendiente del cauce 0,00035 m/m, alcanzando un tiempo de concentración de 62 h según la metodología Kirpich. La descripción morfométrica lograda conforma un análisis geoespacial cuanti-cualitativo de la cuenca, definiendo parámetros para la modelización hidrológica que apoye a la planificación y gestión hídrica-ambiental.

PALABRAS CLAVE | cuenca hidrográfica, morfometría, río Areco, QGIS

ABSTRACT

The morphometric analysis of a watershed consists of studying its geometric and topographic characteristics, such as area, shape, drainage network, hierarchy of watercourses, and relief. These parameters allow for the assessment of surface hydrological behavior and its vulnerability to natural phenomena such as heavy rises in level that may lead to flooding, thus being a basic tool for hydrological modeling. The goal of this work was to characterize and perform a morphometric analysis of the Areco river basin in Argentina. The methodology involved the determination of shape, drainage and relief parameters based on geospatial data, applying remote sensing with the QGIS 3.28 Firenze geographic information system combined with statistical plugins and calculation sheets. The results indicate a total area of 3,994.57 km^2, a perimeter of 439.06 km, a maximum length of 110.80 km, and an average width of 36.05 km. According to these characteristics, the basin has a slightly elongated shape according to the Form Factor (FF= 0.33), consistent with the Gravelius coefficient which indicates a rectangular-oblong shape (Kc= 1.96). The Areco river is of 5th grade drainage order, with 135.14 km of maximum watercourse length, a density of 0.31, a frequency of 0.06, and a channel slope of 0.00035 m/m, with a concentration time reaching 62 hours according to the Kirpich method. The resulting morphometric description provides a quali-quantitative geospatial analysis of the basin and defines parameters useful for hydrological modeling to support water-environmental planning and management.

KEYWORDS | watershed, morphometry, Areco River, QGIS

INTRODUCCIÓN

En el año 2003, el Consejo Hídrico Federal (COHIFE) publicó los Principios Rectores de Política Hídrica de la Argentina, diseñados para orientar el desarrollo e implementación de políticas hídricas a nivel nacional. Estos principios se basaron en el Acuerdo Federal del Agua, resultado de la colaboración entre todas las provincias de la República Argentina y Ciudad Autónoma de Buenos Aires, a raíz de la necesidad de gestionar y proteger los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Posteriormente, por instancias de consenso que facilitó el COHIFE, estos principios fueron aprobados y trasladados en una Ley Marco de Políticas Hídricas (COHIFE, 2003), destacando que la cuenca hidrográfica es el núcleo central para cualquier análisis o investigación que se realice, con el fin de lograr un manejo integral y gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrográfica es un sector del territorio dinámico con interacciones entre unidades naturales (topografía, relieve, agua superficial-subterránea) y antrópicas (social, económico, político) (Gaspari *et al.*, 2009). El estudio de las cuencas desde el punto de vista morfológico, hidrológico y del terreno, constituye la base del conocimiento del espacio regional, ya que la dinámica del recurso hídrico está en consonancia con el relieve particular de cada región.

Una cuenca hidrográfica es una unidad morfológica integral, que se define en un territorio donde las aguas superficiales convergen hacia un cauce o unidad natural, como un lago o una laguna, delimitada por la existencia de la divisoria de las aguas (Gaspari *et al.*, 2013). Se denominan exorreicas cuando fluyen hacia el mar a través de una red de cauces y endorreicas cuando se dirigen hacia unidades naturales. Las divisorias de agua se conforman al marcar una línea imaginaria que une los sectores de mayor cota, basada en la topografía del terreno, estableciendo el borde externo o límite de dicha unidad hidrológica.

La morfometría de una cuenca hidrográfica se basa en el estudio de las características geométricas y espaciales de la misma, tales como su forma, tamaño, orientación, topografía, pendiente, red de drenaje y orden de los cursos de agua (Horton, 1932; Schumm, 1956; Strahler, 1964). Estos parámetros influyen en su comportamiento

hidrológico y en la generación y transporte de sedimentos (Leopold & Maddock, 1953; Valdes *et al*., 1979).

La morfometría, frente a eventos climáticos recurrentes como sequías e inundaciones, establece una conexión entre la respuesta hidrológica y la necesidad de gestión del agua de una cuenca hidrográfica (Ameghino, 1884; Sierra *et al*., 1994; Scarpati & Capriolo, 2013; Carballo, 2022). Esta relación se manifiesta en la generación de escorrentía superficial que se traduce en caudales, y en el impacto producido en el transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de los ecosistemas que conforman dicha cuenca (Gaspari *et al*., 2019).

En cuanto a los antecedentes de estudios morfométricos en ambientes de la llanura bonaerense, se destacan los estudios de Carbone & Piccolo (2002); Gaspari & Kruse (2018); Gil & Principi (2019); Riva, Sánchez Caro & Gaspari (2021), y en particular, el trabajo antecedente realizado por EASNE (1972) que conforma una contribución al estudio geohidrológico del Noreste de la provincia de Buenos Aires. Por otro lado, en la zona llana de la provincia de Corrientes, se distinguen los trabajos actuales realizados por Bolo, Smichowski, Morel, Ojeda & Contreras (2022) y Smichowski & Contreras (2023).

El objetivo del trabajo fue caracterizar y analizar morfométricamente la cuenca hidrográfica del río Areco, provincia de Buenos Aires.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca del río Areco se encuentra emplazado en el ámbito de la Pampa Ondulada (Daus, 1946), en el noreste bonaerense, Argentina. Según el Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos de la provincia de Buenos Aires (MIySP, 2020) ocupa un área de 3.980,47 km^2, con una dirección de drenaje desde la cabecera con orientación desde el OSO, hacia el ENE en la cuenca media, en la localidad de San Antonio de Areco, donde realiza un cambio de dirección hacia el NE, hacia el río Baradero, y finalmente desemboca sobre el río Paraná de Las Palmas (Figura 1). Se divide geomorfológicamente en tres zonas: llanura alta, intermedia y baja según los cambios de pendiente y el desarrollo del drenaje (EASNE, 1973).

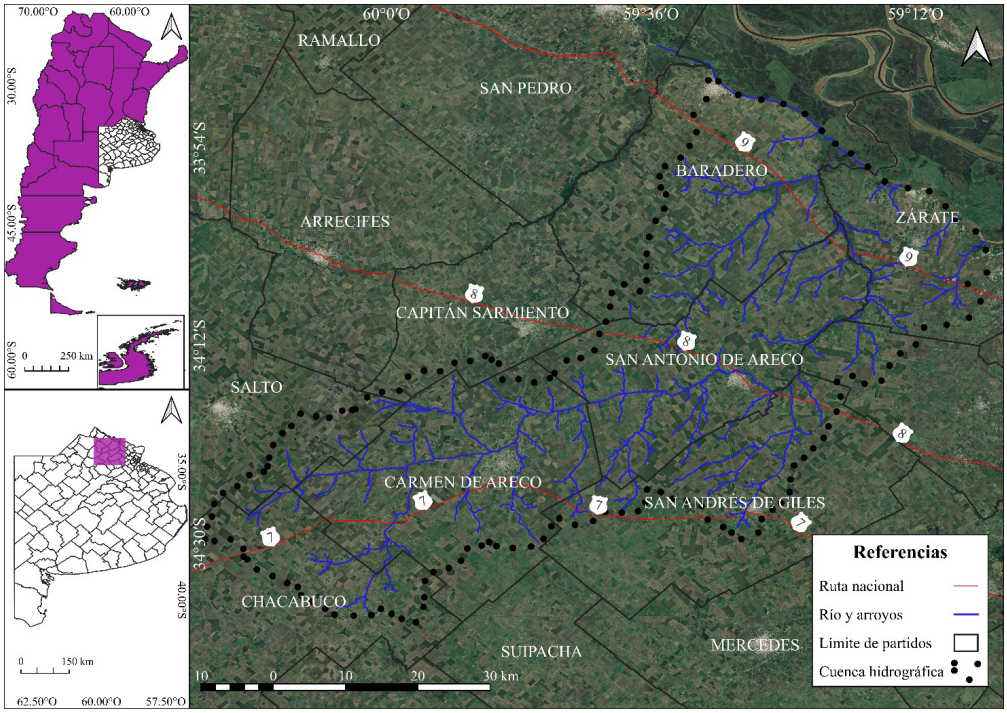

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Areco.

***Figure 1**. Location of the Areco River basin.*

El colector principal es el río Areco con un recorrido de 135,14 km a partir de la confluencia en el partido de Carmen de Areco de los arroyos Huncalito y De Los Ranchos, los cuales nacen en el partido de Chacabuco. Posee varios arroyos tributarios a ambas márgenes del río, como el Tatay, La Guardia, Lamela, Giles y Cañada Honda.

Según Fucks *et al.*, (2011) la altitud se distribuye entre 70 m s.n.m en la cabecera de la cuenca hasta menores de 1 m s.n.m en la desembocadura. Se encuentran geoformas con variada topografía como ondulaciones, paleoacantilados y desniveles pronunciados a lo largo del margen derecho del río Paraná de Las Palmas, vinculada a la historia geomorfológica de la zona durante las transgresiones marinas del Holoceno, donde la acción erosiva del agua ha actuado sobre el relieve.

Modelos geoespaciales aplicados

Según Gaspari *et al.*, (2013), los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen un instrumento básico para el procesamiento de datos geoespaciales y cartográficos,

debido a su versatilidad de almacenamiento, superposición y asociación de variables físicas, naturales, sociales y económicas.

Los SIG se basan en modelos vectoriales que representan la información georreferenciada por medio de una serie de segmentos lineales expresados por vectores, localizados por sus coordenadas en un sistema de referencia. Los modelos ráster simbolizan la información espacial mediante una matriz cuya unidad fundamental son celdas o píxeles, los cuales almacenan un valor numérico que indica una característica del territorio que representa. A diferencia de los modelos vectoriales, que se centran en objetos individuales, los modelos ráster poseen información de manera continua, siendo útiles en el análisis ambiental, ya que permiten estudiar fenómenos como la distribución de la vegetación, cambio de uso de suelo, calidad de agua, entre otras (Chuvieco, 2008).

Adquisición del Modelo Digital de Elevación (MDE)

El Instituto Geográfico Nacional, para difundir información geográfica precisa, oportuna y concisa, imprescindible para el desarrollo integral del país, colocó a disposición el Modelo Digital de Elevación (MDE) y el Modelo Digital del Terreno (MDT) en diversas resoluciones espaciales, en formato ráster. Este modelo, conocido como MDE-Ar, se encuentra actualmente en su versión 2.1, la cual combina las misiones satelitales ALOS desarrolladas por la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) y Shuttle Radar Topography Mission (STRM), un proyecto internacional colaborativo iniciado en el año 2000, que involucró a la National Aeronautics and Space Administration (NASA), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Agenzia Spaziale Italiana (ASI) y National Geospatial Intelligence Agency (NGA). Esta combinación ha sido fundamental para corregir varias inconsistencias que no pudieron ser resueltas mediante el proceso de GDAL-Filtrado (IGN, 2021), el cual se encarga de rellenar los valores faltantes utilizando las celdas vecinas más grandes.

En este trabajo, se optó por utilizar el MDE-Ar de 30 metros de resolución espacial.

Procesamiento del MDE

El MDE es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Este considera las alturas de la vegetación y las estructuras antrópicas (edificios, puentes, entre otros), lo cual puede introducir sesgos en los análisis altimétricos. Con el fin de corregir estos sesgos, se aplicó un conjunto de geoprocesos. En primer lugar, se utilizó el módulo SAGA "DTM filter (slope-based)" basado en los trabajos de Vosselman (2000). Este geoproceso asume que un cambio brusco de altitud entre píxeles cercanos se debe a la presencia de vegetación alta o estructuras antrópicas, en lugar de ser parte del terreno natural. Como resultado, se obtienen dos archivos rasters: uno denominado "Bare Earth" que representa la altura del terreno sin obstáculos, y otro llamado "Removed Objects" que muestra las estructuras eliminadas. Para rellenar los píxeles que fueron eliminados anteriormente, se utilizó el geoproceso "r. neighbors" del módulo GRASS de forma iterativa. Este proceso resolvió los valores de las celdas faltantes al calcular la media de los valores de las celdas vecinas, en una matriz de 3x3, de modo que no se perdiera información.

En la Figura 2a se puede observar un ejemplo del MDE sin corrección y sin procesar. A la derecha se encuentra el MDE corregido y procesado, tal como se detalló previamente (Figura 2b). Los puntos blancos/grises visibles en el MDE sin corrección se corresponden con estructuras o vegetación de gran tamaño o vegetación densa, que no representa la cota del terreno. Con el fin de comparar los resultados obtenidos de ambos MDE se llevó a cabo un perfil topográfico con una traza a lo largo del arroyo La Guardia (representada por la línea amarilla), abarcando tanto estructuras como áreas de vegetación forestal alta (círculo negro), aplicando el complemento "Terrain profile" (Figura 2c). En este perfil topográfico, la línea roja refleja el MDE sin corrección, mientras que la línea verde muestra el perfil generado a partir del MDE corregido. El círculo negro en la Figura 2a y 2c, se corresponde al área de arboleda mencionada, reflejada en los picos de la línea roja del perfil topográfico. Se observa también que, en la línea verde del MDE corregido, se presenta una configuración acorde a la cota natural del terreno en la zona. Estas imágenes corregidas conformaron la base de datos para el análisis morfométrico.

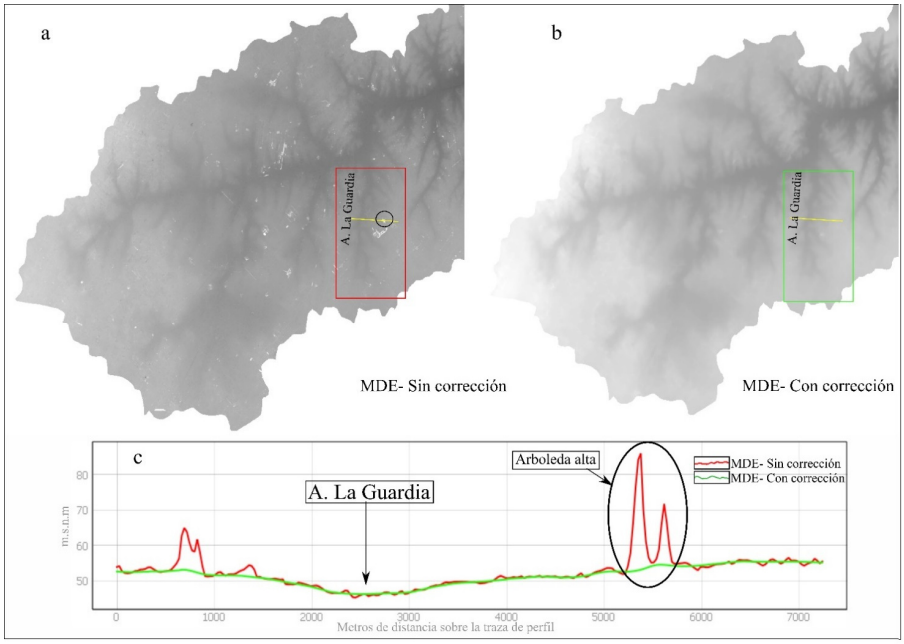

Figura 2. a. MDE sin corregir, b. MDE corregido, c. Perfil topográfico del arroyo La Guardia.

Figure 2. *a. Uncorrected DEM, b. Corrected DEM, c. Topographic profile of La Guardia stream.*

Los mapas temáticos generados en el presente estudio, incluyen la representación vectorial de "Río y arroyos" (formato shape) a partir del procesamiento del MDE corregido y aplicando el geoproceso "r. watershed" del módulo GRASS, a partir de los cuales se calcularon los parámetros hidrológicos.

La definición geoespacial del límite de la "Cuenca hidrográfica" del río Areco se elaboró mediante la corrección geométrica del archivo vectorial de la cuenca hidrográfica disponible en Servicio WFS (Web Freature Service) del portal de Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina (IDERA) y del Instituto Geográfico Nacional (IGN), procesada en combinación con el mapa altitudinal de las curvas de nivel (topográfico) y la información disponible en el Atlas de Cuencas y regiones hídricas y ambientales de la provincia de Buenos Aires (MIySP, 2020), utilizando procesos automáticos dentro del software QGIS 3.28 Firenze. Con el ráster MDE corregido y las representaciones vectoriales mencionadas, se llevó a cabo el análisis morfométrico, verificado por análisis estadísticos, con lo cual se generaron mapas temáticos con el objeto de obtener una base de datos para la caracterización morfométrica completa de la cuenca del río Areco.

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO

Asociado al terreno

Para ello, se realizaron análisis del terreno, hidrológico y morfométrico aplicando diversas metodologías, como las expresadas por Delgado & Gaspari, 2010; Gaspari *et al.*, 2009; 2012; 2019; Henaos, 1988; Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990, utilizando herramientas de geoprocesamiento.

En este análisis, se elaboraron mapas temáticos para representar visualmente los elementos geográficos en el área de la cuenca del río Areco. En primer lugar, se creó un mapa de elevaciones basado en el MDE corregido, por el procesamiento definido anteriormente. Además, se confeccionaron cinco (5) perfiles topográficos utilizando el complemento "qProf". Estos perfiles consistieron en una transecta lineal que representa el perfil longitudinal axial (E-E') de la Figura 3b, que abarca la longitud total de la cuenca, y también cuatro (4) perfiles transversales (A-A', B-B', C-C', D-D') ubicados en la cabecera, parte media y baja de la cuenca, respectivamente.

Posteriormente, se utilizó el complemento GDAL Tools, que proporciona diversas herramientas de geoprocesos disponibles en QGIS, para generar un mapa de pendientes en (%) y un mapa de orientación de laderas. Con el mapa de pendientes, se aplicó la descripción del relieve según López Cadenas de Llano (1998), para lo cual elabora una clasificación considerando rangos como: 0,5 % que representa relieve muy plano; 0,5 a 1 % relieve plano; 1 a 3 % del tipo relieve suave; 3 a 12 % del tipo relieve lomadas; 12 a 20 % relieve accidentado; 20 a 50 % relieve muy fuerte; 50 a 75 % relieve escarpado y mayores a 75 % relieve muy escarpado.

Para estudiar la orientación de las laderas se aplicó la metodología que ofrece GDAL que indica la inclinación del terreno respecto al norte dándole el valor de 0°/360°, asignando los distintos ángulos respecto al norte cuadrícula (en sentido horario). Se realizó una categorización de los cuatro cuadrantes: 0° a 90° noreste, 90° a 180° sureste, 180° a 270° suroeste y 270° a 360° noroeste.

Asociado a la cuenca hidrográfica

A continuación, se describe la metodología de cálculo morfométrico a nivel de cuenca hidrográfica establecido por Strahler (1952, 1957), Henaos (1988) y Gaspari *et al.*, (2009, 2013), identificando los siguientes parámetros:

- Perímetro- P (km) representado como la línea a lo largo del contorno la cuenca hidrográfica o divisoria de aguas.
- Área- A (km2) es la superficie que ocupa la cuenca hidrográfica.
- Longitud máxima de la cuenca- LM (km) es la longitud en línea recta, aproximadamente paralela al curso principal, que conecta los extremos de la cuenca.
- Longitud máxima del curso principal- LCP (km) distancia del curso desde su nacimiento o confluencia de los arroyos que generaron el río hasta la desembocadura.
- Ancho de la cuenca- AC (km) es la relación entre el área y la longitud máxima de la cuenca.
- Desnivel altitudinal- DA (m s.n.m) es la diferencia entre dos puntos ubicados dentro de la cuenca hidrográfica, en este caso la cota máxima y mínima.

Los coeficientes geométricos en la hidrología son herramientas que permiten entender cómo una cuenca responde a eventos de precipitación. Proporcionan información valiosa sobre la velocidad y la magnitud de la respuesta hidrológica de una cuenca, otorgando estimaciones de cómo el agua se moverá a través de esta, a partir de precipitaciones de diversas magnitudes. Para ello se aplicaron distintos coeficientes.

- Factor Forma- FF (adimensional) parámetro que proporciona información sobre la morfología de la cuenca (Ecuación 1). Cuando FF es similar a 1, representa una cuenca de forma redondeada experimentando crecidas más rápidas, mientras que valores de FF menor a 1, se caracteriza por ser una cuenca alargada experimentando así crecidas más graduales.

$$FF = A/LM^2 \qquad \text{Ecuación 1}$$

Siendo FF: Factor Forma; A: Área total de la cuenca (km^2); LM: Longitud máxima de la cuenca (km).

- Coeficiente de Gravelius- Kc (adimensional) se calcula con la Ecuación 2, y según su resultado indica una cuenca redonda para un Kc= 1,00; una oval redonda 1,25; oblonga Kc= 1,50; y una rectangular- oblonga para valores de Kc ≥ a 1,75.

$$Kc=P/(2\sqrt{\pi}*A)$$ Ecuación 2

Siendo Kc: Coef. Gravelius; P: Perímetro de la cuenca (km); A: Área total de la cuenca (km^2).

- Coeficiente de circularidad- CC (adimensional) según Miller se utiliza para evaluar la forma de una cuenca hidrográfica. Se calcula como la relación entre el área de la cuenca y el área de un círculo de igual perímetro. Este coeficiente varía entre 0 y 1, donde el valor 1 indica una cuenca circular y un valor de 0 indica una cuenca alargada (Ecuación 3).

$$CC=4*\pi*(A/P^2)$$ Ecuación 3

Siendo CC: Coeficiente de circularidad; A: Área total de la cuenca (km^2); P: Perímetro de la cuenca (km).

Asociado al relieve

Se determinaron parámetros como:

- Cota máxima y mínimo- cmax, cmin (m s.n.m) puntos de máxima y mínima altura topográfica ubicado dentro de la cuenca hidrográfica.
- Altitud media- Am (m s.n.m) es la altitud promedio, sumatoria de todas las altitudes de la cuenca dividido el total de puntos.
- Altitud más frecuente- Af (m s.n.m) corresponde a la cota más frecuente dentro de la cuenca hidrográfica.
- Altitud mayor, menor y media del cauce- Amc, Amec, Amedc (m s.n.m) es la altitud considerada sobre el cauce desde su naciente hasta su desembocadura.
- Histograma de frecuencia altitudinal- muestra la altitud más frecuente en la cuenca.
- Pendiente promedio de la cuenca- Smed (%) relación entre el desnivel altitudinal de la cuenca y la longitud del cauce principal.
- Curva hipsométrica es una representación gráfica de la distribución de las altitudes de una superficie terrestre en función de su área o porcentaje de área parcial que

ocupan las curvas de nivel, expresando el potencial de desarrollo o evolución en la que se encuentra una cuenca hidrográfica. La forma de la curva hipsométrica depende de factores como la edad, el clima, la litología y la tectónica (Racca, 2007). Se determino utilizando el MDE a intervalos de cinco metros y la superficie de ocupación, y se graficó con un procesador de gráficos. Esta curva puede compararse con modelos teóricos que indican el grado de desarrollo y equilibrio de un río. Ibañez et al., (2011) expresa en un gráfico universal la etapa de desarrollo de un río: "joven", que refleja un alto potencial de erosión; un río "maduro" con cierto grado de equilibrio o un río "viejo" bajo potencial erosivo.

Asociado a la red de drenaje

El cálculo de estos parámetros se realizó a partir del procesamiento geoespacial manual, por digitalización en pantalla del sistema de drenaje superficial sobre la base de una imagen satelital, dentro del entorno QGIS. Se definieron los siguientes parámetros:

- Jerarquización de la red de drenaje- se efectuó según la metodología de Strahler (1964), asignando un número a cada segmento del cauce según su interrelación con otros segmentos de la red de drenaje. Los segmentos que no reciben tributarios se les asigna el orden de uno (1), mientras que la confluencia de dos segmentos del mismo orden forma uno de orden superior, en este caso, la confluencia de dos segmentos de orden uno (1) dan un segmento de orden dos (2) mientras que un segmento orden tres (3) es la unión de dos segmentos de orden dos (2). Este proceso se repite sucesivamente hasta completar la jerarquización de la red de drenaje. El río principal es aquel cuyo cauce alcanza la máxima jerarquía dentro del área ocupada por la cuenca. Esta metodología permite analizar la forma y la estructura de una red de drenaje, así como estimar algunos parámetros hidrológicos e hidráulicos.

- Longitud total de drenaje- Lt (km) es el resultado de la sumatoria total de la longitud de los cursos presentes dentro del área de la cuenca hidrográfica.

- Densidad de drenaje- Dd se estableció aplicando el método de Horton (1932), como el cociente entre la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca (Lt) y el área total de la cuenca (A). Dd ≤ 0,5 km/km2 indican

una cuenca mal drenada (baja densidad) y ≥ 3,5 km/km2 indican una cuenca bien drenada (alta densidad).

Desde el punto de vista hidrológico, una cuenca bien drenada, de alta densidad de drenaje, implica una menor distancia media de recorrido del agua hasta el cauce principal, que reduce el tiempo de concentración y aumenta el coeficiente de escorrentía. Esto significa que una cuenca con alta densidad de drenaje tendrá una respuesta más rápida y mayor volumen de escorrentía que una cuenca con baja densidad de drenaje, ante un mismo evento de precipitación (Chow et al., 1988).

Desde el punto de vista geomorfológico, la densidad de drenaje refleja el grado de erosión y modelado del relieve por parte del agua (Strahler, 1952). Una mayor densidad de drenaje indica una mayor actividad erosiva y una mayor pendiente media del terreno, que favorece la generación de escorrentía superficial y el arrastre de sedimentos a diferencia de una baja densidad, donde la erosión hídrica será menor asociada a las bajas pendientes del terreno, la litología, el grado de vegetación, etc.

- Frecuencia de drenaje- F (adimensional) indica el número de cursos de agua en una determinada área. Se relaciona el número de tramos de todos los órdenes y el área total de la cuenca hidrográfica. La frecuencia de drenaje depende de factores como la precipitación, la topografía y la vegetación. Es un parámetro importante para el diseño de sistemas de drenaje y para evaluar el riesgo de inundaciones o erosión.

- Pendiente media del cauce- Sc (% y m/m) es la relación entre la altitud máxima y mínima (Amc, Amec) del cauce principal y su longitud (LCP) (López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari, 2007).

- Tiempo de concentración- Tc (h) se refiere al lapso de tiempo que requiere el agua precipitada en estado líquido de escurrir desde el punto más alejado de la cuenca hasta alcanzar el caudal de salida de la cuenca hidrográfica. En base a información de siete cuencas rurales de Estados Unidos, Kirpich (1940) desarrolló una fórmula para el cálculo del tiempo de concentración como se expresa en la Ecuación 4.

$$Tc=0,066*(LCP/\sqrt{Sc})^{0,77} \qquad \text{Ecuación 4}$$

Siendo Tc (h): Tiempo de concentración; LCP (km): Longitud total del cauce principal; Sc (m/m): pendiente media del cauce.

RESULTADOS Y DISCUSION

La herramienta geoespacial QGIS 3.28 Firenze permitió el procesamiento de los factores morfométricos y la generación de mapas temáticos para la visualización y mejor interpretación de los datos.

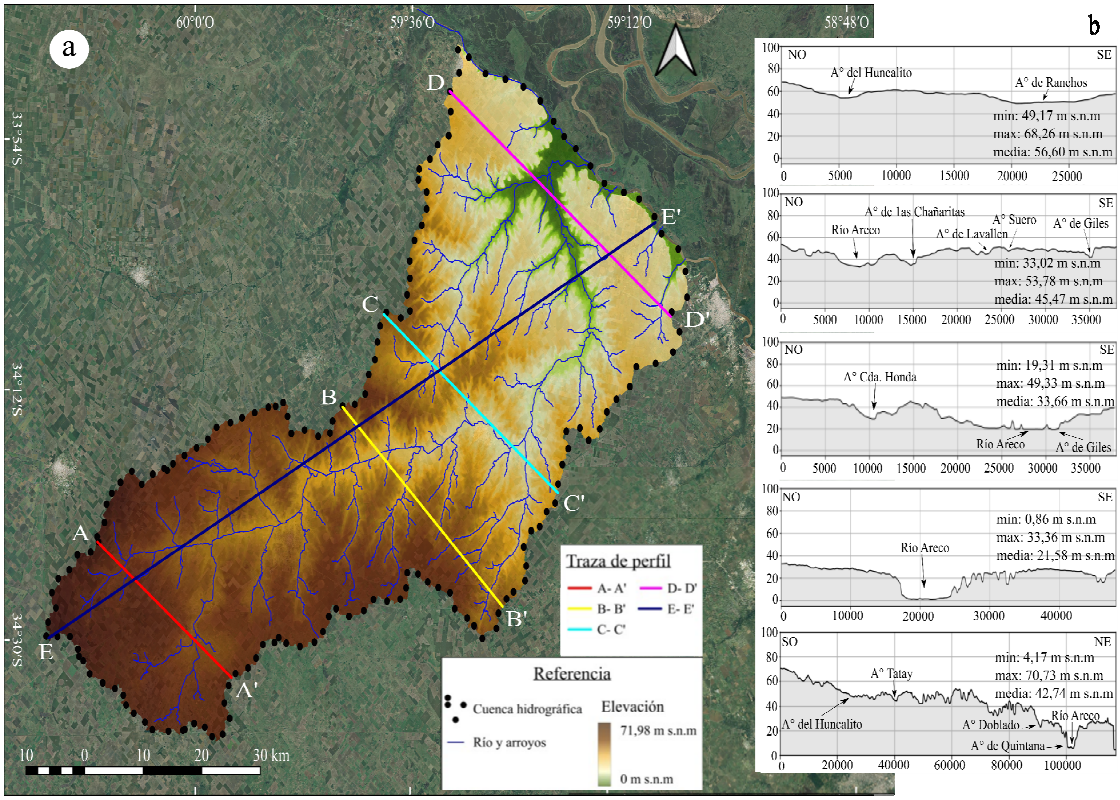

Figura 3. a. Ubicación de los perfiles topográficos en la cuenca del río Areco y ubicación del sistema de drenaje de la cuenca del río Areco. b. Perfiles topográficos transversales y perfil longitudinal.

Figure 3. *a. Location of topographic profiles in the Areco River basin and location of the Areco River basin drainage system. b. Transverse topographic profiles and longitudinal profile.*

En la Figura 3a se muestra el mapa digital de elevación de la cuenca del río Areco, generado por el procesado y corrección del MDE-Ar. En este mapa se puede observar que la cota máxima alcanza 71,98 m s.n.m. y la mínima se registra en las proximidades de la desembocadura sobre el río Paraná de Las Palmas, con una cota de 0 m s.n.m.,

encontrando diferencias no significativas con otros autores. En cuanto al cauce principal el río Areco la altitud máxima alcanza los 48,08 m s.n.m. y la altitud mínima es de 0,81 m s.n.m registrando un desnivel de 47,27 m. Como parte de este análisis, se presentan cuatro (4) perfiles transversales en tres zonas de la cuenca, que abarcan el sector suroeste (A- A'), centro (B- B', C- C') y sector noreste (D- D') y un perfil longitudinal axial (E- E') que abarca toda la extensión de la cuenca, desde la zona de máxima cota hasta la mínima, en el sector de desembocadura (Figura 3b). Los perfiles topográficos de la cuenca del río Areco son una representación significativa de su relieve, en particular, el perfil transversal C- C' revela la presencia de una divisoria local en el noroeste de la cuenca, que separa el arroyo Cañada Honda y el río Areco, que indica la presencia de una subcuenca.

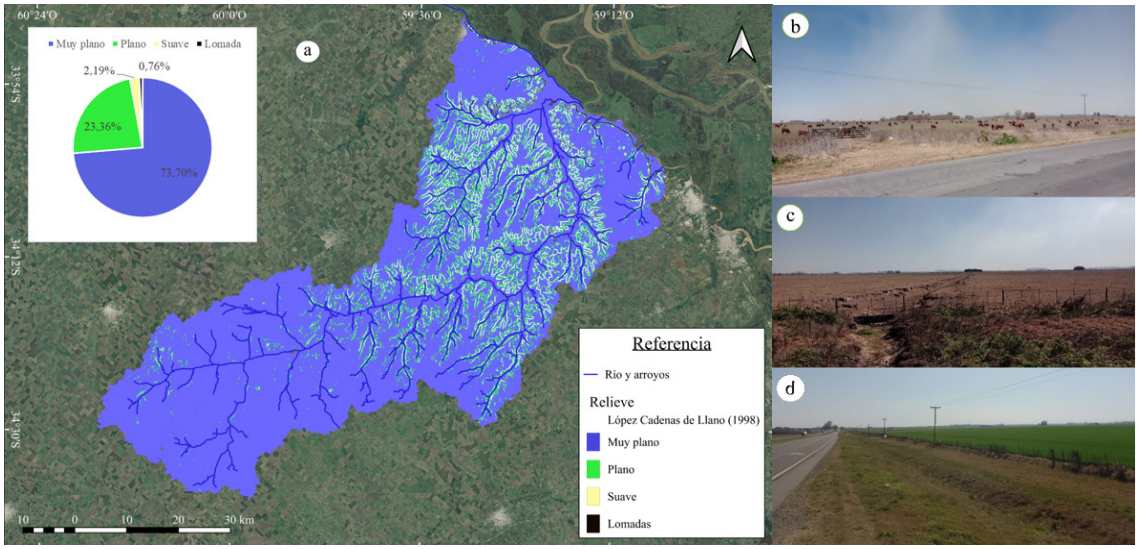

Figura 4. a. Mapa de relieve y el área porcentual que ocupa en la cuenca del río Areco. b. relieve muy plano (partido de Chacabuco). c. relieve plano con canal artificial para escurrir el agua debido a la baja pendiente. d. relieve plano donde se observa una leve ondulación (partido de Baradero).

Figure 4. *a. Relief map showing percentual surface area occupied by each type in the Areco River basin. b. Very flat relief (Chacabuco district). c. Flat relief with an artificial channel for water drainage due to the low slope. d. Flat relief with slight undulation (Baradero district).*

En la Figura 4a se representa la distribución del tipo de relieve en la cuenca en estudio y el gráfico expresa el área en porcentaje de ocupación, mientras que en las Figuras 4b, 4c y 4d se incluyen fotografías de los relieves más representativos, reconociendo que predomina el relieve muy plano, con un 73,70 %. En dirección noreste y próximos a los márgenes de los arroyos y del río principal, se manifiesta el relieve plano, con un 23,36 %

de ocupación en superficie y el relieve suave se representa en un 2,19 %. El menor porcentaje se encuentra en el relieve tipo lomada, con un 0,76 %, circunscripto a la margen derecha del río Baradero y del río Paraná de Las Palmas.

En la Figura 5 se observa el mapa de la orientación de laderas de la cuenca, donde predomina la orientación noreste con un 30,52 % del área, sureste y noroeste se distribuyen en un 26,40 % y 25,81 % respectivamente, y el menor porcentaje pertenece a la orientación suroeste con 17,27 % del área.

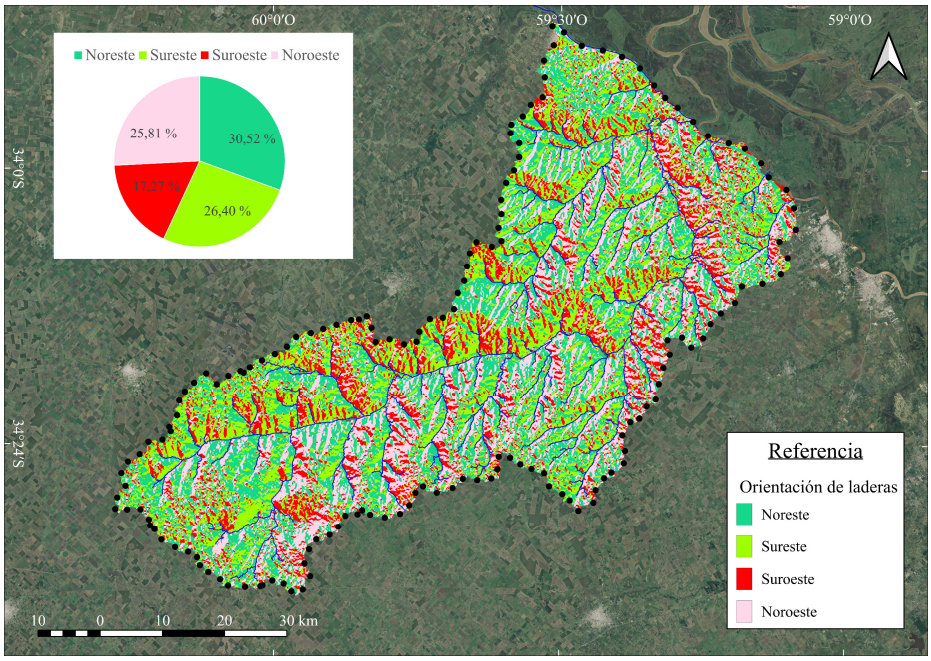

Figura 5. Orientación de laderas de la cuenca del río Areco.

Figure 5. *Orientation of the slopes of the Areco River basin.*

La Tabla 1 presenta los parámetros morfométricos obtenidos para analizar la forma de la cuenca del río Areco, que indican que la misma presenta una LM de 110,80 km y su cauce es de mayor longitud debido a curvas sobre el eje de su recorrido. Muestra un bajo desnivel general que se asocia a una leve pendiente del terreno, representando el relieve muy plano a plano. El desnivel del cauce es de 47,27 m.

La Tabla 1 indica los resultados alcanzados en relación con los parámetros de cuenca y relieve. Respecto al análisis de la forma de la cuenca, presenta un FF bajo, que expresa

una forma alargada, que incluye un río colector de mayor longitud que la totalidad de los tributarios, el cual estará sujeto a crecientes de menor magnitud, corroborado con el CC de bajo valor, que verifica una forma alargada, mientras que la pendiente media de la cuenca presenta valores similares. El Kc mayor a 1,75 manifiesta que la cuenca es rectangular – oblonga.

Desde un punto de vista hidrológico, la forma de la cuenca sugiere una susceptibilidad media a las crecidas generadas por las precipitaciones en el área, lo cual puede tener un impacto medio en la respuesta hidrológica, debido a que el agua tarda un mayor tiempo en alcanzar el punto de salida de la cuenca.

Asociado a la cuenca			Asociado al relieve		
Parámetro	**Sigla**	**Valor**	**Parámetro**	**Sigla**	**Valor**
Perímetro (km)	P	439,06	Cota máxima (m s.n.m)	cmax	71,98
Área (km2)	A	3.994,57	Cota mínima (m s.n.m)	cmin	0
Long. máx. (km)	LM	110,80	Altitud media (m s.n.m)	Am	39,84
Long. cauce principal (km)	LCP	135,14	Altitud más frecuente (m s.n.m)	Af	52,50
Ancho (km)	AC	36,05	Pendiente media cuenca (%)	Smed	0,05
Desnivel altitudinal (m s.n.m)	DA	71,98	Altitud mayor cauce (m s.n.m)	Amc	48,08
Factor Forma	FF	0,33	Altitud menor cauce (m s.n.m)	Amec	0,81
Coef. Gravelius	Kc	1,96	Altitud media cauce (m s.n.m)	Amedc	21,69
Coef. Circularidad	CC	0,26			

Tabla 1. Parámetros asociados a la cuenca y al relieve.

Table 1. *Parameters associated with the basin and the relief.*

El histograma de frecuencias altitudinales (Figura 6) expresa que predominan las cotas entre 50 y 55 m s.n.m., coincidiendo con los resultados alcanzados en los parámetros de relieve. Las cotas cercanas a la cabecera de cuenca con valores mayores a 70 m s.n.m. son las que menor expresión indican y al contrario la moda altitudinal está reflejada en cotas entre 20 y 55 m s.n.m.

En la Figura 7 se muestra la curva hipsométrica de la cuenca hidrográfica del río Areco, la cual relaciona las cotas absolutas en un intervalo de 5 m s.n.m. Según la clasificación de Ibañez et al., (2011) aplicada al caso del río Areco, la curva hipsométrica describe una cuenca joven a madura, que coincide desde el punto de vista geológico, con la

descripción de Fleite (2017) y de Fucks (2011), y además se interpreta que está sometida a procesos de erosión hídrica intensos.

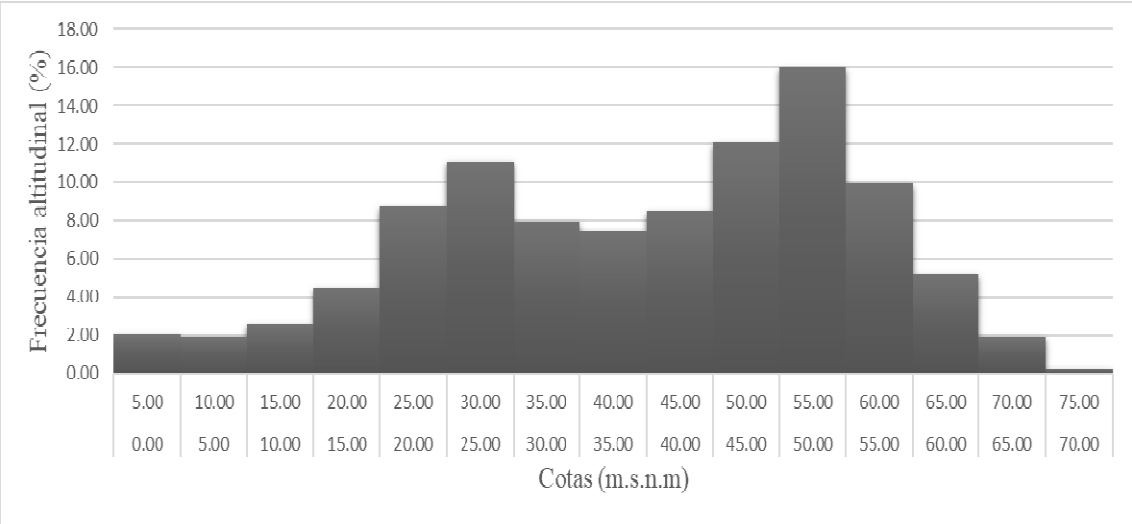

Figura 6. Histograma de frecuencias altitudinales.

Figure 6. *Histogram of altitudinal frequencies.*

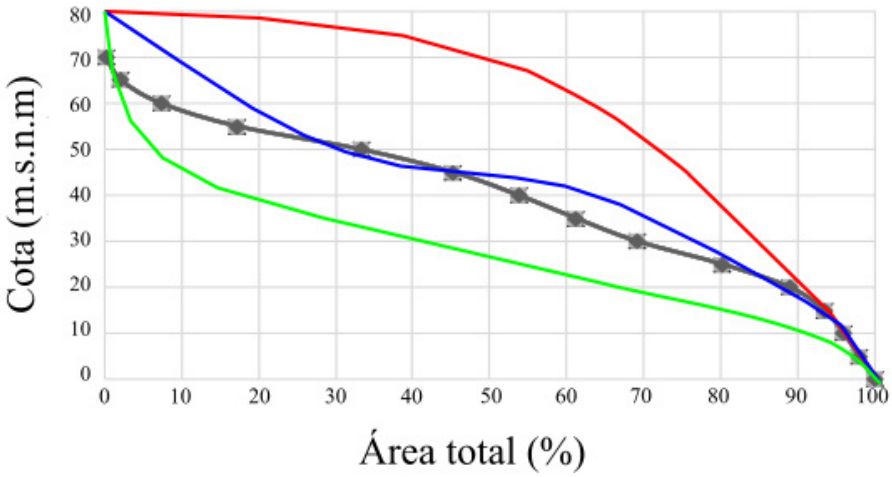

Figura 7. Curva hipsométrica. Curva negra: río Areco. Fuente: Ibañez et al., (2011). Referencia: Curva roja: río joven; Curva azul: río maduro; Curva verde: río viejo.

Figure 7. *Hypsometric curve. Black curve: Areco River. Source: Ibañez et al., (2011). Reference: Red curve: young river; Blue curve: mature river; Green curve: old river.*

La Tabla 2 presenta los valores correspondientes a los parámetros asociados a la red de drenaje de la cuenca del río Areco. La longitud total de todos los drenajes en la cuenca es de 1.230 km y presenta una baja densidad de drenaje de 0,31 km/km2, por encima de los valores presentados por EASNE, pero por debajo de la Dd para la cuenca vecina del río Luján, esto sugiere que la cuenca presenta un drenaje pobre, que puede tener implicaciones en el flujo de agua y el comportamiento hidrológico en la zona, particularmente debido a su emplazamiento en una llanura, que genera cursos de agua temporales. Este parámetro expresa una lenta respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en mayor tiempo. En efecto, al ser la densidad de drenaje baja, con una baja pendiente y velocidad de escurrimiento, provoca estancamiento de agua superficial, como es el caso de lagunas temporales, que define Fleite (2017) como un estado de inequilibrio.

En cuanto al tiempo de concentración de la cuenca, se estima en 62 horas, que equivale 2,58 días, que es importante para comprender el tiempo que tarda el agua en recorrer la cuenca desde el punto más alejado hasta el punto de salida.

Asociado a la red de drenaje		
Parámetro	**Sigla**	**Valor**
Orden	Or	5
Longitud total drenaje (km)	Lt	1.230
Densidad de drenaje (km/km2)	Dd	0,31
Frecuencia de drenaje	F	0,059
Pendiente media cauce (m/m)	Sc	0,035
Pendiente media cauce (%)	Sc	0,00035
Tiempo de concentración (h)	Tc	62

Tabla 2. Parámetros asociados a la red de drenaje de la cuenca del río Areco.

Table 2. *Parameters associated with the drainage network of the Areco River basin.*

En la Figura 8 se observa que el río Areco presenta, según la metodología de Strahler (1964), un orden de drenaje de 5, al igual que el río Luján, esto expresa la complejidad del curso de agua y de sus derivaciones o bifurcaciones. A lo largo del recorrido del río se observan gran cantidad de cursos tributarios de primer y segundo orden siendo predominantes los de tipo intermitentes, y los de mayor orden de tipo perenne.

Los resultados alcanzados en la cuenca del rio Areco y en coincidencia con Senisterra et al., (2014), se expresa que la relación existente entre los parámetros físicos de la cuenca y las variables hidrológicas otorgan una orientación cualitativa en cuanto a la respuesta hidrológica.

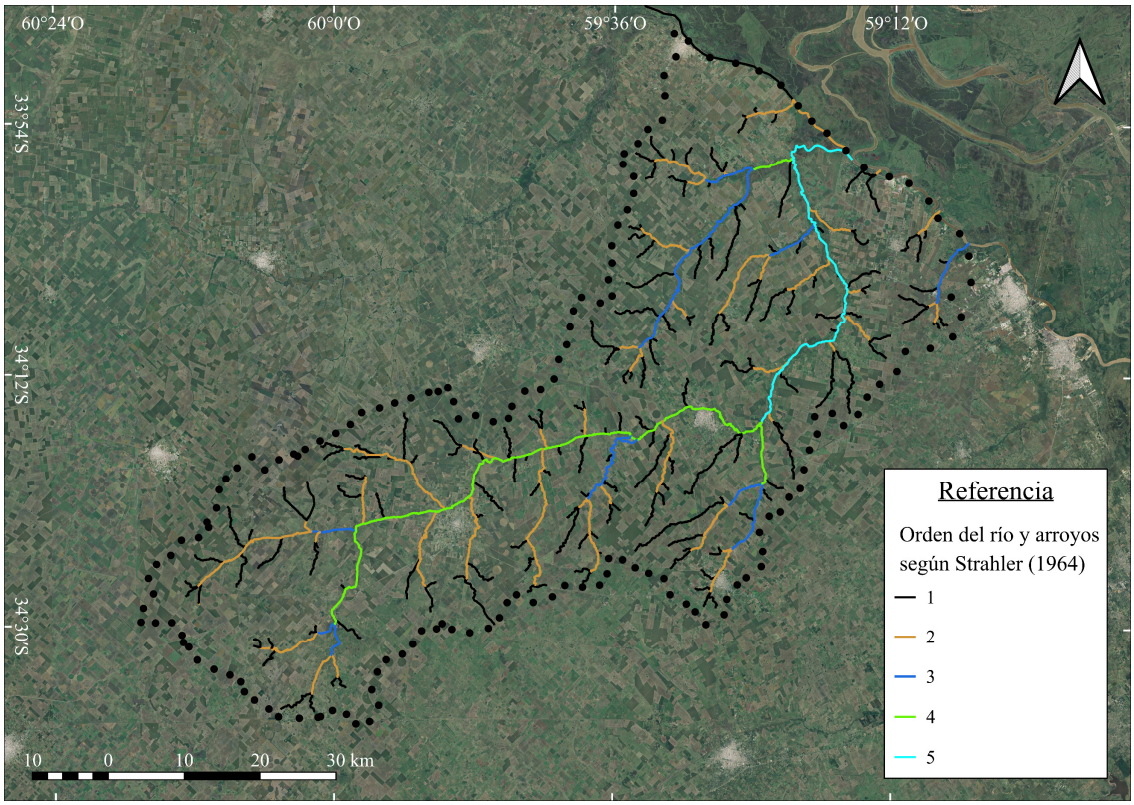

Figura 8. Mapa de orden de drenaje de la red hidrográfica del río Areco según Strahler (1964).

Figure 8. *Drainage order map of the Areco River hydrographic network according to Strahler (1964).*

La morfometría definida en la cuenca del río Areco permitió inferir que la cuenca se encuentra en una zona de bajo relieve, en equilibrio dinámico del sistema según las características de relieve, drenaje y geomorfológicas. La misma se caracteriza por presentar un relieve predominantemente muy plano, tanto en la zona de naciente como en sectores cercanos a la desembocadura. Sin embargo, hacia el este, se observa un cambio localizado de la pendiente, y por consiguiente cambios en el relieve, con la presencia de áreas de tipo plano y suaves asociadas a los márgenes de los arroyos y del río. En la zona de la desembocadura de la cuenca se encuentran relieves de tipo lomadas,

los cuales presentan las pendientes más pronunciadas de la cuenca coincidente con los paleoacantilados.

La orientación predominante de las laderas en la cuenca es en sentido noreste, con una exposición de suroeste a noreste, desde la cabecera a la desembocadura, respectivamente.

En base a la curva hipsométrica, el río se encuentra en un estadio de madurez y en un estado de inequilibrio, según Fleite (2017).

La forma alargada a rectangular-oblonga hacen que la cuenca del río Areco responda de manera lenta y gradual a las crecidas e inundaciones, como así tener consecuencias en el tiempo de concentración siendo esta de 62 h, relacionado también a la baja pendiente de la cuenca 0,05 % y consecuentemente del cauce principal (0,00035 %). La densidad de drenaje posee un valor de 0,31 km/km2 representando a una cuenca bien drenada. El colector principal río Areco, posee un orden 5, y sus afluentes, en su mayoría, responden al orden 1.

CONCLUSIONES

El estudio integral de la morfometría de la cuenca hidrográfica del río Areco desempeña un papel fundamental a nivel local y regional, porque permitió realizar una descripción físico-espacial, como base para investigaciones en diversas disciplinas aplicadas, y proporciona información hidrológica de la región para interpretar y predecir los comportamientos hidrológicos y de torrencialidad.

Guzmán *et al.*, (2021) mencionan que la morfometría de una cuenca hidrográfica basa sus características en la geomorfología de base, la cual puede ser definida con apoyo en SIG, resultado alcanzado en el presente trabajo.

Además, el uso de SIG integrando la definición de parámetros morfométricos con la herramienta geoespacial, conforma un instrumento práctico para la determinación de áreas susceptibles a procesos de escurrimiento superficial sobre laderas, lo cual contempla un resultado útil para la definición de estrategias de mitigación del riesgo a

desastres por excesos hídricos, como es en el caso de estudio de la cuenca del río Areco en la llanura bonaerense.

La caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica del río Areco destaca la importancia de conocer estos parámetros para comprender su comportamiento hidrológico y su respuesta ante eventos pluviales. La integración de múltiples parámetros morfométricos y el uso de un entorno SIG permitió llevar a cabo el análisis geoespacial de manera eficaz e integradora al diagnóstico del territorio en relación con la dinámica hídrica superficial, lo cual es relevante para la gestión y planificación de recursos hídricos en la región.

REFERENCIAS

Ameghino, F. (1884). *Las secas y las inundaciones en la Provincia de Buenos Aires.* Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires.

Bolo, J., Smichowski, H., Morel, D. E., Ojeda, E. A. y Contreras, F. I. (2022). Morfometría de la cuenca del arroyo Baró (San Roque, Corrientes). *Vientos del Norte*, 8(1), 4-20. https://hdl.handle.net/11336/208698

Carballo, C. (2022). El mapa del agua: entre inundaciones y sequías. *Estudios Rurales*, 4(7), 127-133. https://doi.org/10.48160/22504001er7.305

Carbone, M. E. y Piccolo, M. C. (2002). Morfometría de la cuenca de Arroyo Claromecó, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Geofísica*, (56), 51-66. http://hdl.handle.net/11336/36622

Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Ariel.

Consejo Hídrico Federal. (2003). *Principios Rectores de Política Hídrica de la Republica Argentina*. COHIFE.

Daus, F. (1946). Morfografía General de las Llanuras Argentinas. Geografía de la República Argentina. *Sociedad Argentina de Estudios Geográficos*, 3, 115-198.

Delgado, M. I. y Gaspari F. J. (2010). Caracterización morfométrico geoespacial. Estudio de caso: Arroyo Belisario, Argentina. *Tecnociencia Chihuahua*, 4(3), 154-163. https://doi.org/10.54167/tch.v4i3.711

Estudio de aguas subterráneas del nordeste. (1973). *Contribución al estudio geohidrológico del noreste de la provincia de Buenos Aires*. Consejo Federal de Inversiones.

Fleite, S. N., Fabrizio de Iorio, A. R. y García, A. R. (2017). Análisis hipsométrico de la pampa ondulada y su importancia como herramienta para la prevención de impactos ambientales. *AUGMDOMUS*, 9, 17-24. http://hdl.handle.net/11336/75155

Fucks, E., Blasi, A., Carbonari, J., Huarte, R., Pisano, F. y Aguirre, M. (2011). Evolución geológica-geomorfológica de la cuenca del río Areco, NE de la provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 68(1), 109-120. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/60698

Gaspari, F.J. (2007). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas. Aplicación de sistemas de información geográfica*. [Tesis de maestría, Universidad Internacional de Andalucía]. https://dspace.unia.es/handle/10334/59

Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A.M. y Bestiero, S.I. (2009). *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*. Universidad Nacional de La Plata. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/165354

Gaspari, F. J., Vagaría, A. M. R., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M. I. y Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143-158. https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/25777

Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I. y Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/27877

Gaspari, F. J. y Kruse, E. E. (2011). Características del comportamiento hidrológico en áreas de llanuras basado en el análisis morfométrico. Caso de estudio: Arroyo del Tala. Provincia de Buenos Aires. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (27), 43–48.

Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. y Montealegre Medina, F. A. (2019). Manejo de cuencas hidrográficas. *Herramientas de sistemas de información geográfica*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/87641

Gil, V. y Principi, N. C. (2019). Cuenca del río Luján: hidrografía y morfometría. En G. D. Buzai, N. Principi, E. Montes Galbán, S. Lanzelotti, L. Humacata, G. Acuña Suarez y C. Baxendale (Eds.), *Atlas de geografía humana de la cuenca del Río Luján* (pp. 44-45). Instituto de Investigaciones Geográficas. http://hdl.handle.net/11336/131830

Guzmán Guaraca, A.; De Antueno, L. y Gaspari, F. J. (2021). Análisis de la variabilidad geoespacial de la fragilidad morfométrica en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Revista Facultad de Agronomía*, 120(1), 1-18. https://doi.org/10.24215/16699513e069

Henao Sarmiento J. E. (1989). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Universidad Santo Tomás.

Horton R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350-361.

Ibañez Asensio, S., Moreno Ramón, H. y Gisbert Blanquer, J. M. (2011). *Morfología de las cuencas hidrológicas*. Universitat Politècnica de València. https://riunet.upv.es/handle/10251/10782

Instituto Geográfico Nacional. (sf). Introducción. Modelo digital de elevaciones. *IGN*. https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Introduccion

Kirpich Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.

Leopold, L. B. y Maddock, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *Geological Survey Professional Paper*, 252. https://doi.org/10.3133/pp252

López Cadenas de Llano, F. (1998). *Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión: ingeniería medioambiental*. Tragsa.

Mintegui Aguirre, J. A. y López Unzú F. (1990). *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz.

Racca J.M.G. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*, 77(1-2), 31-38.

Riva, P., Sánchez Caro, A. y Gaspari, F.J. (2021). Caracterización morfométrica de la Cuenca del río Luján. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, 13(21), 1-20.

Scarpati, O. E. y Capriolo, A. D. (2013). Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio- temporal. *Boletín del Instituto de Geografía*, 82, 38-51. http://hdl.handle.net/11336/1325

Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597-646. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2

Senisterra G. E., Rodríguez Vagaría A. M., Gaspari F. J. y Mazzucchelli, M. G. (2014). Morphometric aspects of the mountain region of the stream Napaleofú, Buenos Aires. Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 55(2), 287-303.

Sierra, E. M., Long, M. F. y Bustos, C. (1994). Cronología de inundaciones y sequías en el noreste de la provincia de Buenos Aires 1911-1989. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 14(3), 241-249.

Smichowski, H. y Contreras, F. I. (2023). Análisis morfométrico de la cuenca río Santa Lucía (Corrientes, Argentina). *Revista Geográfica de América Central*, 70, 297-320. https://dx.doi.org/10.15359/rgac.70-1.11

Strahler A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142. http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2

Strahler A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions *American Geophysical Union*, 38(6), 913–925. http://dx.doi.org/10.1029/TR038i006p00913

Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En V. Chow (Ed.), *Handbooks of Applied Hydrology* (pp. 439-476). McGraw Hill.

Valdes, J. B., Fiallo, Y. y Rodríguez-Iturbe, I. (1979). A rainfall-runoff analysis of the geomorphologic IUH. *Water Resources Research*, 15(6), 1421-1434.

Vosselman, G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII(Part B3), 935-942.