

## Análisis hipsométrico de la pampa ondulada y su importancia como herramienta para la prevención de impactos ambientales

*Hypsometric Analysis of Rolling Pampa and its Importance as a Tool for Preventing Environmental Impacts*

Santiago N Fleite<sup>a\*</sup>, Alicia F de Iorio<sup>a</sup>, Ana R García<sup>a</sup>

Palabras clave:

cuenas,  
geomorfología  
fluvial

Keywords:

basins, river  
geomorphology,  
rolling Pampa.

### ABSTRACT

The region known as rolling Pampas is crossed by multiple rivers, whose dynamics is unknown, despite their important location. This is mainly due to the lack of long-standing hydrological data on the region. Moreover, a large number of animal feeding operations farms (AFOs) are concentrated, being a significant source of river pollution. Thus, it is impossible to predict the environmental impact of such activities and to draw up accurate good practice guidelines for rural development since the necessary hydrological information is not available. One possible way to overcome this problem is to use hypsometric analysis that is based on topographic data and so can establish similarities among different rivers in terms of their behaviour. In the area under study, it was found that all basins have very similar hypsometric curves as well as similar hypsometric integral values. These findings show its hydrological homogeneity. Furthermore, all the basins were classified as non-equilibrium basins, which indicate that erosion is the main geomorphological factor and that the free runoff process is the most significant contamination carriers.

### RESUMEN

La región denominada pampa ondulada se halla en el centro-este de la República Argentina. Esta se encuentra surcada por múltiples ríos, cuya dinámica, a pesar del importante lugar donde se hallan, se encuentra poco estudiada. Esto se debe principalmente a la falta de datos hidrológicos de larga duración en la región. Al mismo tiempo, en esta región se concentra una gran cantidad de establecimientos ganaderos intensivos (AFOs por sus siglas en inglés) que representan una importante fuente de contaminación sobre los anteriores. Ello implica la imposibilidad de predecir el impacto ambiental de dichas actividades y de forjar lineamientos precisos de buenas prácticas para el desarrollo rural al hallarse ausente la información hidrológica necesaria. Una posible forma de salvar este problema es empleando el análisis hipsométrico, que a partir de datos topográficos es capaz de establecer, entre otras cosas, la similitud en el comportamiento de diferentes ríos. Para la región bajo estudio se encontró que todas las cuencas presentan valores de integral hipsométrica muy similares. Ello dejó en evidencia la homogeneidad hidrológica de la región. Además, todas ellas pudieron clasificarse como cuencas en estado de inequilibrio, indicativo de que la erosión es el principal factor geomorfológico actual, y los procesos de escorrentía libre los más significativos como vías de polución.

RECIBIDO: 9 DE FEBRERO DE 2017; ACEPTADO: 22 DE AGOSTO 2017

<sup>a</sup> Cátedra de Química Analítica, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Avda. San Martín 4453, CABA.

\*Autor para correspondencia: +5411-4524-8085. fleite@agro.uba.ar

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento del comportamiento hidrológico de las cuencas que componen una región es fundamental tanto para el ordenamiento del territorio como para el desarrollo de infraestructura y planes la regulación de las actividades que se desarrollan en las mismas. Ello es así dado que el comportamiento del agua en los sistemas lóticos condiciona las áreas de posibles inundaciones, la duración e intensidad de estas, la cantidad de agua disponible, caudales, etc. No obstante, en la región denominada pampa ondulada, en la región centro-este de la República Argentina (Bilenca & Miñarro, 2004; ver figura 1), se carece de registros hidrodinámicos de larga data en prácticamente todos sus ríos dentro de la provincia de Buenos Aires, lo cual resulta especialmente preocupante dado que en la misma se halla una gran concentración de actividades ganaderas intensivas (AFOs) que, de no ser bien manejadas, pueden actuar como fuentes de contaminación hídrica (García *et al.*, 2013). Por ello resulta de gran interés obtener datos a través de fuentes indirectas que permitan al menos aproximar el comportamiento hidrológico de sus ríos, sentando así las bases para el desarrollo de manuales de buenas prácticas que contemplen la vulnerabilidad de los ríos de la región.

Una de las principales herramientas que pueden emplearse es el análisis hipsométrico de cuencas. Planteado originalmente por Langbain (1947) como una "forma de expresar la pendiente de una cuenca a través de sus altitudes medias", el concepto permaneció sin relativas modificaciones ni nuevos usos luego del aporte decisivo de Strahler (1952). Este último sentó las bases del análisis hipsométrico al describir que el área debajo de la curva hipsométrica, llamada *integral hipsométrica (IH)*, era en sí mucho más explicativa de las características de una cuenca que la forma de la curva. Strahler (1952) definía el análisis hipsométrico como "el estudio de la distribución de las áreas de terreno de una región según su altitud", de modo tal que no sólo lo trabajaba en términos absolutos

como Langbain (1947), sino que además introducía el concepto de curva hipsométrica porcentual, es decir, una cuyas unidades se hallan expresadas en términos relativos. Ello le permitió desarrollar un modelo a partir del cual calcular la integral hipsométrica, y luego, desarrollar una clasificación de las mismas según su valor, denotando su estado evolutivo. Así, las cuencas se clasifican en: inmaduras, en equilibrio y seniles, con valores de integral mayores a 0,6, entre 0,6 y 0,35, y menores a 0,35, respectivamente. Conociendo el estado evolutivo de una cuenca se pueden inferir algunas características básicas de su comportamiento (tendencia a las inundaciones, dinámica de caudales, etc.) pero más importante aún, se puede establecer la semejanza hidrodinámica entre diferentes cuencas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Áreas de estudio

Se trabajó sobre todas las cuencas de la pampa húmeda que descargan sus aguas al río Paraná, desde el Río Saladillo hasta el Río Lujan, y luego con el Río Reconquista y el Matanza Riachuelo que desaguan en el Río de la Plata (Figura 2). Las diferentes cuencas fueron determinadas empleando el software BASINS 4.1 (USEPA, 2015) e imágenes SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*; Farr *et al.*, 2007) provistas por el USGS (United States Geological Survey).

### Modelos de Análisis Morfológico

Para este trabajo se emplearon modelos digitales de elevación DEM-SRTM, a partir de cuyo análisis se han generado las curvas hipsométricas de cada cuenca (Strahler, 1952; Böhner, 2006). Para ello se utilizó el software SAGA GIS 2.1 (Böhner *et al.*, 2006; Harlin, 1978; Luo, 2000; Conrad, 2005; Etzrodt, 2002; Sarpa *et al.*, 2011), a partir del cual se obtuvieron los puntos de relación relativa "altura vs área". Luego se ajustaron los datos por mínimos cuadrados al modelo de Stralher (1952), ecuación 1:

$$y = \left[ \frac{r}{1-r} \right]^z \cdot \left[ \frac{1}{\{(1-r) \cdot R\} + r} - 1 \right]^z \quad (1)$$

Donde  $y$  es la altura relativa (altura en el punto  $i$  dividida la altura máxima),  $R$  es el área relativa,  $r$  y  $z$  son parámetros de ajuste. La integral hipsométrica se determinó luego a partir del método de Strahler (1952).

**Análisis estadístico**

Se emplearon los software InfoStat (v. 2013a) y Statgraphics XVI para desarrollar

la estadística descriptiva (media y desvío estándar) necesaria para cuantificar las variables bajo estudio, y para el análisis de las regresiones por mínimos cuadrados.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La Figura 2 muestra las curvas hipsométricas de las cuencas analizadas, previa determinación de la altimetría de la región y de los contornos de las cuencas (Figura 3).

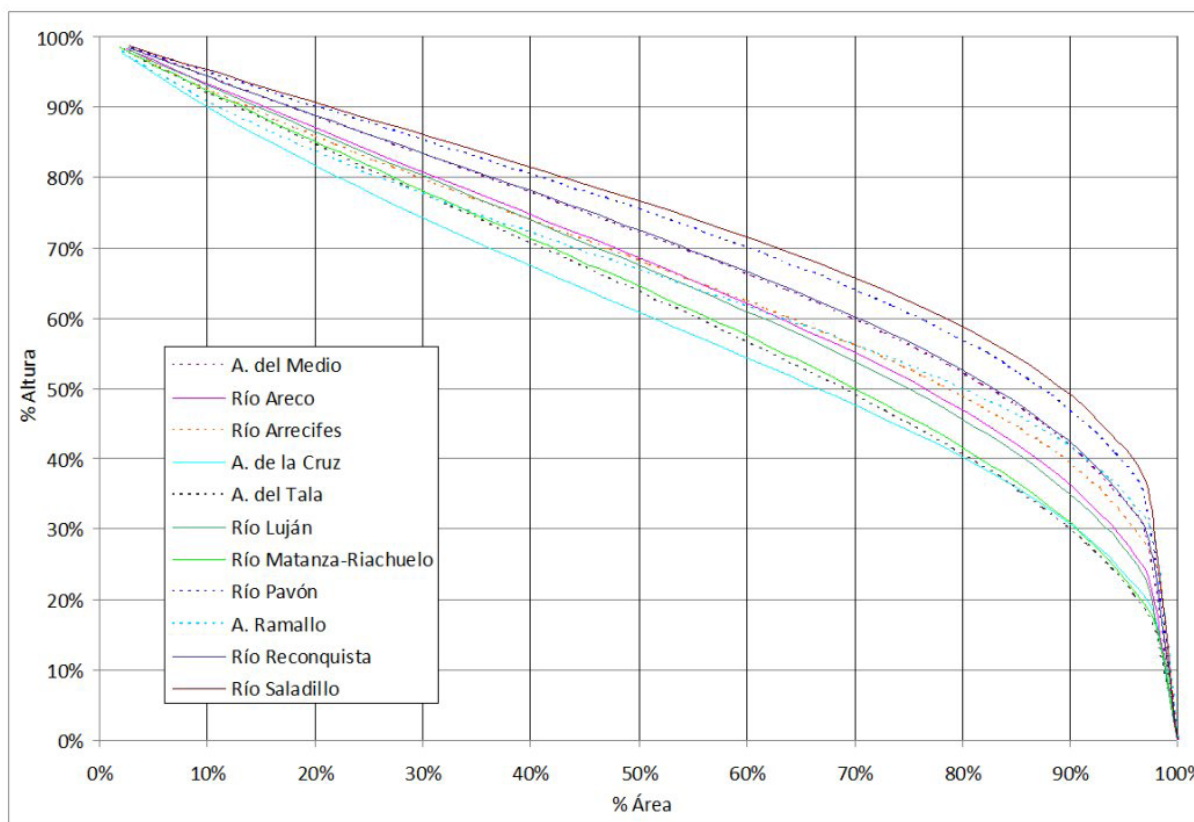
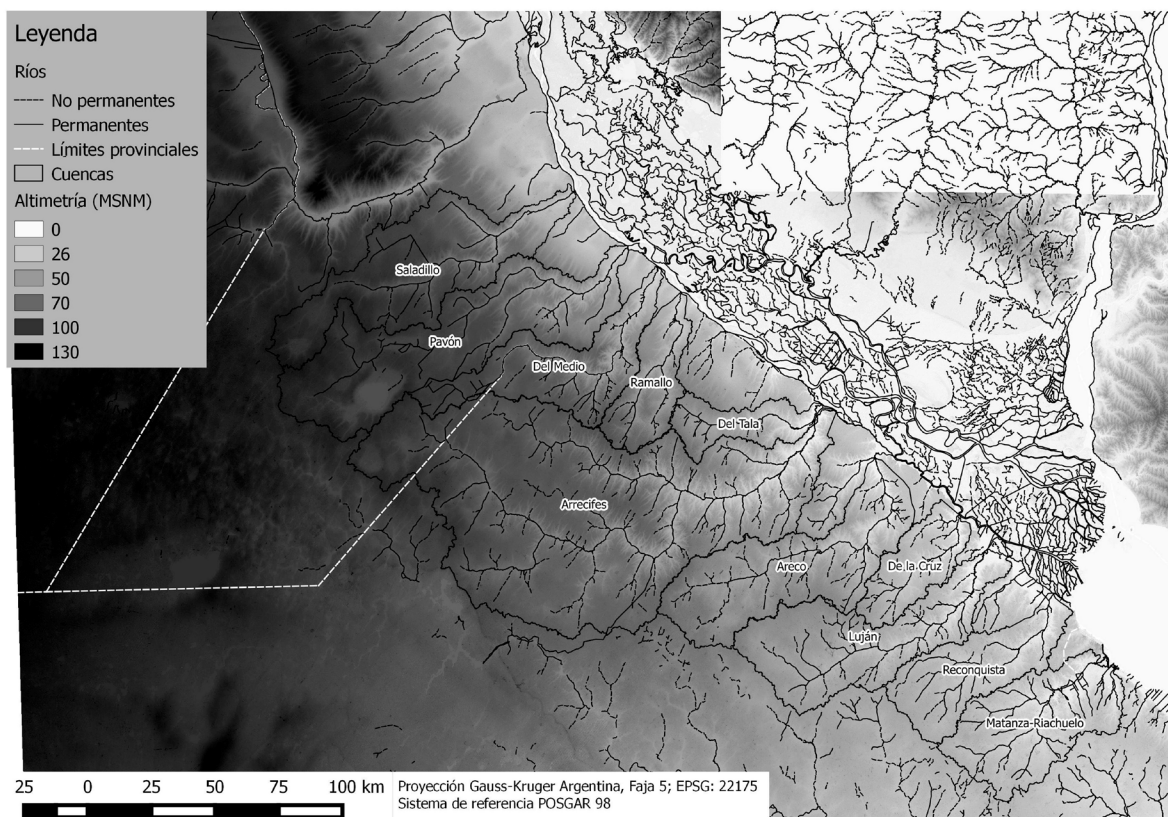


Figura2. Curvas hipsométricas determinadas para los ríos y arroyos seleccionados.

Figure 2. Hypsometric curves for selected rivers and other water streams



**Figura 3.** Mapa altimétrico del noreste de la pampa ondulada, donde se detallan las cuencas analizadas según su hipsometría. Datos altimétricos brindados por el USGS, a través de su portal Earth View.

**Figure 3.** Altitudinal Map from NE of rolling Pampas. Hypsometrically analyzed watersheds are indicated. Altitudinal data were obtained from the USGS’ Earth View web site.

Analizando los valores obtenidos para la confección de las curvas hipsométricas (Figura 2), fue posible ajustar un nuevo modelo para las mismas (ecuación 2), el cual presenta una integral prácticamente idéntica ( $p$ -valor $<0,01$ ) para este tipo de cuencas.

$$y = 1 - b \cdot R^c \quad (2)$$

Donde  $b$  y  $c$  son factores de ajuste. En todos los casos los valores del coeficiente  $R^2$  fueron mayores a 0.94. Los valores de la  $IH$  obtenidos mediante este modelo de curva se lograron por integración de la misma, ecuaciones 3 y 4:

$$\int_0^1 1 - b \cdot R^c \, dR = IH \quad (3)$$

$$1 - \frac{b}{c+1} = IH \quad (4)$$

De esta forma se obtuvo un modelo que, al menos para las cuencas de estadios de inequilibrio, representa una alternativa al complejo modelo de Stralher, permitiendo un cálculo eficiente y preciso (ecuación 4). Como puede observarse en la tabla 1, la dispersión de los valores de la integral hipsométrica en torno a la media es mínima, siendo esta estadísticamente significativa tanto para el modelo propuesto como para la metodología

de Strahler (prueba T,  $\alpha=0.05$ ). Además, el rango comprendido entre el límite inferior (0.64) y el límite superior (0.70), con un 95% de confianza, se halla íntegramente dentro de la misma categoría de evolución

geomorfológica: estado de Inequilibrio o Juventud (Strahler, 1952); esto se condice con lo hallado por Racca (2010) para el Arroyo del Medio.

Cuenca	IH según Strahler	IH según modelo propuesto	Posición ordinal N-S*	Superficie Km <sup>2</sup>
Saladillo	0.70	0.752	1	3214.3
Pavón	0.72	0.731	2	4022.7
A. del Medio	0.70	0.701	3	1794.9
Ramallo	0.65	0.661	4	1140.4
Del Tala	0.60	0.619	5	811.7
Arrecifes y tributarios	0.65	0.668	6	10246.8
Areco	0.64	0.671	7	3330.5
De la Cruz	0.60	0.603	8	1122.0
Luján	0.67	0.660	9	2846.8
Reconquista	0.70	0.698	10	1911.9
Matanza-Riachuelo	0.63	0.624	11	2326.5
Promedio	0.66 ± 0.04	0.671 ± 0.046		

\* La posición ordinal está definida de norte a sur según la posición de las cuencas bajo estudio (ver figura 3).

**Tabla 1.** Hipsometría de las cuencas analizadas, en términos relativos, a partir de los valores de la integral hipsométrica de cada cuenca.

**Table 1.** Hypsometric parameters of analysed watersheds in relative terms obtained from the integral hypsometric of each basin

A partir del análisis realizado de las curvas hipsométricas, se pudo apreciar una gran semejanza en los valores obtenidos para la IH. Esto permite establecer una gran similitud en lo relativo a las características hidráulicas de las cuencas relevadas, situándose todas por su valor dentro de la categoría de *inequilibrio* (Strahler, 1952). A su vez, esta gran similitud podría estar relacionada con la corta edad de estas cuencas (formadas luego del último período glacial) y con el clima. Con respecto a este último factor, la distribución homogénea

de lluvias dentro de la región, sumado a la presencia de los mismos estratos geológicos en toda la zona, llevan a procesos erosivos de tendencia y magnitud muy similares. La conjunción de todos estos factores puede ser la causa última de la gran similitud de las cuencas de la región.

Esta similitud presenta una ventaja muy importante para futuros estudios hidrológicos de la región. Los ríos que se hallan fuera de la provincia de Buenos Aires (Pavón y Saladillo en la provincia de Santa Fe, y Arroyo del

Medio, justo en el límite entre las provincias de Buenos Aires y Santa Fe) cuentan en todos los casos con al menos una estación de aforo con 15 años de datos. El análisis de los mismos podría permitir extrapolar resultados sobre sus características hidráulicas (tiempo de concentración, hidrograma unitario, entre otros.), contribuyendo al conocimiento hidrológico de la región. Con dicha información podrá estimarse la vulnerabilidad de los cuerpos de agua y de esa forma se podrán confeccionar planes de manejo para las fuentes de contaminación hídrica en la región, en especial las AFOs.

Asimismo, la clasificación de todas las cuencas en un estado geomorfológico de inequilibrio tiene una importancia muy significativa para futuros procesos de ordenamiento territorial. Ello es así, pues la condición previamente mencionada implica que en el relieve existe una gran cantidad de energía potencial (siguiendo el ciclo de Davis), que conlleva un severo riesgo para las poblaciones cercanas a los cursos de agua; pudiendo verse afectadas fácilmente por procesos de inundación altamente destructivos, incluso bajo ciclos de recurrencia altamente esporádicos. Será entonces de crucial importancia que se tome como punto principal de partida a la hora de ordenar el territorio en la región de pampa ondulada las características hidrológicas del terreno, y que el horizonte temporal considerado sea lo mas amplio posible según los datos disponibles.

## CONCLUSIONES

Mediante el uso de imágenes SRTM se ha podido realizar un relevamiento de las cuencas de la pampa ondulada. A través de software específico se ha logrado graficar su contorno, y a partir de ello se ha elaborado un mapa altimétrico de la región incluyendo las mismas y los cauces de los ríos que por ellas discurren. Se ha establecido su estado evolutivo como de inequilibrio, indicando ello el riesgo de erosión hídrica que presenta la región. Luego, además de calcular las funciones de las curvas hipsométricas y sus integrales, se ha podido establecer un modelo matemático simplificado que permite el cálculo preciso y rápido de la IH. Finalmente, se ha establecido la similitud en el comportamiento hidrológico de todas las cuencas estudiadas, y se han sentado las bases para que futuros estudios amplíen este análisis, tanto a nivel de territorio relevado, como en la obtención de parámetros tipificadores de cuencas (tiempo de concentración, retraso *-lag-*, compacidad, entre otros), que permitan el desarrollo de estudios de vulnerabilidad. La similitud intercuenca aquí establecida permitirá además extrapolar ensayos y determinaciones puntuales en la región, favoreciendo así a los futuros procesos de ordenamiento del territorio y de desarrollo de las AFOs bajo sistemas de buenas prácticas que contemplen su impacto sobre los cuerpos de agua superficiales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bilenca D & Miñarro F. 2004. *Identificación de Áreas Valiosas de Pastizal (AVP) en las Pampas y Campos de Argentina, Uruguay y sur de Brasil*. Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires: 323 p.
- Böhner J, McCloy KR & Strobl J (Eds) . 2006. SAGA – Analysis and Modelling Applications. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, 115: 130 p.
- Bortolozzi E (Compilador). 2012. Red Hidrológica Nacional. Publicaciones Hidrometeorológicas 2011. 1ra ed. Secretaría de Obras Públicas. Subsecretaría de Recursos Hídricos, Buenos Aires. Versión digital en CDROM.
- Conrad O. 2005. Digitale Reliefanalyse in der multimedialen Lehre. *Arbeitsberichte des Geographischen Instituts der Humboldt-Universität zu Berlin*, Bd. 109: S.37-47
- Etzrodt N, Zimmermann R & Conrad O. 2002. Upscaling Water Cycle Parameters Using Geomorphometric Terrain Parameters and Topographic Indices Derived from Interferometric DEM. P 251-254 En: Wilson A(Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*, 11-14 September, 2001, Sheffield, UK
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S & Seal D. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). 1-33
- García A R, Fleite SN, Vázquez Pugliese D & De Iorio A F. 2013. Feedlots and Pollution. A Growing Threat to Water Resources of Agro-Production Zone in Argentina. *Environmental Science & Technology*, 47(21): 11932-11933
- Harlin JM. 1978. Statistical moments of the hypsometric curve and its density function. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 10: 59-72
- Langbein WB. 1947. Topographic characteristics of drainage basins. United States Geological Survey, *Water Supply Paper* 96 C: 125-157
- Luo W. 2000. Quantifying groundwater-sapping landforms with a hypsometric technique. *J. of Geophysical Research*, 105 (E1): 1685-1694
- Luo W & Harlin JM. 2003. A theoretical travel time based on watershed hypsometry. *J. American Water Resources Association*, 39: 785-792, doi:10.1111/j.1752-1688.2003.tb04405.x.

- Marani M, Eltahir E & Rinaldo A. 2001. Geomorphic controls on regional base flow. *Water Resources Research*, 37(10): 2619-2630
- Moglen G E & Bras R L. 1995. The effect of spatial heterogeneities on geomorphic expression in a model of basin evolution. *Water Resources Research*, 31(10): 2613-2623
- Ohmori H. 1993. Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation. *Geomorphology*, 8(4): 263-277  
●Racca JMG. 2010. Geomorfología de la Cuenca del Arroyo del Medio. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología* (Rosario) 72-75: 13-42. ISSN 1666-115X
- Sarpa G, Toprak V & Duzgun S. 2011. Hypsometric properties of the hydraulic basins located on western part of Nafz. *34th International Symposium on Remote Sensing of Environment: The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring*. Sydney, Australia. 10-15 April 2011: 4 p.
- Strahler A N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. *Geological Society of America Bulletin*, 63 (11): 1117-1142
- USEPA. 2015. BASINS 4.1 (Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources) Modeling Framework. National Exposure Research Laboratory, RTP, North Carolina. <http://www.epa.gov/exposure-assessment-models/basins>.
- Vivoni E R, Di Benedetto F, Grimaldi S & Eltahir E A. 2008. Hypsometric control on surface and subsurface runoff. *Water Resources Research*, 44 (12). 9 p. doi:10.1029/2008WR006931
- Willgoose G & Hancock G. 1998. Revisiting the hypsometric curve as an indicator of form and process in transport-limited catchment, *Earth Surface. Processes Landforms*, 23: 611-623