

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PATRONES DE CAUCE EN ABANICOS ALUVIALES CHAQUEÑOS

**E. D. Cafaro<sup>(1)</sup>, E. M. Latrubesse<sup>(2)</sup>, C. G. Ramonell<sup>(1)</sup> y M. D. Montagnini<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Universidad Nacional del litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fe, Argentina

& <sup>(2)</sup>University of Texas at Austin, Department of Geography and the Environment, Austin, EEUU.

Ruta Nacional N° 168 – km 472,4 (3000) Santa Fe. Tel: (54) (0342) 4575234 – Int. 132.

E-mail: egacafaro@yahoo.com.ar, latrubesse@yahoo.com.br, cgramonell@yahoo.com.ar y danielamontagnini@yahoo.com.ar

### RESUMEN

El Chaco es una gran cuenca de antepaís que ha sido sedimentada, durante el Cuaternario, por los ríos que drenan el sistema Andino, formando abanicos aluviales de diversos tamaños (desde mega-estructuras hasta abanicos de modestas dimensiones). Actualmente todos estos ríos poseen similar hidrología y sedimentología; más aún, las características geomorfológicas demuestran que, independientemente de las dimensiones estos ríos, los patrones de cauce son semejantes y varían siguiendo el sentido del escurrimiento; en la zona proximal de los abanicos son entrelazados, cambiando luego a una mixtura meandriforme–entrelazada, y finalmente a un meandriforme tortuoso. Esta distribución espacial de patrones tiene como consecuencia un aumento de la potencia específica, siendo una manera de los ríos del Chaco de encontrar un estado de equilibrio para conducir los caudales líquidos y sólidos que les son impuestos. Finalmente, pareciera posible que en algún momento de la historia geológica de estos sistemas el régimen hidrológico fue distinto al actual, con caudales líquidos más importantes, posibilitando a los ríos tener energía suficiente como para transportar sedimentos a mayores distancias.

### ABSTRACT

The Chaco Plain, 840,000 sq km in area, is a foreland basin of the Andean mountain ranges. Main rivers of the Chaco built giant alluvial fans during the Quaternary. Small fans generated by minor rivers with headwaters in the Andes, were built on the plain, in between the megafan apices. Both, large and small rivers, have similar hydrology and sedimentology; moreover, the geomorphic characteristics in both river types resemble that of fractal objects: channel patterns change downstream in a repetitive sequence from braided to wandering, and finally to tortuous meandering and narrowest channel. It is possible that the alluvial fans were formed in hydrologic conditions with larger discharges than the present ones. At present, the dissected surfaces of the fans are a main factor that controls the arrangement of the channel pattern changes: a portion of the sediment transported during floods would not arrive to non-incised areas of the fans, being stored on the river beds, promoting the meander development into the wandering reaches during low water stages.

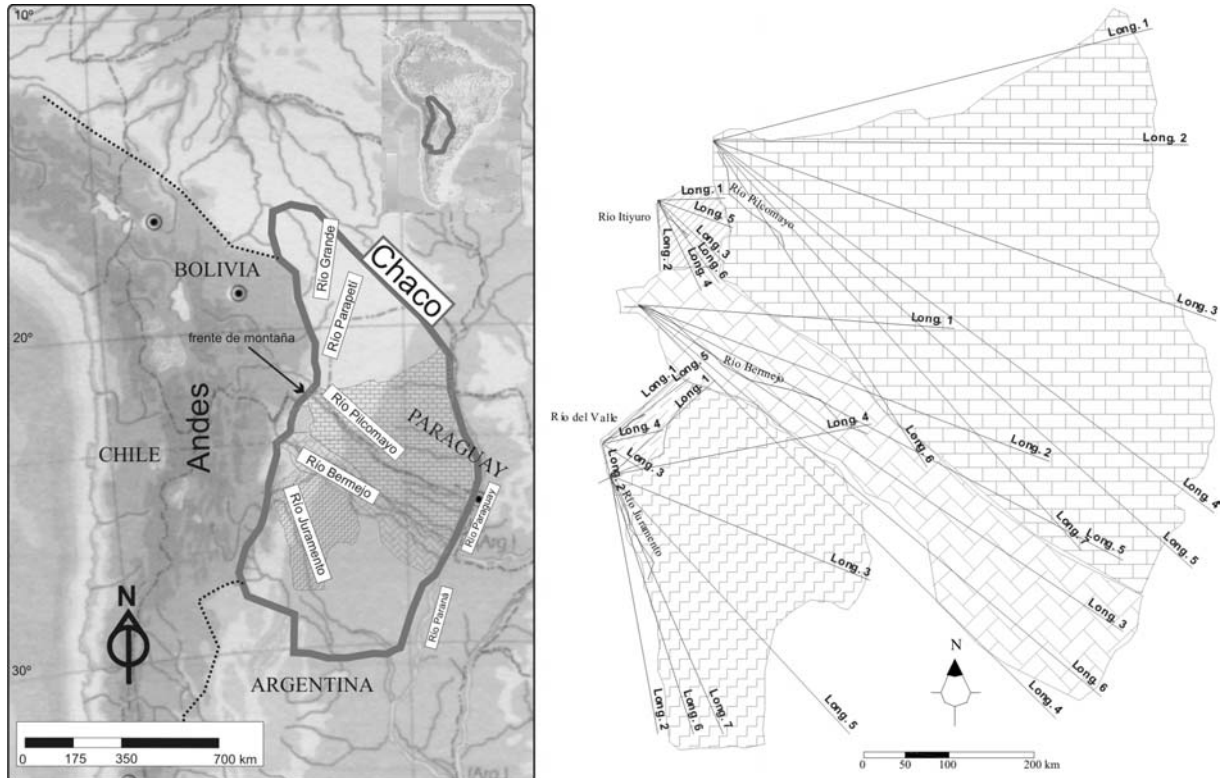
### INTRODUCCIÓN

El Chaco es una gran cuenca sedimentaria que posee 840.000 km<sup>2</sup> de superficie, limitando en su borde occidental con la Cordillera de los Andes en una longitud de cerca 1.200 km (Figura 1). Los ríos que drenan el sistema andino atraviesan ambientes desde sus nacientes con características geológicas e hidrológicas disímiles, dando una respuesta geomorfológica común sobre la región del Chaco, de abanicos aluviales de diversos tamaños.

Los mayores responsables de la sedimentación de ese ambiente son cinco ríos, de N a S: Grande, Parapetí, Pilcomayo, Bermejo y Juramento, distribuidos casi uniformemente en toda su longitud formando mega-abanicos aluviales, siendo el más grande el río Pilcomayo, con 610 km de radio y una extensión de 720 km en su base, y un área de 220.000 km<sup>2</sup> (Iriondo, 1993). Intercalados entre ellos existen ríos menores que ocupan y retrabajan fajas aluviales

antiguas de los grandes ríos, y que hasta incluso han formado abanicos de modestas dimensiones.

El objetivo de este trabajo es comprender la dinámica actual de estos ríos a nivel regional, basado en el análisis de algunas variables relevantes, tales como las dimensiones de los cauces, pendientes longitudinales y patrones de cauce, y a su vez vincularlas con dimensiones y características geomorfológicas de sus abanicos aluviales.



**Figura 1.-** Ubicación geográfica de la región del Chaco (línea continua) y de la zona de análisis (área sombreada, de aproximadamente 400.000 km<sup>2</sup> de superficie).

## METODOLOGÍA

El trabajo está basado en el análisis y tratamiento de imágenes satelitales (SRTM, Landsat 5 y CBERS2) sobre el conjunto de los mega-abanicos aluviales correspondientes a los ríos Pilcomayo, Bermejo y Juramento, y los abanicos de los ríos Itiyuro y del Valle (Figura 1), con control expeditivo de campo.

La carencia de cartografía topográfica obligó a trabajar con modelos digitales de terreno utilizando el software de procesamiento cartográfico ENVI 4.3 y las imágenes satélite SRTM. Sobre estas bases se trazaron perfiles longitudinales en cada abanico, describiendo una trayectoria radial desde los ápices, y perfiles transversales en un entorno de varios kilómetros respecto a cada una de las trazas de los ríos analizados (Figura 1).

La información cartográfica fue digitalizada y georreferenciada bajo el sistema de coordenadas UTM en zona 20 por medio de un software cartográfico de serie CAD. Sobre ella se tipificó y delimitó la variación de patrones de cauce siguiendo la clasificación

propuesta por Schumm (1977, 2005), y realizando un análisis geomorfológico general del área por medio de interpretación de imágenes satélite, información antecedente y trabajos de campos propios.

Además se evaluaron distintos parámetros morfológicos de los abanicos aluviales, tales como áreas en planta, radios y longitudes de sus bases, así como de los cauces formadores (en este caso, pendiente y ancho medio, y sinuosidad del eje del cauce), vinculandolós a la hidrología histórica del sistema mediante el historial de estaciones de aforo ubicadas en el piedemonte proximal, como se presenta a continuación.

## HIDRODOLOGÍA

Tal como se muestra en Tabla 1, los caudales medios anuales varían desde  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $412 \text{ m}^3/\text{s}$ . La relación entre la dispersión de los caudales medios mensuales y el medio histórico (i.e., el coeficiente de variabilidad, Cv) fluctúa en torno a 1, indicando similar efecto de intensidad y variabilidad de caudales.

Se puede apreciar en Tabla 1 que no existe una relación lineal directa entre los caudales medios anuales y el tamaño de las cuencas hidrográficas: una mayor superficie de cuenca no garantiza mayores caudales.

**Tabla 1.-** Parámetros estadísticos de las series de datos con caudales medios mensuales de ríos del Noroeste Argentino con información hidrológica.

Río	Estación de aforo	Periodo	Área cuenca hidrológica (km <sup>2</sup> )	Q <sub>medio anual</sub> (m <sup>3</sup> /s)	$\sigma$	Cv	Q <sub>ma DIC-ABR</sub> (*)	Q <sub>ma MAY-NOV</sub> (**)	Relación (*) y (**)
							(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	
Pilcomayo	La Paz	1941 - 2003	96.000	203,9	216,66	1,06	415,5	53,0	7,8
Itiyuro	Puente Carretero	1942 - 1961	850	3,26	3,26	1,00	6,6	0,9	7,5
Bermejo	Pozo Sarmiento	1940 - 2003	25.000	355,8	365,83	1,03	717,7	103,1	7,0
San Francisco	El Caimancito	1946 - 2003	25.800	103,5	108,29	1,05	202,7	34,1	5,9
Dorado	Apolinario Saravia	1951 - 1967	1.400	4,21	5,68	1,35	9,6	1,4	6,7
Del Valle	EL Ceibal	1966 - 1986	995	7,09	5,67	0,80	12,5	3,6	3,5
Juramento	El Tunal	1941 - 1986	38.000	41,97	32,12	0,77	70,9	22,0	3,2
Horcones	Toma de Ovando	1948 - 1967	2.400	3,92	3,76	0,96	7,4	1,5	4,8
Urueña <sup>(1)</sup>	7 de Abril	1948 - 1956	900	0,23	0,28	1,22	0,5	0,2	3,1

Referencia:

$\sigma$ : desvío estandar

Cv: coeficiente de variación; cociente entre  $s$  y  $Q_{ma}$

$Q_{m \text{ DIC-ABR}}^{(*)}$ : caudal medio entre los meses de diciembre a abril

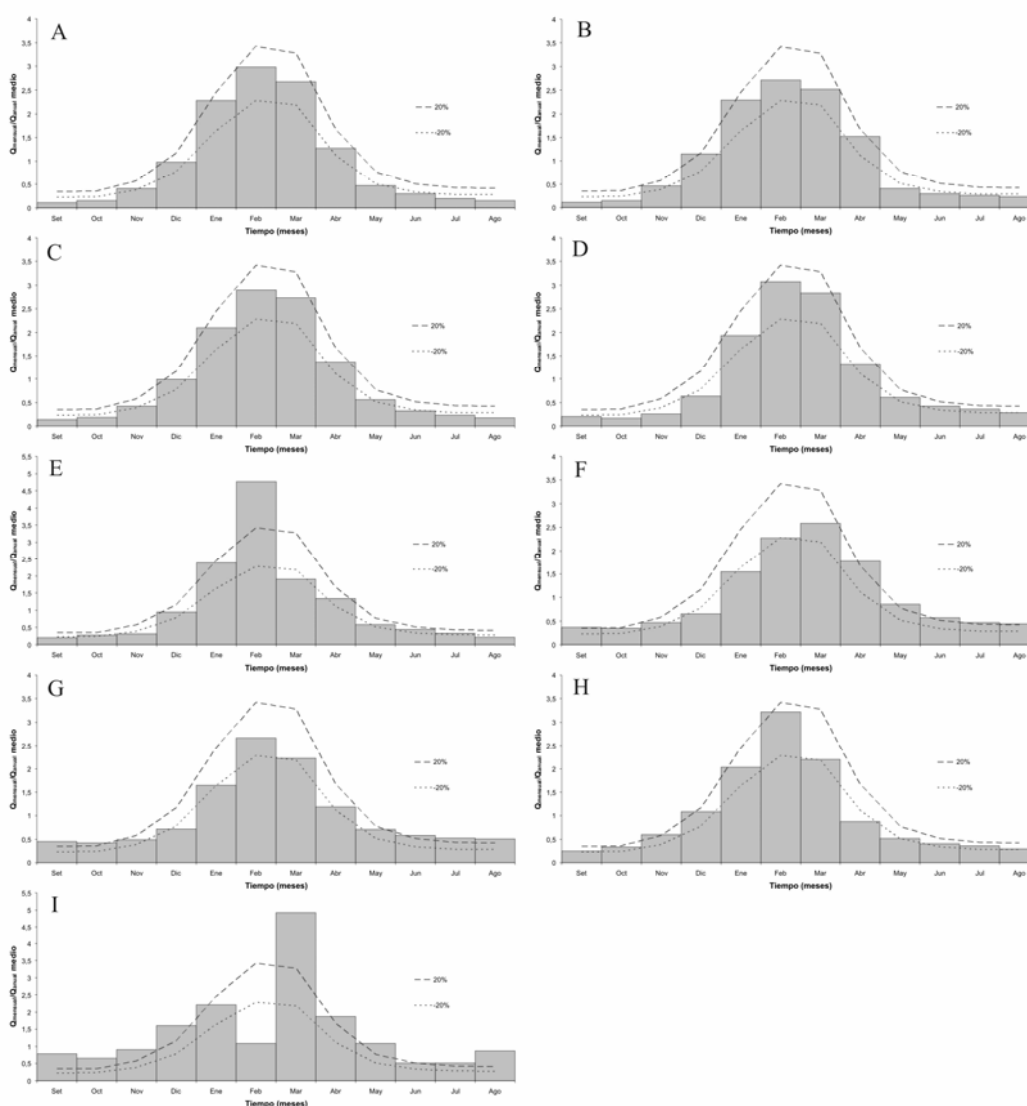
$Q_{m \text{ MAY-NOV}}^{(**)}$ : caudal medio entre los meses de mayo a noviembre

Comparando todos los ríos, la relación entre los caudales en los meses de crecida respecto a los meses de estiaje es, en términos medios, de 5,5 (Tabla 1). Sin embargo existe una clara diferencia de esta relación entre los ríos que están al norte del El Dorado con un valor de 7, y los que se encuentran hacia el sur con un valor de 3,4.

A los fines de poder comparar la distribución temporal de caudales se normalizaron los hidrogramas mensuales haciendo el cociente entre los caudales medios de cada mes respecto al módulo ( $Q_{mensual}/Q_{anual \text{ medio}}$ ), agregando una banda de  $\pm 20\%$  del valor medio de todos los hidrogramas normalizados. De esa manera se obtuvieron los gráficos de la Figura 2, en la que los ríos están ordenados geográficamente de norte a sur.

En esos gráficos se vé que los caudales picos se concentran en los meses de diciembre a abril fluctuando dentro de la banda de  $\pm 20\%$  con un valor medio de 2,75.

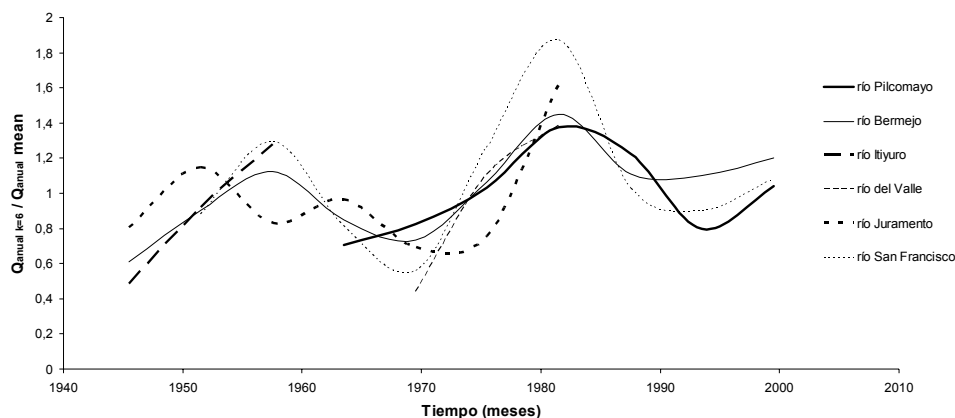
Se advierte en la forma de los hidrogramas normalizados una diferencia en la distribución de caudales a lo largo del año, siendo que los ríos al norte del río El Dorado presentan un patrón de distribución más homogéneo. Esto está vinculado a las características físicas de la cuenca, en principio densidad y patrón de drenaje, condicionados por el estilo tectónico diferente que presenta la cordillera de los Andes en la zona.



**Figura 2.-** Caudales medios mensuales normalizados en relación al caudal medio anual ( $Q_{\text{mensual}}/Q_{\text{anual medio}}$ ); A:

Pilcomayo, B: Itiyuro, C: Bermejo, D: San Francisco, E: Dorado, F: del Valle, G: Juramento, H: Horcones y I: Uruëña.

En Figura 3 se graficó el cociente entre el valor de las medias móviles o cronológicas para subperíodos de 6 años y el caudal módulo de cada estación respecto al tiempo. Allí se puede observar que en las décadas de los 50 y 60 existe un comportamiento temporal opuesto entre los ríos que están al norte del río El Dorado y los que se encuentran hacia el sur.



**Figura 3.-** Variación temporal de las relaciones entre las medias cronológicas ( $Q_{ma\ k=6}$ ) y los módulos ( $Q_{ma}$ ) de cada río.

Del comparativo de los hidrogramas medios mensuales normalizados (Figura 2), sumado a los estadísticos y al gráfico de las medias móviles o cronológicas (Figura 3), se desprende que la variación cíclica del módulo se ha centrado fundamentalmente en los meses de diciembre a abril.

### CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LOS RÍOS

El paisaje asociado a este ambiente de mega-abanicos y abanicos aluviales menores con ápices ubicados en el piedemonte de Sierras Subandinas, es uno de paleocauces con diseño distributivo desde los mismos ápices, generados por estos ríos a distintos niveles de sus lechos actuales, originando así una topografía irregular en sentido N-S de pocos metros de desnivel.

El patrón de cauce en los cauces varía según el sentido del escurrimiento: por lo general en la zona proximal de los abanicos son entrelazados, cambiando luego a meandriiformes. El cambio está acompañado por la reducción del ancho de los cauces y no es abrupto, sino que existe un tramo de transición de longitud variada, donde el patrón es una mixtura de cauce meandriiforme con bancos centrales (i.e., wandering, sensu Schumm, 2005).

En general, el material sedimentario que compone los cauces son arenas, las cuales representan la minoría de la carga sedimentaria, ya que lo más importante son limos y arcillas.

Dado que los cauces actuales no alcanzan las partes distales de sus abanicos, la morfología típica que generan en tales zonas son derrames, seguidos de lagunas y pantanos alargados que ocupan fajas aluviales antiguas abandonadas.

Es conocido que la distribución de pendientes en los abanicos es una variable importante en la dinámica de los cauces: los cambios de pendiente hacen que los ríos deban reajustar algunos de sus parámetros morfológicos en relación a las variables de entrada que les son impuestas (Bull, 1968).

Así, en la primera reducción de pendiente de los ríos analizados, que se encuentra en promedio a 1/3 de sus longitudes medidas desde los ápices, se pierde hacia aguas abajo el

encajamiento que poseen en tales tramos (Figura 4). Se interpreta que en el sitio de variación de pendiente ocurre un cambio cualitativo de proceso geomorfológico, donde la sedimentación en el lecho se vuelve dominante. El río Juramento es el único que no seguiría este patrón.

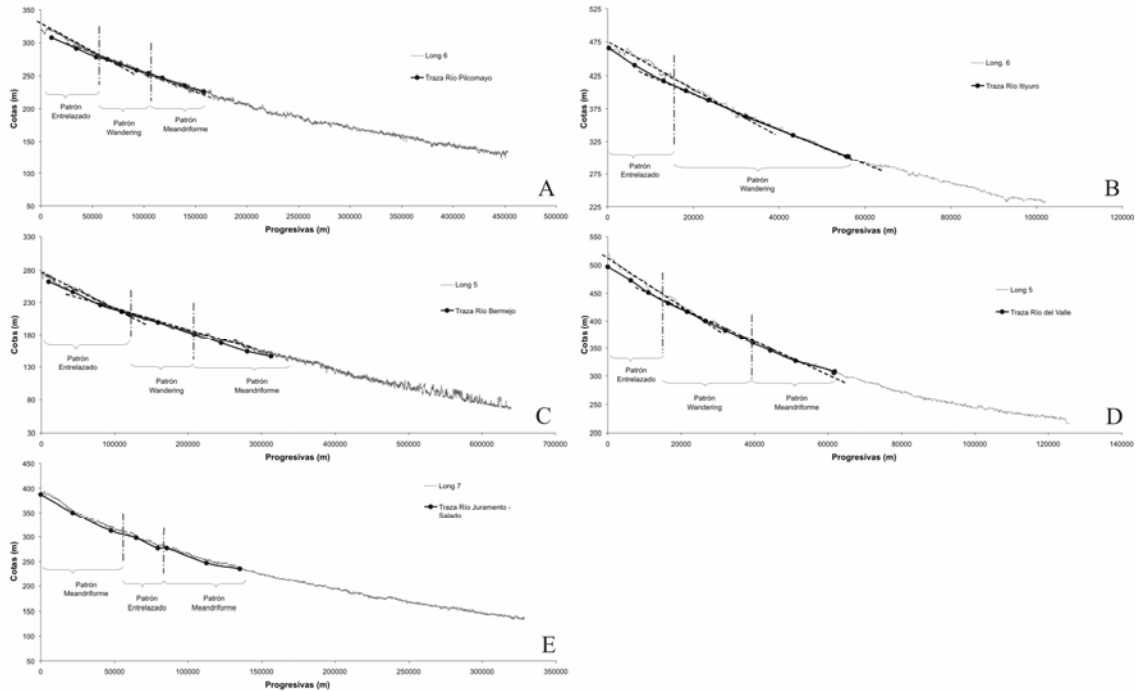


Figura 4.- Comparativo entre los perfiles longitudinales del abanico aluvial y del río Juramento.

La expresión morfológica de la pérdida de encajamiento se manifiesta con un cambio de patrón de cauce y una reducción del ancho medio: en los sectores encajados el patrón es entrelazado, y a medida que el encajamiento disminuye se pasa a un tramo wandering para finalizar en meandriforme, además más angosto como se aprecia en Tabla 2. En este sentido, el comportamiento detectado en los cauces estaría de acuerdo con lo expresado por Schumm para ríos en desequilibrio que tienen la característica de tener la mayor parte de su carga sedimentaria en suspensión (Schumm, 1977: 156).

En Tabla 2 se consignan también las variaciones de las potencias específicas medias de los cauces siguiendo los cambios de pendiente. Estos valores se obtuvieron utilizando los caudales medios anuales de Tabla 1, asumiendo que los caudales morfológicos poseen valores entre éstos y los de crecida pero nunca inferiores. La expresión tradicional del cálculo de la potencia específica es:

$$\omega = \frac{W}{B} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot S}{B} \tag{1}$$

Donde:

W: potencia de la corriente.

$\gamma$ : es el peso específico del fluido.

Q: caudal medio anual.

B: ancho medio.

S: pendiente de energía

Por continuidad y reemplazando en (1):

$$\omega = \gamma \cdot h \cdot S \cdot v = \tau_o \cdot v \quad (2)$$

Donde:

h: tirante medio.

v: velocidad media de la corriente.

$\tau_o$ : tensión de corte.

Lo que sugiere que el cambio de la potencia específica resulta en una variación directa de las tensiones de corte, la velocidad media o de ambos parámetros. En otras palabras, y basados en el enfoque energético para el estado de equilibrio dinámico de Chang (1988), el cambio espacial de dimensiones sería una manera que tienen los ríos del Chaco de buscar un estado de equilibrio para conducir los caudales líquidos y sólidos frente a las condiciones regionales dadas en cada tramo de diferente patrón de cauce.

**Tabla 2.** - Parámetros morfológicos e hidráulicos de los ríos medidos del Chaco.

Río	S <sub>cauce</sub> (m/m)	Ancho medio (m)	Patrón de cauce	Sinuosidad (eje del cauce)	Potencia específica	Potencia de la corriente
Pilcomayo	0,00057	1.440	Entrelazado	1,04	0,081	116
	0,00052	640	Wandering	1,51	0,166	106
	0,00044	320	Meandiforme	1,71	0,282	90
Itiyuro	0,00388	410	Entrelazado	1,35	0,030	12
	0,00270	320	Wandering	1,37	0,027	9
Bermejo	0,00049	1.980	Entrelazado	1,09	0,115	227
	0,00037	770	Wandering	1,57	0,220	170
	0,00034	410	Meandiforme	1,57	0,381	156
del Valle	0,00387	260	Entrelazado	1,10	0,103	27
	0,00359	200	Wandering	1,30	0,130	26
	0,00247	140	Meandiforme	1,56	0,123	17
Juramento	0,00176	90	Meandiforme	1,54	0,837	75
	0,00112	150	Entrelazado	1,19	0,304	46
	0,00101	70	Meandiforme	1,96	0,641	45

Referencias:

S<sub>cauce</sub>: pendiente media del cauce

## CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LOS ABANICOS ALUVIALES

Las dimensiones de los abanicos aluviales seleccionados se presentan en Tabla 3, donde figuran sus áreas en planta, radios medios, longitudes de las bases o frentes de avance, y el coeficiente C, que correlaciona la superficie del abanico con el tamaño del área de drenaje.

De acuerdo a Bull (1968) el coeficiente C varía entre 0,15 y 2,1, a causa de variables tales como la litología de la cuenca de drenaje, el clima, la historia tectónica y la suma del espacio en el cual los abanicos puedan desarrollarse.

**Tabla 3.** - Parámetros morfológicos medidos de los abanicos aluviales

Río	Área cuenca hidrológica (km <sup>2</sup> )	Área del abanico (km <sup>2</sup> )	Radio (km)	Base (km)	C
Pilcomayo	96.000	223.000	609	721	2,32
Itiyuro	850	6.282	84	158	7,39
Bermejo	50.800	76.010	709	145	1,50
Del Valle	995	5.336	78	176	5,36
Juramento	38.000	63.036	293	717	1,66

Referencias:

C: para su cálculo se trabajó en unidades inglesas y con un valor 1 para el exponente.

En el caso de los abanicos chaqueños, se puede observar que en los de área menor los valores de C son superiores a los expuestos en la bibliografía, mientras que en los mega-abanicos están cercanos al límite superior del rango obtenido por Bull (1964).

Esto podría deberse a dos razones: el tipo de material sedimentario que aporta la cuenca de drenaje (Bull, 1964), y la forma en que la historia tectónica afecta a los ríos que formaron los abanicos pequeños, dándoles una pendiente mayor que la de aquellos que formaron los mega-abanicos (Hooke, 1965; Denny, 1965).

Otro aspecto relevante en este estudio es que las dimensiones de los paleocauces en todos los abanicos analizados son mayores que las de los ríos actuales: estos ocupan, en promedio, el 50 % de los radios de los abanicos aluviales (Tabla 4).

**Tabla 4.-** Relación entre la longitud de los cauces respecto a los radios medios de los abanicos.

Río	L <sub>cauce</sub> (km)	L <sub>cauce</sub> /Radio
Pilcomayo	148	0,24
Itiyuro	46	0,55
Bermejo	709	1,00
Del Valle	49	0,63
Juramento	82	0,28

Referencias:

L<sub>cauce</sub>: longitud de los cauces.

\*: El río Bermejo es el único río que ocupa el total del radio.

A su vez, los perfiles longitudinales delineados sobre las trazas de los cauces (Figura 1) revelan que, fuera de las zonas proximales, sus superficies están sobre-elevadas entre pocos a varios metros de desnivel, respecto al resto del área ocupada por cada abanico. Esto podría sugerir que en algún momento de la historia geológica reciente de estos ríos, el régimen hidrológico fue distinto al actual, con caudales líquidos más importantes, y con energía suficiente como para transportar sedimentos a mayores distancias.

## CONCLUSIONES

Los ríos del Chaco argentino se estarían comportando en términos morfológicos de manera similar, con cambios de patrón de cauce que respondería a la posición de cada uno dentro del marco de pendiente de los abanicos aluviales en los que se encuentran.



Esos ríos tendrían como principales variables morfológicas de ajuste la reducción del ancho con un promedio de 30%, el aumento de la sinuosidad en un 20% y tal vez la profundidad, en respuesta a las reducciones de la pendiente que les proporcionan los abanicos aluviales, que es del 19% en promedio.

Esos cambios redundan en un aumento de la potencia específica de los ríos analizados, siendo la manera que encontrarían sus cauces para conducir los caudales líquidos y sólidos que les son impuestos.

En otra perspectiva, es de destacar con relación al análisis geomorfológico regional, que pareciera posible que en algún momento de la historia geológica de todo este sistema el régimen hidrológico fue distinto al actual, con caudales líquidos más importantes, posibilitando a los ríos tener energía suficiente como para transportar sedimentos a mayores distancias.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está enmarcado en dos proyectos de investigación el de la “Zonificación morfológica e hidrosedimentológica de los cauces fluviales del territorio argentino”, financiado desde la UNL, y el de “Desarrollo de metodologías para el diseño hidráulico de estructuras viales” (SECyT – Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica), se encuadra también, en la Beca de Postgrado CONICET que posee uno de los autores (EDC).

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Bull, W. B., 1964.** “Geomorphology of segment aluvial fans in western fresno County, California”. *U. S. Geol. Surv. Profess. Paper 352-E*, 89-129.

**Bull, W. B., 1968.** “Alluvial fans and cones”. *The encyclopedia of geomorphology Vol III. Reinhold Book Corporation.*

**Chang, H. H. (1988).** “Fluvial Processes in River Engineering”. J. Wiley and Sons, New York, USA.

**Denny, C. S., 1965.** “Aluvial fans in the Death Valley region, California and Nevada”. *U. S. Geol. Surv. Profess. Paper 466*, 62pp.

**Hooke, R. LeB., 1965.** “Aluvial fans”. *Ph.D. thesis, California Institute of Thecnology, Pasadena, 192pp.*

**Iriondo, M.1993.** “Geomorphology and late Quaternary of the Chaco (South America)”. *Geomorphology 7: 289-303.*

**Schumm, S.A. 1977.** “The fluvial system. J. Wiley & Sons”. *New York, USA. 338 p.*

**Schumm, S.A. 2005.** “River variability and complexity”. *New York, USA. 197 p.*