

AVULSIÓN Y RECTIFICACIÓN DE MEANDROS: CONSIDERACIONES PARA SU PREDICCIÓN

Carlos G. Ramonell y Mario L. Amsler

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral (FICH, UNL)

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

CC 217 (3000) Santa Fe, Argentina

E-mail: ramonell@fich1.unl.edu.ar, mamsler@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN

Para que una migración por avulsión o rectificación de meandro por desborde ocurra, es necesario que el escurrimiento fluvial se canalice por una nueva traza, sea preexistente (captura de un canal ya establecido) o de nueva formación (labrado de un cauce). A pesar de la validez general del enunciado previo, actualmente se carece de herramientas para predecir *dónde* un cambio “brusco” de la ubicación del cauce tendrá lugar en el tiempo, a partir de datos asequibles en estudios aplicados ordinarios. Aquí se presenta un conjunto de casos que cubren situaciones muy diferentes en planicies aluviales de bajo gradiente, en los que se identifican geoformas (y asociaciones de geoformas) que crean escenarios adecuados para esos cambios. Una condición común en los casos que se exponen es que la construcción de tales escenarios es lenta, y las morfologías asociadas podrían ser determinadas con suficiente antelación, incluso de decenas de años. Así, los fenómenos de avulsión y rectificación de ondas pueden ser anticipados mediante observaciones simples y de bajo costo en el entorno y el lecho de ríos.

ABSTRACT

Channel shifts by avulsion or meander chute cut-off occur when the streamflow is channelized along a new path, which exists previously (capture by a pre-established channel) or is being built (chute development). Despite of the previous statement validity, there are not simple tools to predict, with current data from applied studies, *where* a “sudden” change in the channel location will take place in the future. This paper presents case studies covering different situations in flat floodplains, where forms (and morphological associations) are identified showing adequate patterns that prompt to non-continuous channel shifts. Common conditions observed in the studied prototypes are the slow rate of suitable patterns development, and the “key” forms could be determined in advance. In this way, channel avulsion and cut-offs could be anticipated through simple and non-expensive observations along the channel and its surrounding environment.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de rectificación de meandros (en sus dos variedades: por estrangulamiento o tangencia, y por desborde) constituyen, junto a los de avulsión de tramos de cauce, los tres modos de migración lateral no-continua que pueden experimentar las corrientes aluviales (Schumm, 1977; Reineck & Singh, 1986; Fig. 1).

Los procesos y, sobre todo, las morfologías asociadas a sus desarrollos no son ignorados por los ingenieros fluviales, aunque la capacidad de anticiparlos ya en los primeros estadios de su evolución no es sencilla, con un grado de dificultad creciente según el orden en que fueron mencionados.

Lo anterior resulta de diversos factores, y a la complejidad intrínseca que puede presentar un prototipo dado se le suman no menos importantes “lagunas” en el conocimiento básico sobre esos fenómenos, que por lo común procede de síntesis originadas en la literatura de índole

geológica, tanto geomorfológica como estratigráfica. La influencia de estas disciplinas en la percepción de los procesos en cuestión se ve reflejada hasta en la definición más divulgada de uno de ellos, e.g. el de avulsión, referido tradicionalmente como *el abandono súbito de una parte o la totalidad del cauce que se instalará en otro sitio del valle*, y en la que el término en negrita involucra tiempos de varios años a más de un siglo, de acuerdo al reciente compendio de North (2002).

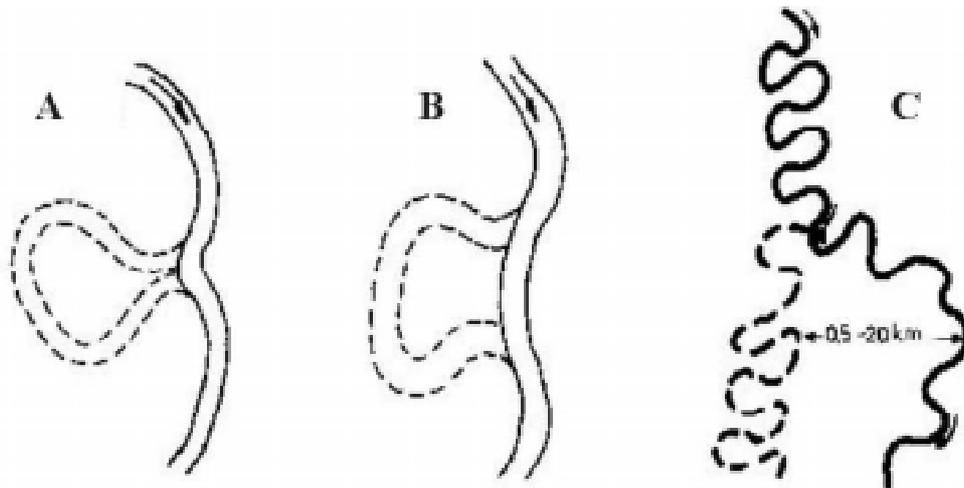


Figura 1.- Mecanismos de divagación no-continua de cauces aluviales (basado en Allen, 1965). A: rectificación de meandro por desborde; B: corte por estrangulamiento; C: avulsión (el rango de distancias incluido es de carácter orientativo de las magnitudes de deriva).

Si bien la temática comenzó a atenderse bajo un enfoque racional en los años '90 (Howard, 1996; Slingerland & Smith, 1998), todavía se carece de herramientas para predecir *dónde* un cambio “brusco” de la ubicación del cauce tendrá lugar en el tiempo, *a partir de datos aseguibles en estudios aplicados ordinarios*.

En este marco, aquí se expone parte de la experiencia de los autores en la materia, con la presentación de casos que cubren una amplia variedad de situaciones en planicies aluviales de bajo gradiente, y donde el énfasis es puesto en la observación cuidadosa de geoformas en el entorno y el lecho de los ríos. La contribución es continuidad del trabajo de Ramonell y Amsler (2002), en el que por razones editoriales de extensión el tema fue sucintamente tratado en cuatro (de los quince) tópicos de análisis propuestos.

PRESENTACIÓN DE CASOS

En Fig. 2 se da la ubicación de los cauces estudiados, que pertenecen a los sistemas fluviales del río Salado (del Norte) y del Paraná. De éste fueron considerados su cauce principal, un brazo secundario (río Colastiné) y una corriente marginal (río San Javier), cuya situación hidrológica y geomorfológica en el contexto del sistema fue sintetizada recientemente en Ramonell y otros (2000: 194-199), a cuya lectura se remite al lector interesado.

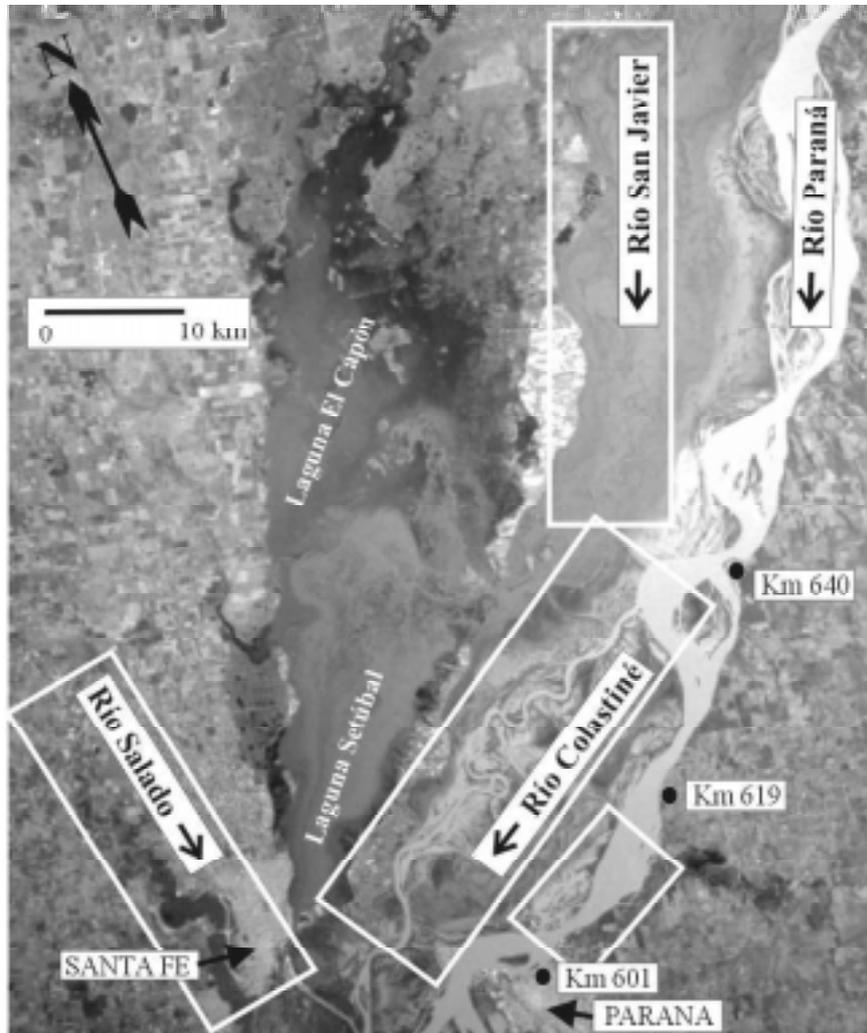


Figura 2.- Ubicación de los tramos de cauce analizados.

Algunas propiedades específicas de esos cauces en las zonas de interés se agrupan en Tabla 1.

Tabla 1.- Características básicas de los tramos de cauce analizados.

	Río Salado	Río Paraná	Río Colastiné	Río San Javier
Patrón de cauce	meandriforme irregular	entrelazado de thalweg sinuoso	meandriforme	anastomosado ⁽⁴⁾
B_c (m)	80	1600	350	100 - 300 ⁽⁵⁾
B_v (m)	1200	15000 ⁽³⁾	---	---
$Q_{mód}$ (m ³ /s) ⁽¹⁾	146	14100	1686	616
$Q_{máx}$ (m ³ /s) ⁽¹⁾	2672	39150	6846	6407
$Q_{máx} / Q_{mín}$ ⁽¹⁾	141	9	12	148
Q_{br} (m ³ /s) ⁽²⁾	200	17000	2000	700
I_c (cm/km)	8	2 - 5	2 - 4,5	---
I_v (cm/km)	18	9,4 - 5,6	11	7,1 - 5
Sedimento del lecho	arena fina - muy fina	arena media	arena media	arena media - cohesivo
Sedimento de margen	cohesivo	cohesivo - granular	granular	cohesivo

⁽¹⁾ Fuente: SRH (2000; la serie hidrológica del río Salado comprende el período 1953-2000, mientras que las de los ríos Paraná y Colastiné, el de 1904-2000; para el río San Javier se adoptó la serie 1913-2000 de la localidad de Helvecia, al norte del sector examinado).

⁽²⁾ Valores aproximados (estimados desde aforos, curvas de descarga e imágenes aéreas obtenidas en diferentes situaciones hidrométricas). Para el río San Javier, la cifra corresponde a la sección de Helvecia.

⁽³⁾ Comprende el ancho de la planicie influenciada por desbordes directos del cauce principal, más los producidos desde los ríos Colastiné y San Javier, v. Fig. 2.

⁽⁴⁾ Los canales individuales del sistema son meandriformes.

⁽⁵⁾ Rango de promedios del canal de 1er. orden del sistema anastomosado.

Río Salado. El río Salado posee un cauce meandriforme irregular, de ondas generalmente tortuosas y asimétricas. Su estabilidad en planta fue evaluada por los autores en FICH-INA (1998), en el marco de los estudios para la ubicación de una conexión vial a través del valle en un sector próximo a su desembocadura, aguas abajo de la autopista Santa Fe - Rosario (km 11 del cauce). Allí se estableció que la deriva del río por expansión y traslación de meandros era pequeña, con una tasa media de 0,7 m/año. Sin embargo, la identificación de meandros abandonados en diferentes estadios de colmatación aguas arriba del km 11 influyó para ampliar el análisis hasta el km 50, e incorporar un mapa de elementos y procesos geomorfológicos que aquí se reproduce como Fig. 3.

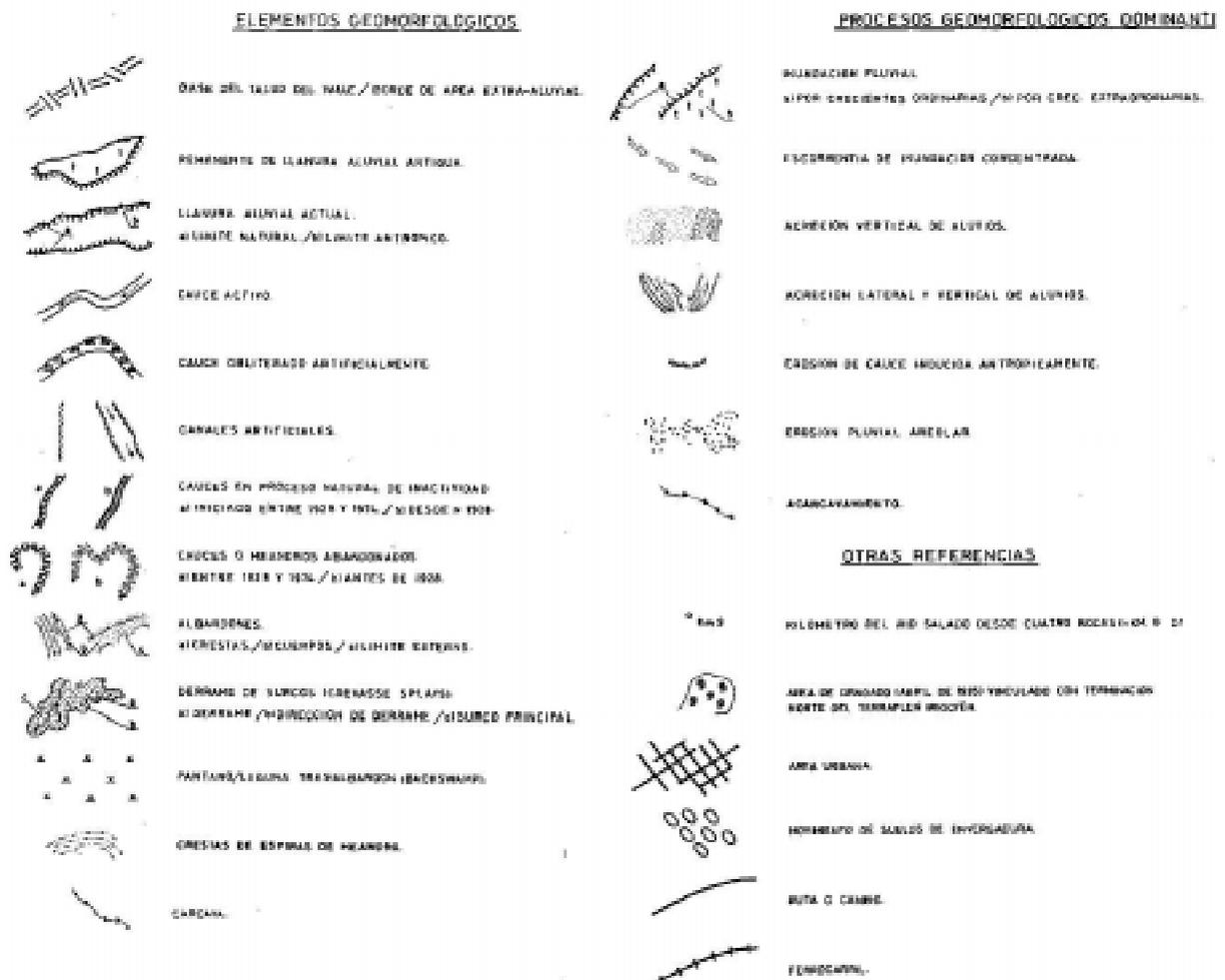


Figura 3.- Referencias del mapa geomorfológico (mapa en páginas siguientes).

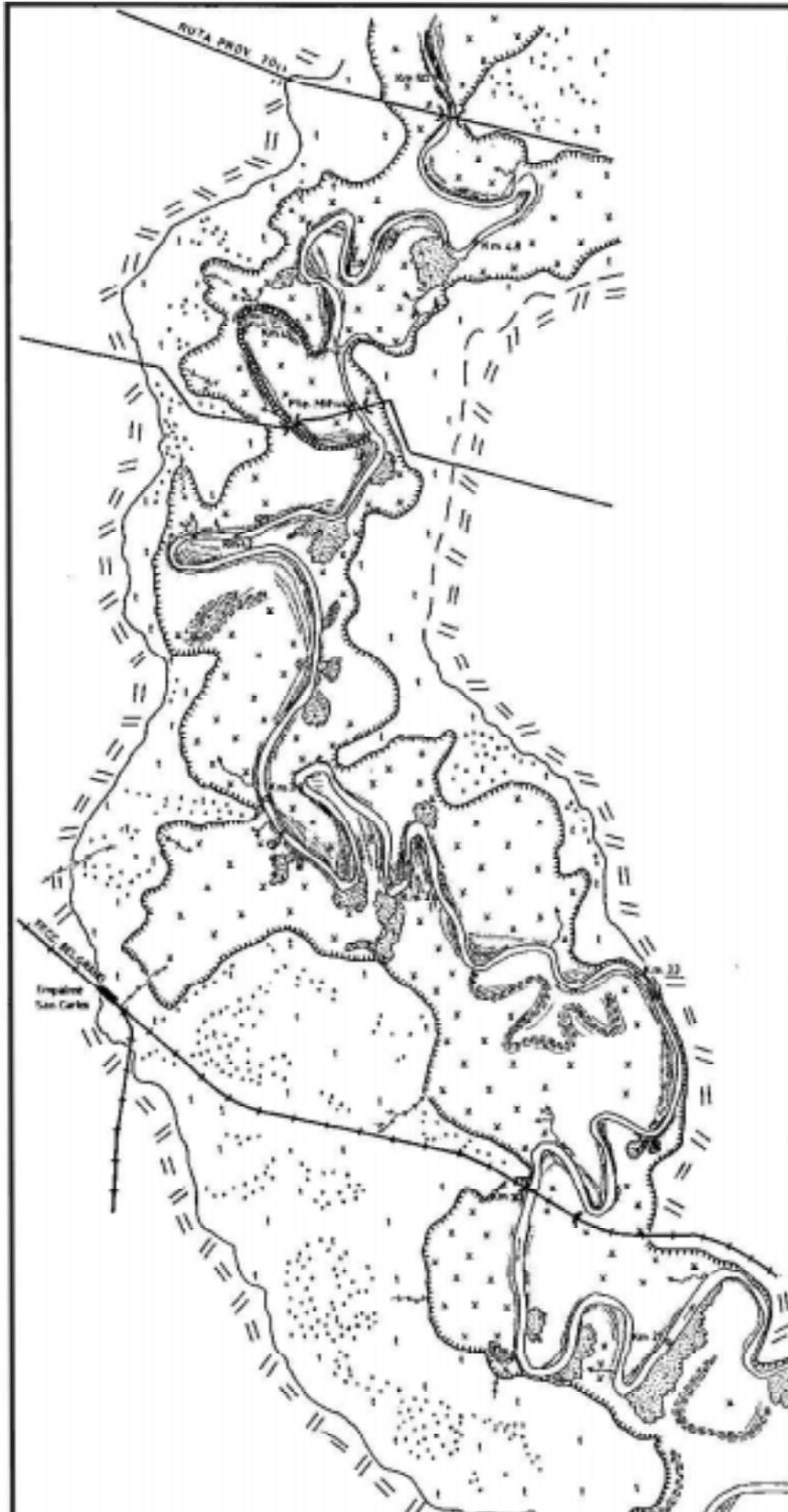


Figura 3.- Mapa de elementos y procesos geomorfológicos del río Salado entre rutas Provincial 70 y Nacional 11, Parte Norte (reproducido de FICH-INA, 1998). La base cartográfica del mapa fueron fotos aéreas escala 1:20.000 de octubre de 1974 - enero de 1975 (Q_{RP70} : $134 \text{ m}^3/\text{s}$ y $101 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente).

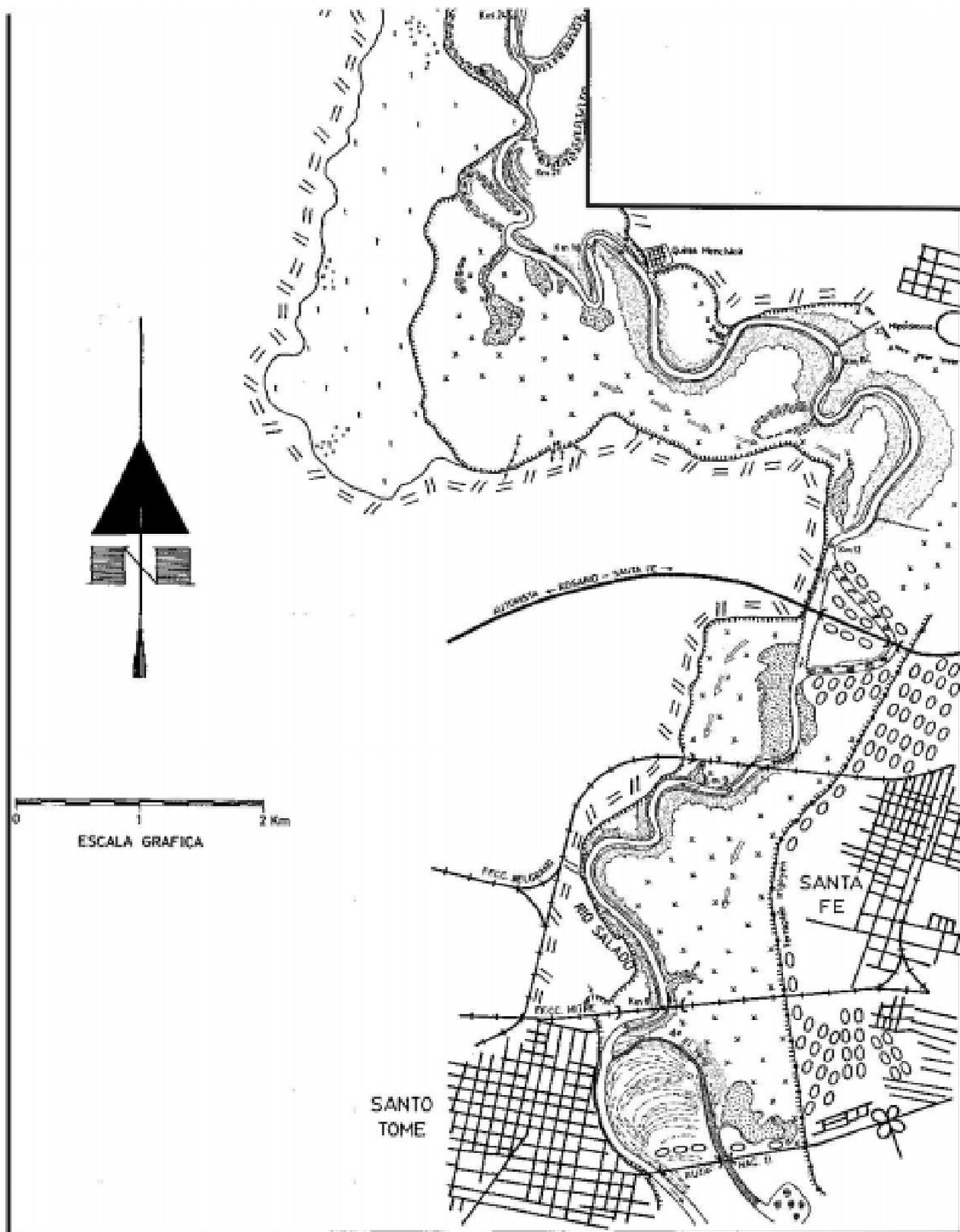


Figura 3.- (Continuación) Parte Sur del mapa.

El mapa de Fig. 3 fue elaborado en base a la interpretación de fotos aéreas escala 1:20.000 obtenidas en octubre de 1974, fundamentalmente, con el río Salado en situación de aguas

medias, encauzado. Estas imágenes eran los únicos registros disponibles cubriendo el área en su totalidad, además de un plano batimétrico del cauce relevado en 1928.

La fuente de Fig. 3 permitió dilucidar que cuatro de siete tramos del río fueron abandonados mediante avulsiones y rectificaciones por desborde (una de ellas ocurrida entre los años '20 y '70, a la altura del km 21, y las otras con anterioridad), siendo los demás casos de meandros estrangulados, antiguos (ca. km 40, 20 y 14). Al conjunto se le agregaba un sector de cauce en vías de abandono hacia 1974, aguas abajo de la Ruta Prov. 70 (km 45).

El mapa puso en relieve, además, que el cauce del Salado está flanqueado por albardones en toda su longitud, los que alcanzan desniveles de hasta 2,5 m respecto de la planicie afectada por las crecientes ordinarias del río (Fig. 4), determinando la existencia de pantanos trasalbardón que ocupan un 70 % de su superficie.

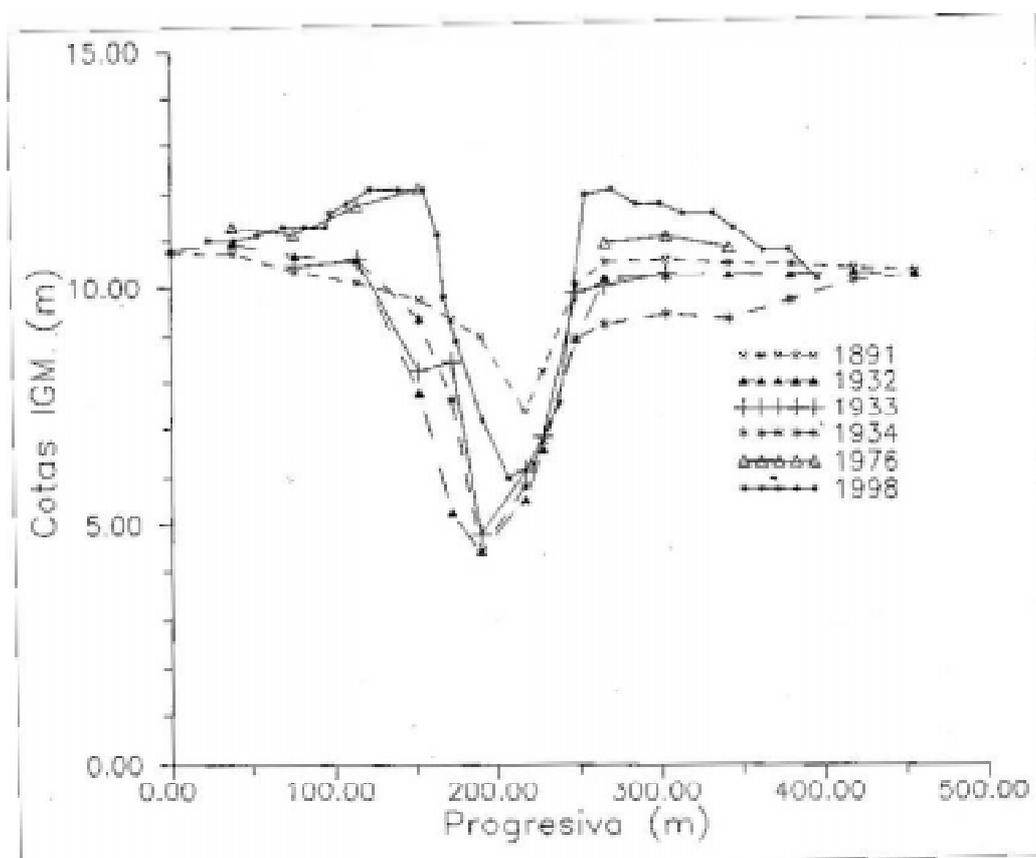


Figura 4.- Evolución de la sección transversal del río Salado coincidente con la traza del FFCC Mitre (km 6 del cauce, Fig. 3), en la que destacan los albardones construidos por el río luego de la década del '30, con una tasa de acreción vertical máxima media de 5 mm/año. (Fuente: FICH-INA, 1998).

Los albardones del Salado se hallan interrumpidos localmente por depósitos de derrame y surcos de desborde, estando los últimos mejor desarrollados en los sitios donde el cauce se aproxima a los bordes de la planicie de inundación ordinaria (Fig. 3).

La lectura del mapa bajo el principio de sustitución tiempo-espacio sirvió para sugerir un esquema de evolución para las avulsiones del río, en la forma que se comenta en la leyenda de Fig. 5.

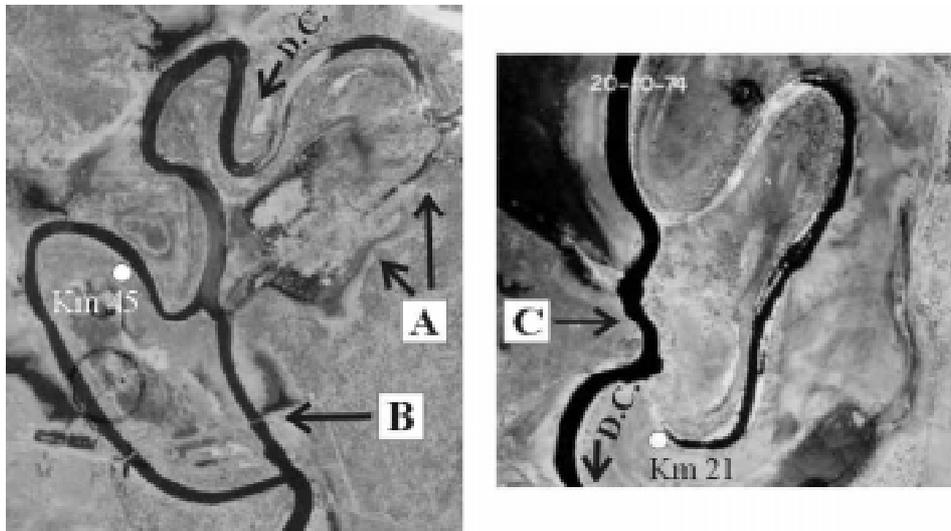


Figura 5.- Modelo conceptual propuesto en FICH-INA (1998) para la rectificación de trenes de meandro (avulsiones) del Salado (base: fotos aéreas de octubre de 1974; Q_{RP70} : $134 \text{ m}^3/\text{s}$). A, Fase Inicial: aparición de surcos de desborde con sentidos de flujo contrario en los límites de aguas arriba y abajo de un pantano tras-albardón, donde el cauce alcanza (sucesivamente) el borde de la planicie de inundación ordinaria. B, Fase Intermedia: jerarquización y vinculación morfológica de los surcos de desborde durante las crecidas, que los transforman en un nuevo tramo de cauce en el sitio, de mayor pendiente. C, Fase Final: obliteración por sedimentación de la traza de cauce original, consumación de la avulsión.

Así, de los quince aspectos individualizados en las “Conclusiones” del estudio de estabilidad morfológica, el primero de ellos enfatizó sobre la importancia de las inundaciones en los cambios en planta del cauce, indicando que el potencial de rectificaciones dependía del desarrollo hidrológico futuro, ya que las rutas de avulsión estaban, en diferente grado, establecidas. En igual sentido, el ítem incluyó una recomendación de evitar acciones antrópicas en las zonas de pantanos tras-albardón, tales como dragados y movimientos de suelos en general, que condujeran a una concentración localizada de la escorrentía de inundación, como la presentada en Fig. 6.

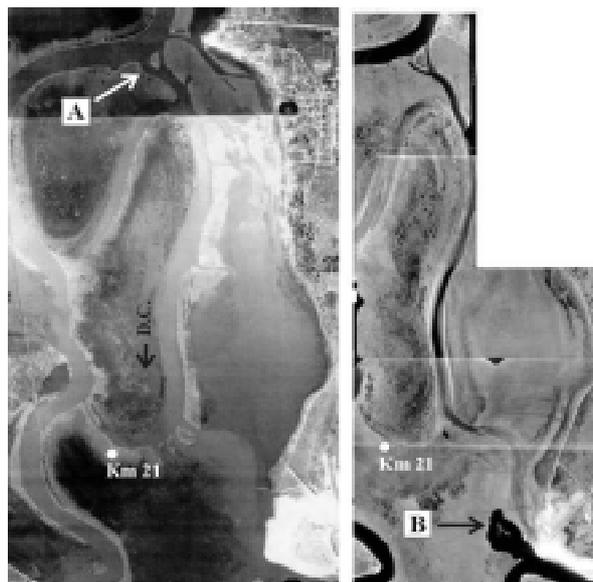


Figura 6.- Izquierda, A: aparición de surcos de desborde que conducen el flujo de inundación a través del tramo de cauce abandonado del km 21 (base: fotos aéreas de abril de 1995, Q_{RP70} : $138 \text{ m}^3/\text{s}$). Derecha, B: dragado del pantano tras-albardón del área, y construcción de “llamada” para el escurrimiento de desborde (base: fotos aéreas de julio de 1996, Q_{RP70} : $32 \text{ m}^3/\text{s}$; no disponibles en el estudio de FICH-INA).

Con relación a los anegamientos del valle, en Tabla 2 se ofrece una versión actualizada del análisis realizado en el trabajo original (en el que se asumió para el cauce una capacidad de conducción “constante” de $300 \text{ m}^3/\text{s}$), donde se insinúa, hacia la última década del siglo XX, el aumento en la frecuencia de desbordes vinculados a crecidas geomorfológicamente efectivas para el proceso que se trata (lamentablemente, existe un hiato de información para el lapso 1988-1992 y, así, la gran creciente de 1992 no fue medida).

Tabla 2.- Evolución de tiempos de funcionamiento de la planicie de inundación ordinaria del río Salado.

Período	Meses de valle anegado – (y % del período)	Meses con $Q_{\text{medio}} >$ $500 \text{ m}^3/\text{s}$	Meses con $Q_{\text{medio}} >$ $1000 \text{ m}^3/\text{s}$
1953-70	7 – (3,2)	0	0
1971-80	16 – (13,3)	4	3
1981-87	22 – (26,2)	2	0
1993-99	15 – (17,9)	7	2

Vinculado a lo anterior, la imagen aérea de Fig. 7 muestra el despliegue de avulsiones hacia el año 2000, donde cinco de los seis nuevos canales se ubican, total (4) o parcialmente (1), en los bordes de la planicie de inundación ordinaria. (La Fig. 8, por su parte, facilita la comparación con la situación del cauce registrada para 1974).



Figura 7.- Progreso de los fenómenos de avulsión del río Salado hacia el año 2000; las líneas de puntos blancos marcan los bordes de la planicie anegada por las crecidas ordinarias del río, y las flechas indican la ubicación de los nuevos canales fluviales (adviértase, además, el cegamiento de la embocadura del tramo de cauce del km 45, anticipada en el mapa de Fig. 3). (Base: imagen Landsat 7, banda 8, de diciembre de 2000; Q_{RP70} : $94 \text{ m}^3/\text{s}$).

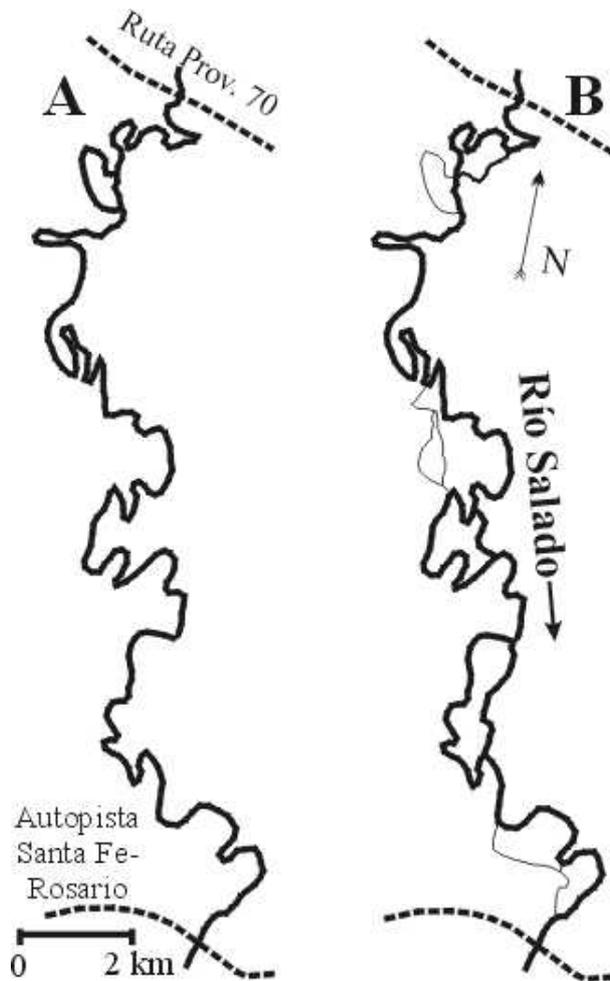


Figura 8.- Trazas del río Salado en 1974 (A) y 2000 (B). El grosor del trazo indica la importancia de los cauces en cada año.

Para finalizar la presentación del caso, es apropiado enfatizar acerca del tiempo incluido en el proceso completo de avulsión, desde la aparición y jerarquización de surcos de desborde, hasta el reemplazo (y obliteración) de la traza previa del cauce. Aquél sería del orden de los 40-50 años, de acuerdo al evento registrado en la zona del km 21 (Fig. 3). Una imagen en el mismo sentido surge de comparar el tramo “A” de Fig. 5 con su situación en el año 2000 (Figs. 7, 8), en la cual no se alcanzaron, aún, anchos de boca similares al tramo que suplantaría. El mayor progreso del fenómeno en la zona del km 30 no se contrapone a la sugerencia de que las avulsiones del Salado involucrarían períodos de más de una década para su culminación geomorfológica, aunque sus efectos nocivos con relación a eventuales obras de ingeniería estarían, naturalmente, anticipados.

Río Paraná (cauce principal). Este cauce es entrelazado de thalweg sinuoso, propenso a la formación de bancos y, a la vez, a la meandricación del thalweg, con corrimientos de margen evaluados en el orden de la decena a la centena de metros/año (Ramonell y otros, 2000; 2002).

En los trabajos de referencia se brinda una descripción detallada acerca de las divagaciones no-continuas de las ondas del thalweg, mediante rectificaciones que los autores clasificaron en dos categorías: cortes por desborde subaéreos (convencionales, i.e., tipo B de Fig. 1), y

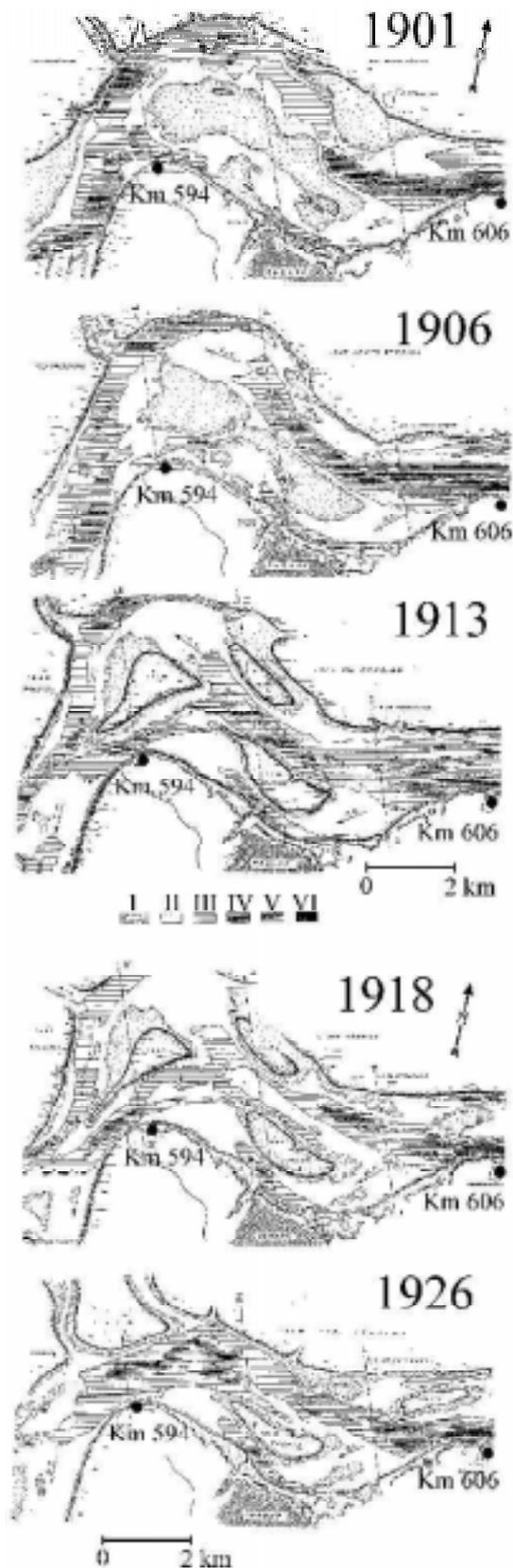


Figura 10.- Rectificación subacuática de la onda del thalweg frente a la ciudad de Paraná (desarrollada entre 1906 y 1913), y obliteración, por sedimentación, de la traza preexistente (1926 vs. 1918). I: bancos de arena (áreas del cauce por encima del 0 m de la escala hidrométrica local); II – VI: profundidades crecientes desde el 0 m del hidrómetro, cada 5 m (i.e., VI: profundidades mayores a 20 m por debajo del 0 m de la escala). (Reproducida de Prestien, 1971).

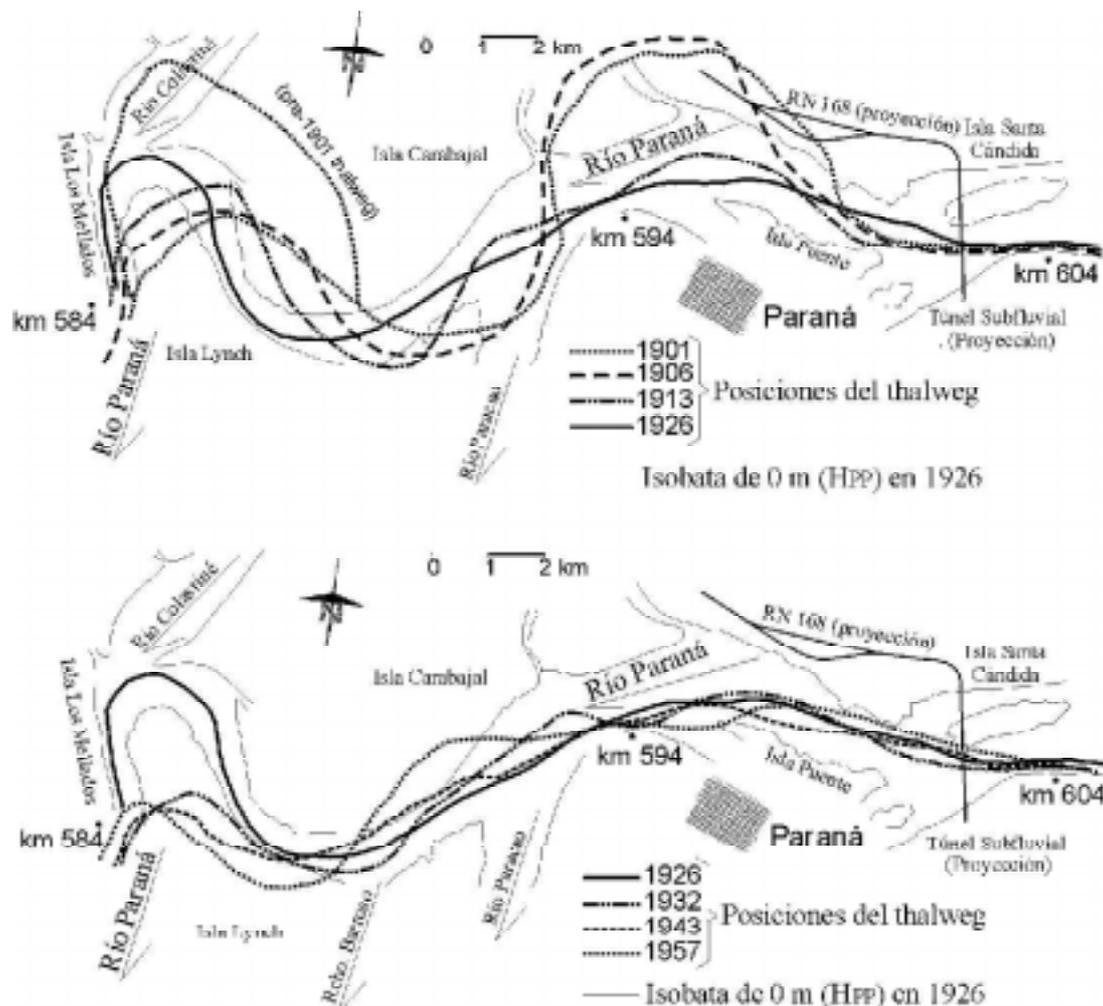


Figura 11.- Derivas del thalweg del Paraná entre los km 604 – 584 de la ruta de navegación fluvial, en el período 1901-1957. La longitud de la línea de navegación en el tramo disminuyó un 25 % entre 1901 y 1932, como consecuencia de las rectificaciones subaéreas y subacuáticas del thalweg. (Reproducida de Ramonell y otros, 2000).

Uno de los estudios aplicados que se realizaron en este cauce fue en la zona de emplazamiento del Túnel Subfluvial “Hernandarias” (km 603 de la ruta de navegación; FICH, 1997), en cuyo análisis de estabilidad morfológica se emplearon, entre otras, batimetrías de detalle (1:5.000) relevadas en ocho años del lapso 1905-1996, en el tramo entre km 616 y 602.

En el marco de tal análisis, se constató una deriva sostenida del thalweg hacia margen derecha aguas arriba del estrechamiento que precede al Túnel, con tasas medias de 63 m/año, iniciada entre 1960 y 1972 de acuerdo a la cartografía tratada. En ese registro, y en un sitio ocupado por un banco lateral hacia 1960, se advirtió la aparición de una depresión lineal en el lecho conectada al thalweg en el estrechamiento de aguas abajo, y extendida próxima a la margen izquierda hasta ca. del km 613, donde finalizaba con un talud “de cabecera” de 1:20 promedio.

La evolución de este surco de erosión subacuático, de profundidades superiores a la del thalweg en idénticas secciones, se midió en los registros posteriores, notándose un agrandamiento “hacia atrás” en 1996, año en el que las velocidades locales del flujo igualaban a las medidas en el thalweg. En Fig. 12 se ilustra sobre lo anterior, mientras que en Tabla 3 se reproducen valores de las transformaciones del surco en el lapso 1972-1996.

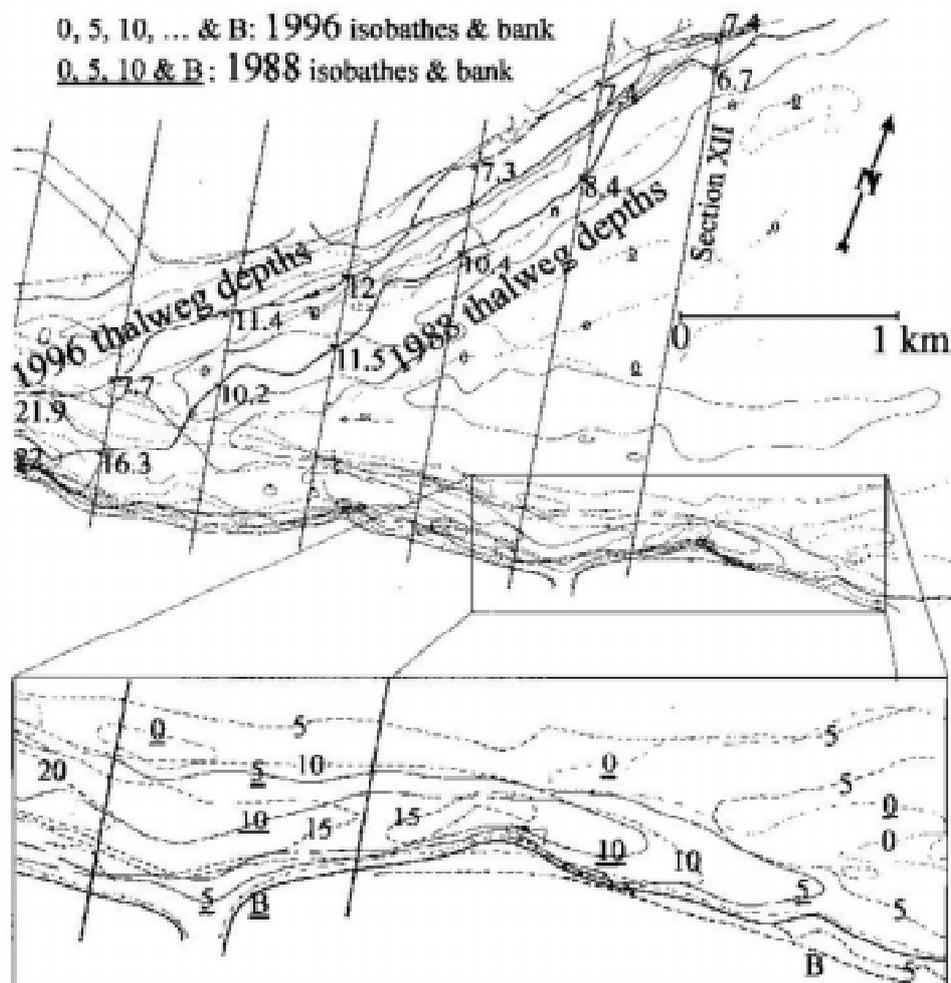


Figura 12.- Comparativo de batimetrías del cauce principal del Paraná aguas arriba del km 606, para los años 1988 y 1996 (el mapa se extiende entre los km 613 –derecha– y km 609 –izquierda–). El área del recuadro muestra el desarrollo del surco de erosión subacuático entre esos años. (Reproducida de Ramonell y otros, 2002).

Tabla 3.- Evolución del surco de erosión subacuático mostrado en Fig. 12, período 1960-1996. (Modificado de FICH, 1997).

Año	Ancho del surco definido por la isobata de -5 m (m)	Ancho del surco definido por la isobata de -10 m (m)	Longitud del surco ⁽¹⁾ definido por la isobata de -5 m (m)	Longitud del surco ⁽¹⁾ definido por la isobata de -10 m (m)	Profundidad máxima del surco (m)
1960 ⁽²⁾	no existe	no existe	no existe	no existe	no existe
1972	175	100	≈ 1500	≈ 1600	10 a 16
1988	175	100	950	575	10 a 15
1996	300	575	más de 2000	715	15 a 20

⁽¹⁾ Aguas arriba de la Sección XII en la Fig. 12.

⁽²⁾ En 1960 la zona estaba ocupada por un banco de arena lateral.

Como producto de esas observaciones, en el informe final del estudio se recomendó el monitoreo sistemático del área, ante la eventualidad de un cambio “súbito” de la ubicación del thalweg, lo que ocurrió al término de la crecida extraordinaria de 1998 (Fig. 13).

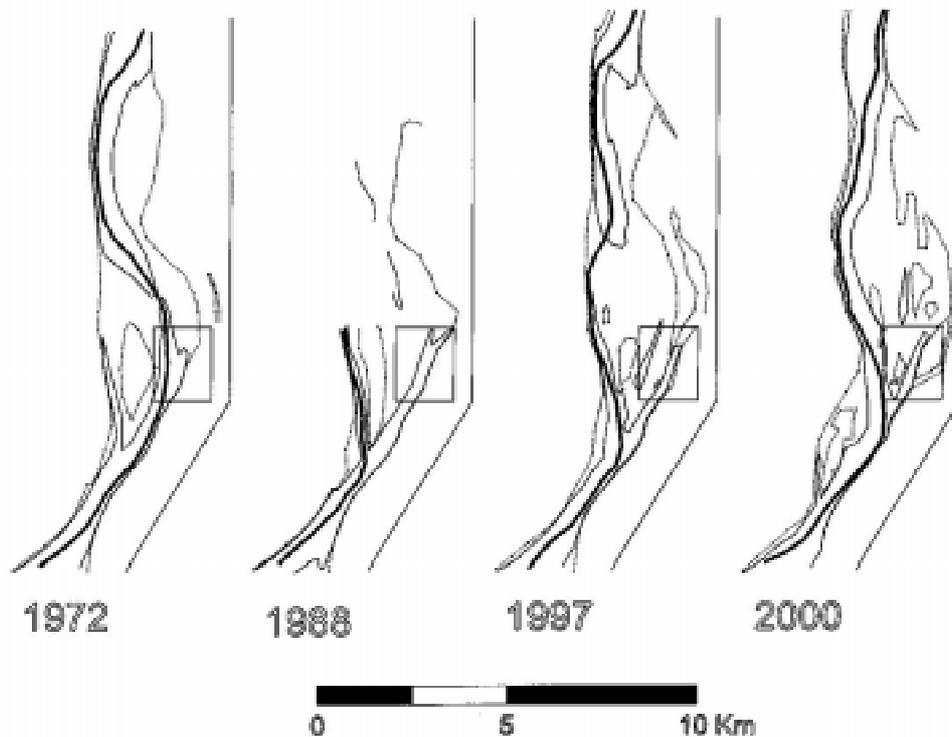


Figura 13.- Comparativo del cauce principal del Paraná entre sus km 619 y 604, en el que se delinearon la traza del thalweg (línea gruesa continua), la isobata de 6 m (líneas finas) y la isobata de 0 m (líneas de puntos; equivalentes a profundidades de ca. 3 m en situación de aguas medias). El rectángulo encierra el surco de erosión subacuático considerado, que devino en thalweg del Paraná luego de la crecida de 1998.

Luego de la experiencia comentada, y a partir de nuevas observaciones sobre batimetrías ejecutadas en el siglo XX, los autores han identificado surcos como el descrito en distintos tramos del Paraná Medio, donde ocurrieron desplazamientos (no-continuos) del thalweg hacia sus trazas. En ocasiones pudo determinarse que el proceso fue abortado mediante el cegamiento de la depresión, de acuerdo a la evolución particular de la hidrología en el sistema (en una vía similar a la reducción de longitudes que se expone en Tabla 3 para 1988, asociada a la bajante extraordinaria de ese año).

Parody y Strucco (1975) describieron mecanismos similares a los de la rectificación subacuática en el Paraná Inferior, sugiriendo que los mismos eran una consecuencia directa de la reducción de la pendiente del cauce vinculada con el progresivo incremento en la amplitud de una onda del thalweg. Sin embargo, una singularidad del caso expuesto es que el cambio de posición no provocó un acortamiento local de la longitud del thalweg en el área, sino que su recorrido se incrementó en ca. 500 m, i.e., un 6 % más que el largo de la traza previa.

Río Colastiné. Este cauce secundario del Paraná es uno de los más móviles del tramo Medio, en el que se han registrado tasas de corrimiento lateral de hasta 25 m/año, a la par de un complejo historial de avulsiones y rectificaciones en los últimos 65 años (Figs. 14 y 15). Sus características de movilidad y transporte sedimentario le han permitido edificar una planicie fluvial “rugosa”, en la que cauces abandonados y espiras de meandro se reconocen por doquier en una faja que alcanza los 10 km de anchura.

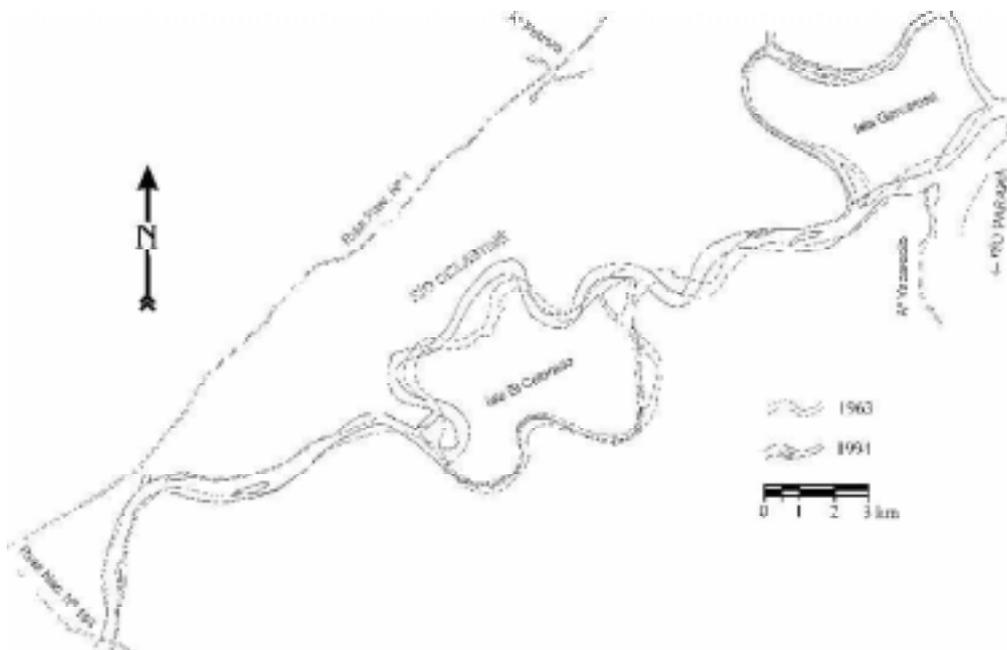


Figura 14.- Comparativo de posiciones del río Colastiné, en 1963 y 1994. Los cambios de ubicación del cauce por procesos de corte de meandro y avulsión se han concentrado en el entorno de las islas Garcerosa y El Colorado, mientras que en los tramos restantes la deriva lateral ha sido continua. (Reproducida de Ramonell y otros, 2000).

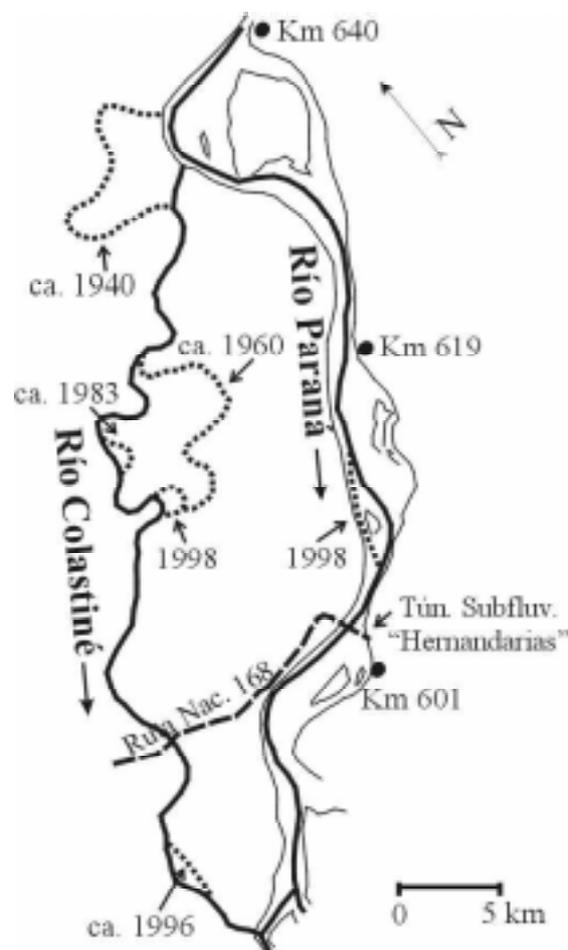


Figura 15.- Traza actual del thalweg del río Colastiné (línea gruesa; con idéntico trazo se representa también el thalweg del cauce principal del Paraná y, con líneas finas, las márgenes del río). Los trazos discontinuos representan trayectos abandonados por el thalweg, indicándose los años en que se completó la mudanza.

Dos de los cinco cambios del río mostrados en Fig. 15 se examinaron en detalle en FICH (1998, 2003), con el auxilio de una amplia serie temporal de fotos aéreas, y batimetrías del cauce. Las derivas restantes fueron consideradas en trabajos prácticos de la asignatura 'Hidráulica Fluvial' de FICH, correspondiente a la carrera de Ingeniería en Recursos Hídricos. Si bien el conocimiento adquirido fue dispar según los casos, la información reunida indica que una condición necesaria para el progreso de esos cambios en el Colastiné es la existencia de rutas de desborde preestablecidas en la planicie, como canales menores o bajíos entre espiras.

Ambos requisitos se han ilustrado mediante imágenes aéreas secuenciales en Fig. 16. Allí, lo que aparece como un incipiente corte por desborde indicado por la flecha en la foto de 1974 se corresponde, en realidad, con una derivación de caudales a través del canal identificado con igual rastra en la imagen de 1954. Este bajío capturó parte del flujo del Colastiné al ser alcanzado por el crecimiento (en amplitud) del meandro adyacente del río, de lo que dan cuenta los círculos llenos en ambas tomas. De acuerdo a los antecedentes disponibles, el thalweg se instaló siguiendo esa traza hacia 1984, probablemente durante la crecida extraordinaria de 1982/83.

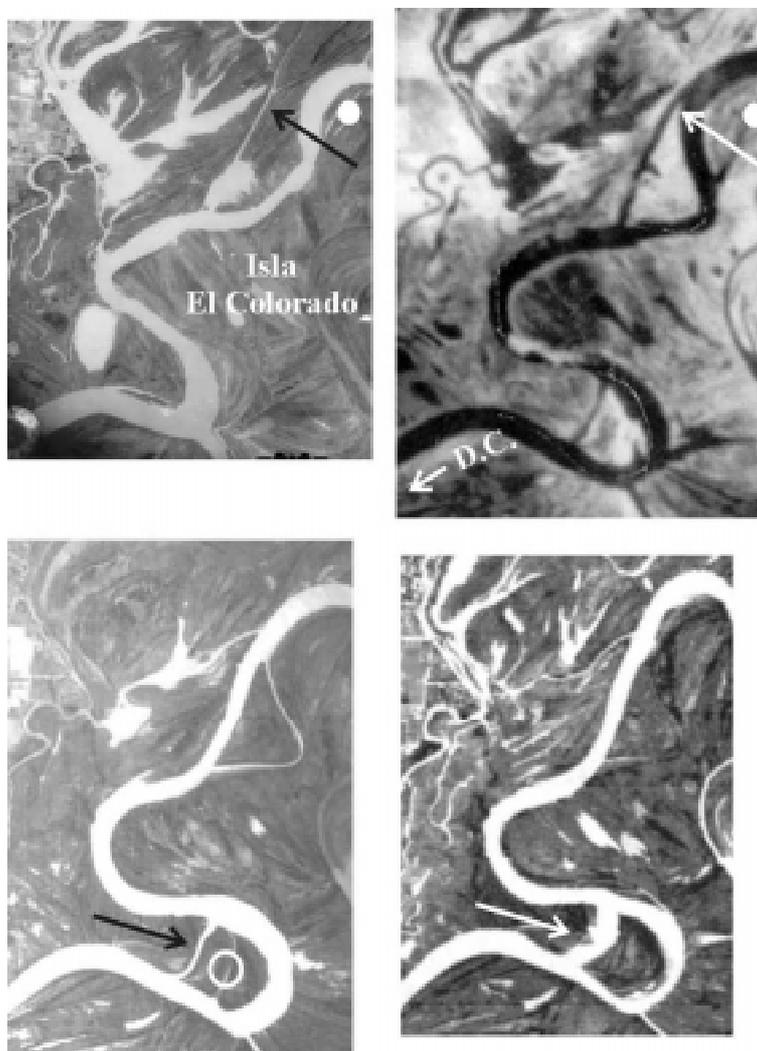


Figura 16.- Rectificaciones del río Colastiné en el borde oeste de isla El Colorado (explicaciones en el texto). Las imágenes aéreas muestran al cauce en situaciones hidrométricas similares (aguas medias-bajas en los registros de 1954 y 1989, y aguas bajas en los de 1974 y 2000), con diferencias máximas de niveles de 1 m.

Por su parte, la flecha en la imagen de 1989 marca una vía de rectificación ya presente en la foto de 1974, labrada por desbordes canalizados por un bajío entre espiras de meandro. La inundación de 1982/83 profundizó dos cortes en esa onda siguiendo tal tipo de depresiones (el segundo señalado con un círculo), del que prosperó el apuntado en primer término, ampliado durante las grandes crecientes de 1992 y 1998. En la última ocurrió el desplazamiento del thalweg a la posición que se advierte en el registro del año 2000, luego de más de 20 años de haberse iniciado la apertura de esa ruta.

Con relación al tren de meandros desactivado de isla Garcerosa (Fig. 14), su evolución fue regida principalmente por cambios en el cauce principal del Paraná, tal como se refiere en la leyenda de Fig. 17. Tales modificaciones en Fig. 17A fueron, a su vez, una consecuencia de las variaciones del caudal formativo del río en el siglo XX (Amsler & Ramonell, 2002; Ramonell y otros, 2000).

De acuerdo a la cartografía previa disponible para ese área, el 'riacho Colorado' se insinúa por primera vez en 1936, tal como se lo presentó en Fig. 17B. Entre comienzos de los '30 y hasta principios de los '40 ocurrieron 8 eventos de crecida en el sistema (470 días en situación de desborde), parte de los cuales fueron modelando y ampliando el riacho hasta la jerarquía con que aparece varios años después en 1943.

El último suceso que interesa comentar sobre los cambios de posición del Colastiné, se refiere al abandono del tramo que limita por el este a la isla El Colorado (Fig. 14). Lamentablemente no existe información suficiente como para hacer precisiones del caso, aunque sí se conoce que esa traza concentró casi el total del caudal del río hasta 1943, al menos.

Hasta aquél año, una fracción de la esorrentía se derivaba por un canal emisario menor (activo desde principios del siglo pasado), que fue transformado en cauce principal del Colastiné antes de finalizar los '60. Entre ésta década y mediados de la anterior coexistieron los dos brazos en torno a la isla El Colorado, con anchos de boca similares y sinuosidad mayor en el brazo este. Una explicación plausible para la adopción de la nueva ruta, es la del reajuste que habría experimentado el río entero ante los procesos de cegamiento y reactivación de su embocadura, expuestos en relación a Fig. 17.

Como se sugirió al empezar el tratamiento del río Colastiné, un común denominador de sus rectificaciones y avulsiones es la presencia de vías de escurrimiento ya formadas en la planicie, identificadas en tres de las cuatro mudanzas de cauce explicadas (sin dejar de observar que la traza del 'riacho Colorado' bien pudo ser ignorada en parte de los levantamientos del primer tercio del siglo XX).

Así, la evaluación sistemática de esas geoformas desde imágenes aéreas actualizadas posibilitaría aislar tramos con diferente grado de susceptibilidad a la avulsión o a la rectificación por desborde, en la manera que se presenta en Fig. 18.

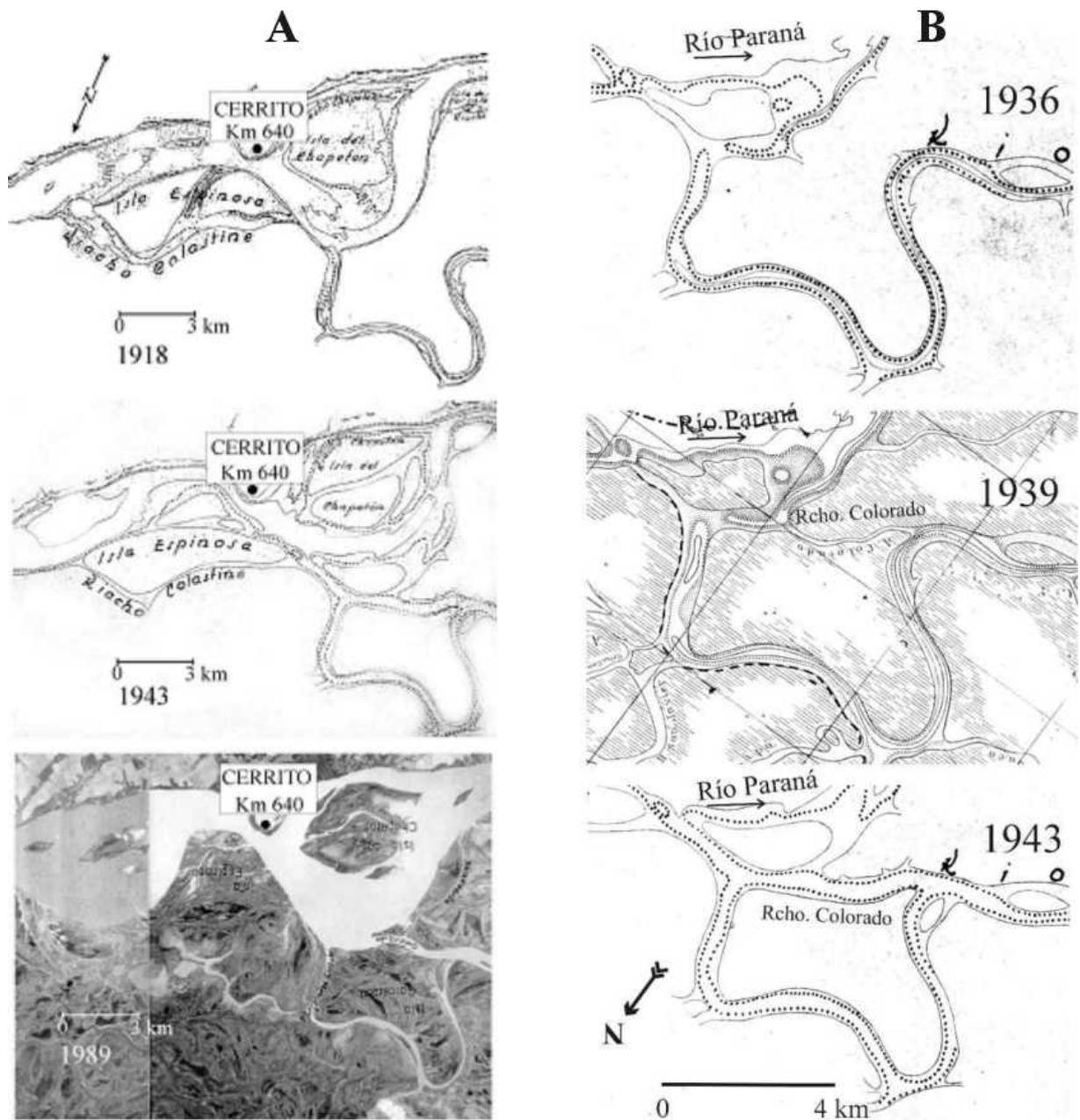


Figura 17.- Avulsión del río Colastiné en su tramo superior (la nueva traza se identifica como 'Rcho. Colorado' en los mapas de la derecha). A: situación general del área, en la que se visualizan las modificaciones en amplitud de la onda descrita por el cauce principal del Paraná aguas abajo del km 640, con sedimentación generalizada en la zona del ápice (coincidente con la embocadura del Colastiné) en el año 1943. B: detalles de la depositación en la embocadura del Colastiné, reactivado por flujos de desborde a través del 'riacho Colorado'.

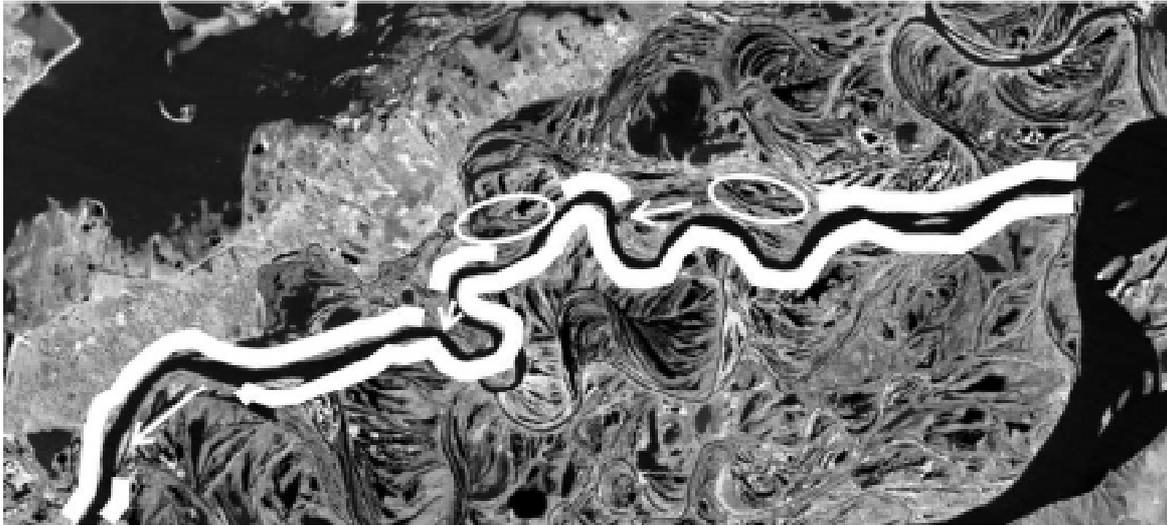


Figura 18.- Zonificación de susceptibilidades a la avulsión/rectificación por desborde del río Colastiné. Las flechas se disponen siguiendo las trazas de mayor susceptibilidad a tales fenómenos (i.e., zonas que deberían ser monitoreadas en adelante), mientras que los óvalos encierran áreas de riesgo potencial menor; los tramos de río delimitados por fajas anchas corresponden a zonas libres de riesgo. Para la clasificación se tuvieron en cuenta: a) las rutas de desborde conformadas en la planicie (como canales menores o bajíos entre espiras -en este caso, con una orientación respecto de la del cauce que no obstaculice el flujo de inundación-); b) la conexión de tales vías con el cauce, incluyendo su proximidad con relación a tasas de migración conocidas del río; c) un estudio de dinámica hídrica antecedente de parte del área (Fig. 19). De acuerdo a las propiedades conocidas del río, la zonificación debería actualizarse al cabo de ca. 10 años, de no ocurrir eventos del tipo considerado.

Río San Javier. Este curso ocupa una posición marginal en el valle del Paraná al norte del Colastiné, y su patrón varía entre anastomosado y meandriforme en tramos relativamente cortos, con primacía del primero. De acuerdo a la tipificación de Brice (1984), el grado de anastomosamiento varía entre 5 % y ca. 50 %, predominando los canales laterales sinuosos.

El sistema de cauces se presenta flanqueado por albardones como en el río Salado, y los surcos de desborde son rasgos frecuentes sobre todo en los sectores de canal único o de bajo grado de anastomosamiento.

El estudio del San Javier se inició recientemente, aparentando ser un caso en el que las posibilidades de pronosticar sitios de rectificación o avulsión son mínimas. El caso se ha incluido en esta contribución dada una particularidad del sistema, que es la gran lentitud en la que progresan tales fenómenos, con cortes de meandro y canales laterales que han quedado “congelados”, sin cambios en los últimos cien años (Figs. 20 y 21).



Figura 19.- Análisis de dinámica hídrica del área oeste evaluada en Fig. 18 (i.e., margen y planicie aluvial derecha del río Colastiné). Bases empleadas: imágenes Landsat 5 obtenidas en mayo de 1997 (situación de aguas bajas), diciembre de 1997 (situación de aguas altas), y mayo de 1998 (inundación generalizada del sistema próxima al pico de la crecida extraordinaria). (Reproducción parcial de FICH, 2003).

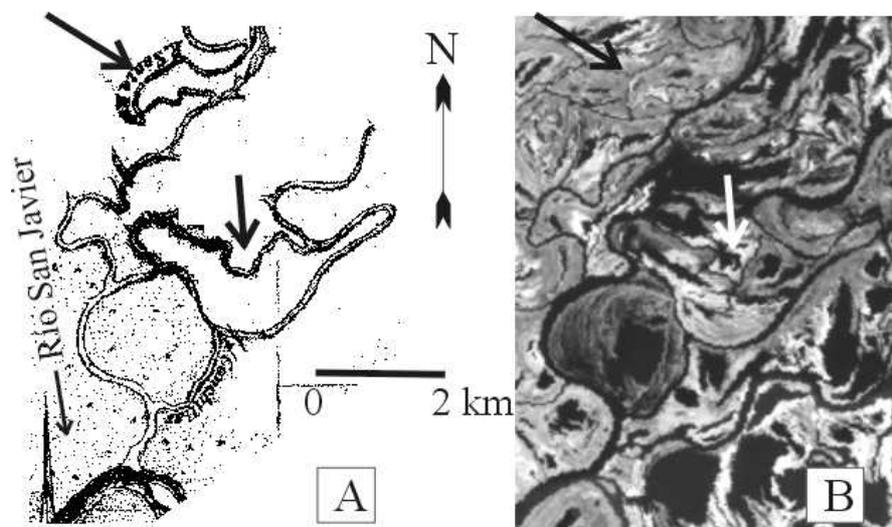


Figura 20.- Tramo del río San Javier ubicado en el extremo inferior del recuadro de Fig. 2. A: Parte del “Plano de navegación del río Paraná entre Esquina y la Desembocadura - 1913” del M.O.P.; B: imagen Landsat 5, de enero de 2003 (situación de aguas medias-altas). Las flechas en ambos registros señalan los únicos cambios advertidos en el área al cabo de 90 años (dos canales que aparecen disminuidos en la actualidad).

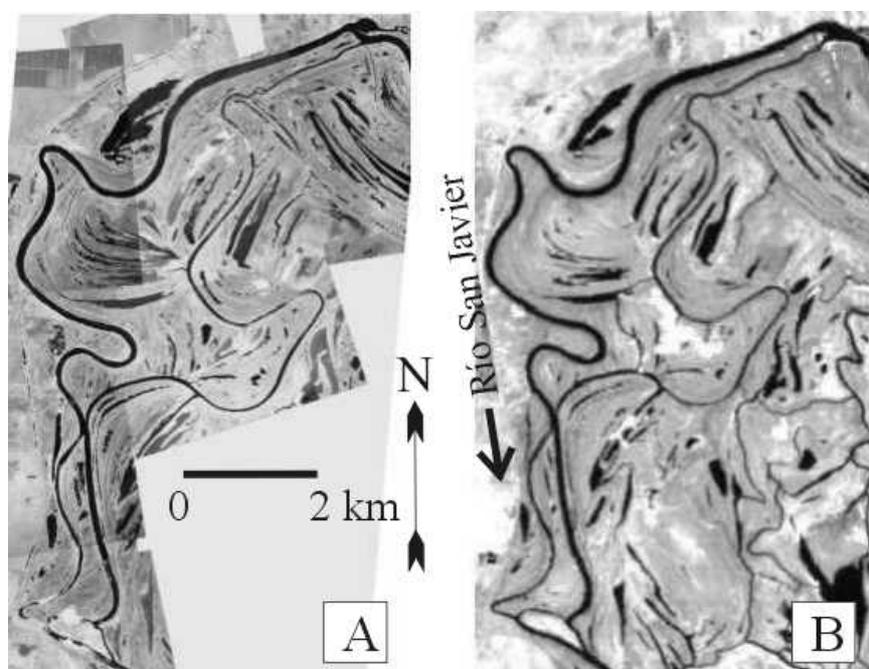


Figura 21.- Tramo del río San Javier ubicado en el extremo superior del recuadro de Fig. 2. A: fotomosaico de noviembre de 1974; B: imagen Landsat 5, de enero de 2000 (situación de aguas bajas en ambos registros). En esta zona fueron evaluadas tasas máximas promedio de corrimiento lateral de ca. 1 m/año, medidas en los ápices de los meandros del canal de 1er. orden. En los canales de menor jerarquía no se advirtieron cambios significativos en los últimos 50 años.

De acuerdo al análisis de datos de geotecnia de varios sondeos realizados en el sector de Fig. 20, y a muestreos del material del lecho en el canal principal, la estabilidad de los cauces en el área se explicaría por la presencia de sedimentos cohesivos en sus perímetros (FICH, 2003). Hacia el norte (zona de Fig. 21) la situación es diferente, y los canales principales tienen lechos arenosos.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un conjunto de casos de ríos que han experimentado migraciones no-continuas, que cubren situaciones muy distintas de planicies aluviales de bajo gradiente, tanto por sus dimensiones intrínsecas, como por sus propiedades de patrón morfológico, o de distribución y frecuencia de geoformas en las planicies adyacentes. Los modos específicos en que se efectuaron las derivas son, asimismo, diferentes.

Asociada a cada situación expuesta, fueron identificadas geoformas unitarias y asociaciones geomorfológicas que crean escenarios adecuados para los desplazamientos por avulsión o rectificación por desborde, al concentrar la escorrentía de inundación o el flujo en partes del lecho, como en el cauce principal del Paraná.

Una condición común a todos los casos es que la construcción de tales escenarios es lenta, y las geoformas o asociaciones morfológicas pueden identificarse con suficiente antelación, lo que permite anticipar sitios potenciales para la ocurrencia de aquellos fenómenos. Ello puede realizarse mediante un mapeo de zonas con diferente grado de susceptibilidad a las derivas no-continuas de cauce, del tipo elaborado para el río Colastiné. En tal sentido, se destaca el bajo costo del análisis.

Con relación al progreso de los procesos de corte o avulsión en el tiempo, se acentúa en el hecho que los períodos involucrados están en el orden de la decena de años, tratándose en general de fenómenos graduales, no súbitos.

Para finalizar, resulta claro que pronósticos sobre este tipo de fenómenos, en el que intervienen variables de primer orden desconocidas (desarrollo hidrológico en el sistema) pueden mejorarse con la profundización en dos aspectos, independientes entre sí:

- a) la acumulación de más y mejor información del caso bajo estudio (hidráulica y topográfica, principalmente, además de la que se ha reseñado en la descripción de los casos); y
- b) la integración de disciplinas, en lo que se ha dado en llamar la “aproximación geomorfológica-ingenieril” (Winkley & Schumm, 1994), a partir de la cual los autores han propuesto una metodología de trabajo regional (Ramonell y Amsler, 2002).

LISTA DE SÍMBOLOS

- B_c : ancho medio del cauce
 B_v : ancho medio de la planicie aluvial
 I_c : pendiente del cauce
 I_v : pendiente de la planicie aluvial
 $Q_{mód}$: caudal módulo
 $Q_{máx}$: caudal máximo de la serie
 $Q_{mín}$: caudal mínimo de la serie
 Q_{bf} : caudal de cauce lleno
 Q_{RP70} : caudal del río Salado en Ruta Provincial 70

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, J. R. L. (1965). “Fining upwards cycles in alluvial successions”. *Geol. J.* Vol. 4, pp. 229 – 239.

Amsler, M. L., & Ramonell, C. G. (2002)., “Paraná river channel adjustments to dominant discharge changes”. *River Flow 2002 - Intern. Conf. on Fluvial Hydraulics, Vol. 2: 921-930*. A.A. Balkema Publ. Louvan-La-Neuve, Bélgica.

Brice, J.C. (1984). “Planform properties of meandering rivers”. In: *River Meandering. Proc. Conf. Rivers '83, ASC: 1-15*. New York, U.S.A.

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) (1997). “Análisis de la evolución de los principales parámetros hidráulico-morfológicos que podrían influir sobre el comportamiento futuro de la obra de protección del Túnel Subfluvial Hernandarias”. Comitente: Comisión Administr. Interprov. Ente Túnel Subfluvial “Hernandarias”. Informe Final, T. 1-4, Fac. de Ing. y Cs. Hídricas, Univ. Nac. del Litoral. Santa Fe, Argentina.

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) (1998). “Análisis Preliminar de Alternativas de Ubicación de posibles Terminales Complementarias del Puerto de Santa Fe”. Comitente: Comisión Administr. Prov. Ente Puerto de Santa Fe. Informe Final, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Instituto Nacional del Agua (FICH - INA) (1998). “Estudios hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos de un sector del tramo inferior del Río Salado destinados a la concreción de una nueva conexión entre las ciudades de Santa Fe y Santo Tomé, en la Provincia de Santa Fe”. Comitente: Dirección Provincial de Vialidad de Santa Fe. Informe Final, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) (2003). “Estudio hidráulico y sedimentológico de obras de dragado en el riacho Colastinecito y refulado en la boca del Colastiné”. Comitente: Min. de Obras, Serv. Púb. y Vivienda de Santa Fe. Informe Final, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

Howard, A. D. (1996). “Modelling channel evolution and floodplain morphology”, Chapter 2 in: *Floodplain processes*, (M. G. Anderson, D. E. Walling & P. D. Bates eds.), Ed. J. Wiley & Sons, N.Y., U.S.A.

North, C. P. (2002). “Avulsions in drylands – discussion”. *Dryland Rivers Research Report*. University of Aberdeen, United Kingdom.

Parody, H., y Estruco, J. (1975). “Racionalización del dragado del Río Paraná. Teoría de las mutaciones periódicas”, *IV Reunión Asoc. Latinoamericana de Dragado (ALAD): 1-54*. Buenos Aires, Argentina.

Prestien, F. (1971), *Hidráulica Fluvial*, Escuela de Graduados - Ingeniería Portuaria, Fac. de Ingeniería, Univ. Nac. de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

Ramonell, C. G., y Amsler, M. L. (2002). “Guía de procedimientos metodológicos para estudios morfológicos de cauces fluviales argentinos”, *XIX Congr. Nac. del Agua, CD de Trabajos*. Córdoba, Argentina.

Ramonell, C. G., Amsler, M. L., y Toniolo, H. (2000). “Geomorfología del cauce principal”, (Cap. 4) En: *El Río Paraná en su tramo medio. Una contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura. Vol. 1*. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

Ramonell, C. G., Amsler, M. L., y Toniolo, H. (2002). "Shifting modes of the Paraná River thalweg in its Middle-Lower reaches ". *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.-Bd. 129*: 129-142. Stuttgart, Alemania.

Reineck, H.E., y Singh I. B. (1986). *Depositional sedimentary environments*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.

Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system*, Ed. J. Wiley & Sons, N.Y., U.S.A.

Slingerland R. & Smith N. D. (1998). “Necessary conditions for a meandering-river avulsion”, *Geology*, Vol. 26, No. 5, pp. 435 – 438.

Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SRH) (2000): “Estadística Hidrológica del Siglo XX. República Argentina”. Convenio Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación – Evaluación de Recursos S. A. (EVARSA).

Winkley, B. R. & Schumm, S. A. (1994). “River variability – Engineering significance”. (Chapter 21) In: *The Variability of Large Alluvial Rivers*. ASCE. New York, USA.