

ANEXO IX
ANÁLISIS Y REPRODUCCIÓN DE CRECIDAS HISTÓRICAS

INDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN.....	6
2 INFORMACIÓN HISTÓRICA RECOPIADA	7
2.1 Información Cartográfica y Batimétrica.....	7
2.2 Obras que existieron y/o existen en el curso del río Salado	11
2.2.1 El Puente Cululú.....	11
2.2.2 El Puente Paso del Vinal (Esperanza)	12
2.2.3 El Puente Mihura	14
2.2.4 Otros Puentes	17
2.3 Información Limnimétrica.....	17
2.4 Crecidas Históricas del río Salado	17
2.4.1 Evento de 1886	18
2.4.2 Evento de 1914	18
2.4.3 Evento de 1929	27
2.4.4 Evento de 1938	30
2.4.5 Evento de 1973	32
3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	34
3.1 Digitalización de Información Cartográfica.....	34
3.2 Procesamiento de información Hidrométrica	39
3.3 Modelación Hidráulica Histórica del río Salado.....	39
3.3.1 Generalidades del Modelo Hidráulico.....	39
3.3.2 Calibración y ajuste del Modelo Hidráulico.....	41
3.3.3 Análisis de incertidumbre de primer orden.....	43
4 ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES Y CAUDALES (PERÍODO 1928-1954 RP70).....	46
5 EFECTOS DEL SISTEMA PARANÁ SOBRE LA ESTACIÓN DE RP70	50
5.1 Identificación de las condiciones en que fueron realizados los aforos en RP70	51
5.2 Identificación de distintos tipos de flujo.....	53
6 CORRECCIÓN DE CAUDALES POR EFECTO DE REMANSO	56
6.1 Corrección Analítica - Ecuaciones de Saint Venant	56
6.1.1 Principios Teóricos	56
6.1.2 Deducción de la ecuación empleada en la corrección de caudales en RP70	59
6.1.3 Procedimiento de corrección	60
6.2 Modelación de las Curvas de Remanso.....	62
7 SERIE GENERADA SIN INFLUENCIA DEL SISTEMA PARANÁ (1928-2005)	68

INDICE DE FIGURAS

Figura IX. 1. Relevamiento río Salado 1928. Plano I (Fuente: A. y E. Fernández. DNCPyVN)	8
Figura IX. 2. Relevamiento río Salado 1928. Plano II (Fuente: A. y E. Fernández. DNCPyVN)	9
Figura IX. 3. Relevamiento río Salado 1928. Plano III (Fuente: A. y E. Fernández. DNCPyVN)	10
Figura IX. 4. Vista aérea del puente paso el Vinal (izquierda de la fotografía antiguo puente de madera a la derecha se puede observar el nuevo puente de la Ruta Provincial 6).....	13
Figura IX. 5. Fotografía desde los terraplenes de aproximación del antiguo puente Paso del Vinal	14
Figura IX. 6. Restos del puente Mihura, de la vieja estructura sólo se conservan los pilotes de madera.	15
Figura IX. 7. Vista del aliviadero lateral del puente Mihura.	16
Figura IX. 8. Vista del último puente Mihura construido en material.....	16
Figura IX. 9. Inundación de la ciudad de Esperanza (esq. 1° de Mayo y Lehmann. Fuente: Museo de la Colonización, Esperanza)	19
Figura IX. 10. Inundación de la ciudad de Esperanza (Jefatura de Policía. Fuente: Museo de la Colonización, Esperanza)	19
Figura IX. 11. Descarrilamiento de una locomotora de ferrocarril Santa Fe – Rafaela, a 7 km de San Cristóbal. (Fuente: Revista del Centenario de San Cristóbal.)	20
Figura IX. 12. Anegamiento de vías Férreas durante la inundación de 1914, en proximidades a la localidad de San Cristóbal.	20
Figura IX. 13. Inundación de 1914, en proximidades del puente Mihura. (Fuente: Museo de la Colonización, Esperanza)	21
Figura IX. 14. Vista del puente Paso del Vinal. (Fuente: Museo de la Colonización de Esperanza)	21
Figura IX. 15. Reflejo del avance de las aguas en la ciudad de Santa Fe. (Fuente: Nueva Época, 1914)	22
Figura IX. 16. Registros de lluvias mensuales durante el siglo XX, a raíz del record de precipitación alcanzado durante el mes de Abril de 1914. (Fuente: Nueva Epoca, 1914)	23
Figura IX. 17. Artículo de Investigación periodista (Fuente: El Litoral)	24
Figura IX. 18. Planilla de pluviometría diaria (Abril 1914, Fuente: Colegio Inmaculada, Santa Fe)	25
Figura IX. 19. Planilla de pluviometría diaria (Mayo 1914, Fuente: Colegio Inmaculada, Santa Fe)	26
Figura IX. 20. Reflejo del evento en la ciudad de Santa Fe. (Fuente: Diario El Litoral, 2 de Marzo de 1929)	28
Figura IX. 21. Reflejo del evento en la ciudad de Santa Fe, en donde se relata el urgente traslado de vecinos del Barrio Centenario. (Fuente: Diario El Litoral, 6 de Marzo de 1929)	28

Figura IX. 22. Reflejo del evento en la ciudad de Santa Fe. (Fuente: Diario El Litoral, 18 de Marzo de 1929).....	29
Figura IX. 23. Reflejo del evento en la ciudad de Santa Fe. (Fuente: Diario El Litoral, 18 de Marzo de 1929).....	29
Figura IX. 24. Artículo periodístico que refleja los daños ocasionados en distintas partes de la cuenca del río Salado (Fuente: Diario El Litoral, 29 de Marzo de 1938).....	30
Figura IX. 25. Repercusiones de la crecida del río Salado en 1938 (Fuente: Diario El Litoral)	31
Figura IX. 26. Reflejo periodístico del evento de 1973. (Fuente: Diario El Litoral, 13 de Junio de 1973)	32
Figura IX. 27. La caída del puente de la autopista (Fuente: Diario El Litoral, 14 de Junio de 1973).....	33
Figura IX. 28. Comparación entre el evento de 194 y 1973 (Fuente: Diario el Litoral).....	33
Figura IX. 29. Fotomontaje de la digitalización del relevamiento de 1928 sobre una aérea imagen actual.....	35
Figura IX. 30. Fotomontaje de la digitalización del relevamiento de 1928 sobre una aérea imagen actual.....	36
Figura IX. 31. Ejemplo del resultado de la digitalización del tramo inferior del relevamiento de A. y E. Fernández de la DNCPyVN, 1928	37
Figura IX. 32. Perfil correspondiente al Puente de Empalme San Carlos.....	38
Figura IX. 33. Perfil tipo del río Salado, correspondiente a la zona próxima a la desembocadura del mismo.	38
Figura IX. 34. Grafico de los resultados alcanzados (Calibración Q).....	47
Figura IX. 35. Grafico de los resultados alcanzados (Calibración H).....	47
Figura IX. 36. Resultado Modelo de regresión lineal para alturas en RP70	48
Figura IX. 37. Resultado Modelo de regresión lineal para caudales en RP70	48
Figura IX. 38. Valores de caudal observados vs calibrados para la RP70. (Periodo 1954-1993)	49
Figura IX. 39. Relación H-Q RP70. (se indican los máximos anuales y los aforos realizados)	50
Figura IX. 40. Relación H-Q RP 70 en escala logarítmica para facilitar su interpretación.	51
Figura IX. 41. Identificación de los aforos en el periodo 1990-2004.....	52
Figura IX. 42. Relación H-Q en RP70, luego de la aplicación de un filtro en Laguna Setúbal (Q=1750 m³/s) e identificación de las condiciones de aforo.	54
Figura IX. 43. Ajuste de funciones analíticas H-Q en la RP70, en base a la serie filtrada por efecto de remanso del Sistema Paraná.....	55
Figura IX. 44. Componentes de la ecuación de Flujo Gradualmente Variado.....	59
Figura IX. 45. Series de caudales en Colastiné y Laguna Setúbal y niveles en ESC y RP70 (1954-1955)	61
Figura IX. 46. Series de caudales en Colastiné y Laguna Setúbal y niveles en ESC y RP70 (1979-1980)	61
Figura IX. 47. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y Q= 200 m³/s para el río Salado. (Modelo Hidráulico 1928).....	64

Figura IX. 48. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y Q= 750 m ³ /s para el río Salado. (Modelo Hidráulico 1928).....	64
Figura IX. 49. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y Q= 1500 m ³ /s para el río Salado. (Modelo Hidráulico 1928).....	65
Figura IX. 50. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y Q= 3000 m ³ /s para el río Salado. (Modelo Hidráulico 1928).....	65
Figura IX. 51. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y Q= 200 m ³ /s para el río Salado. (Modelo Hidráulico Actual)	66
Figura IX. 52. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y Q= 750 m ³ /s para el río Salado. (Modelo Hidráulico Actual)	66
Figura IX. 53. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y Q= 1500 m ³ /s para el río Salado. (Modelo Hidráulico Actual)	67
Figura IX. 54. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y Q= 3000 m ³ /s para el río Salado. (Modelo Hidráulico Actual)	67

INDICE DE TABLAS

Tabla IX. 1. Cota IGM de distintos puentes sobre la cuenca del río Salado	40
Tabla IX. 2. Resumen de la información disponible para la calibración del evento de 1929 ..	41
Tabla IX. 3. Resumen de los niveles Observados vs Modelados	42
Tabla IX. 4. Resumen de los n de Manning adoptados	42
Tabla IX. 5. Análisis de incertidumbre de primer orden sobre los caudales	43
Tabla IX. 6. Resumen de las incertidumbres la variar un 15 %, el CV del n de Manning.....	45
Tabla IX. 7. Resumen Estadístico de las series empleadas	52
Tabla IX. 8. Coeficientes de correlación cruzada.....	53
Tabla IX. 9. Resumen de las Ecuaciones de Saint Venant. (fuente Chow, et al (1999)).....	57
Tabla IX. 10. Serie completa de caudales máximos anuales empleada en los estudios estadísticos.....	68

1 INTRODUCCIÓN

Las mediciones hidrológicas se realizan con la finalidad de obtener información sobre los distintos procesos hidrológicos. Esta información es empleada para comprender mejor el comportamiento de los sistemas de interés, prever la ocurrencia de eventos severos, contribuir en el diseño hidrológico e hidráulico de obras de infraestructura y/o de protección así como servir de entrada en modelos de simulación o de alerta de crecidas entre otras muchas aplicaciones técnicas.

A nivel internacional la importancia de mantener una adecuada base de datos hidrológicos es reconocida ampliamente desde la Década Hidrológica Internacional (1965-1974), la cual fomentó una rápida expansión de la recolección y almacenamiento de las mediciones realizadas sobre las variables hidrometeorológicas en todo el mundo, con la intención de que las mismas estuvieran disponibles para los técnicos y personal especializado que la requiriera.

Al margen de contar con una adecuada base de datos, es esperable que la “*ventana de observación*” sea bastante reducida; esto es así debido a que los registros sistemáticos de las variables son por lo general bastante recientes. El caso particular del río Salado no es una excepción a esta regla, dado que la principal estación de aforos (Ruta Provincial 70) posee una serie relativamente corta (1954-2005), lo cual limita en forma considerable los análisis que permitan inferir el comportamiento de este curso de agua.

En este Anexo se detalla todo el material recopilado y tratado a fin de ampliar la información disponible para su empleo en los análisis llevados a cabo en esta pericia.

Entre las principales fuentes de información consultada se pueden citar, a la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables (DNCPyVN), el Ministerio de Asuntos Hídricos de Santa Fe (MAH), el Centro Regional Litoral (INA-CRL), el INTA Ceres, INTA San Cristóbal, el Archivo General de la Provincia de Santa Fe, el Museo del ex Observatorio del Colegio de la Inmaculada de la ciudad de Santa Fe, la Hemeroteca del diario “El Litoral”, la Biblioteca Municipal de Rafaela, la Biblioteca Popular de Sunchales, el Museo de la Colonización de Esperanza y el historiador Hugo Zingerling, entre otros.

Gracias a la información recopilada de las distintas fuentes, se pudo conformar una amplia base de datos la cual, incluye información sistemática disponible en organismos públicos y antiguas crónicas e informaciones periodísticas de eventos que por su severidad fueron percibidos por la población de Santa Fe en distintos momentos de su historia. De esta manera, se pudo ampliar significativamente el horizonte de las observaciones con relación a aquellas registradas sistemáticamente desde mediados de los años 50.

2 INFORMACIÓN HISTÓRICA RECOPIADA

2.1 Información Cartográfica y Batimétrica

Distintos organismos e instituciones nacionales y provinciales realizaron a lo largo del tiempo relevamientos cartográficos y batimétricos sobre el curso del río Salado. Los mismos han sido se detallan en los Anexos XIII y XIV.

A la hora de determinar el comportamiento histórico del río Salado, uno de ellos resulta de suma importancia, por ofrecer un pormenorizado relevamiento del curso y sobre la batimetría del cauce principal. El mismo fue realizado durante los meses de agosto y octubre de 1928 por A. y E. Fernández de la DNCPyVN. Abarca desde la desembocadura del río Salado en el río Coronda hasta el kilómetro 83 del río Salado; esta información se encuentra plasmada en tres planos de escala 1:5000 los cuales se presentan en las Figura IX. 1, Figura IX. 2 y Figura IX. 3.

El relevamiento consiste de un total de 94 perfiles transversales del cauce principal, espaciados aproximadamente cada 500 m; todos estos perfiles se encuentran referenciados a un mismo nivel de cero, llegando hasta aguas arriba del Puente Mihura, para continuar de allí en adelante indicando solo la planimetría del río y la profundidad del cauce principal (Figura IX. 3). A su vez, ofrece en detalle todos los puentes que atravesaban el curso del río Salado en el momento de realizar el relevamiento, lo cual facilita la confección de un modelo hidráulico que refleje el comportamiento de este río en el pasado y con menores influencias antrópicas que las actuales.

La segunda fuente importante de información cartográfica, para confeccionar el modelo hidráulico del río Salado, fue brindada por 55 perfiles elaborados recientemente por INCOCIV (2003).

Otro organismo que realizó relevamientos de este tipo fue el INA-CRL, el cual confeccionó perfiles del tramo inferior del Río Salado, los cuales se emplearon para determinar las áreas de riesgo hídrico en Santa Fe (INA-CRL, 1992). Sin embargo, esta información no fue empleada a los fines de confeccionar un modelo “histórico” del río Salado.



Figura IX. 1. Relevamiento río Salado 1928. Plano I (Fuente: A. y E. Fernández. DNCPyVN)

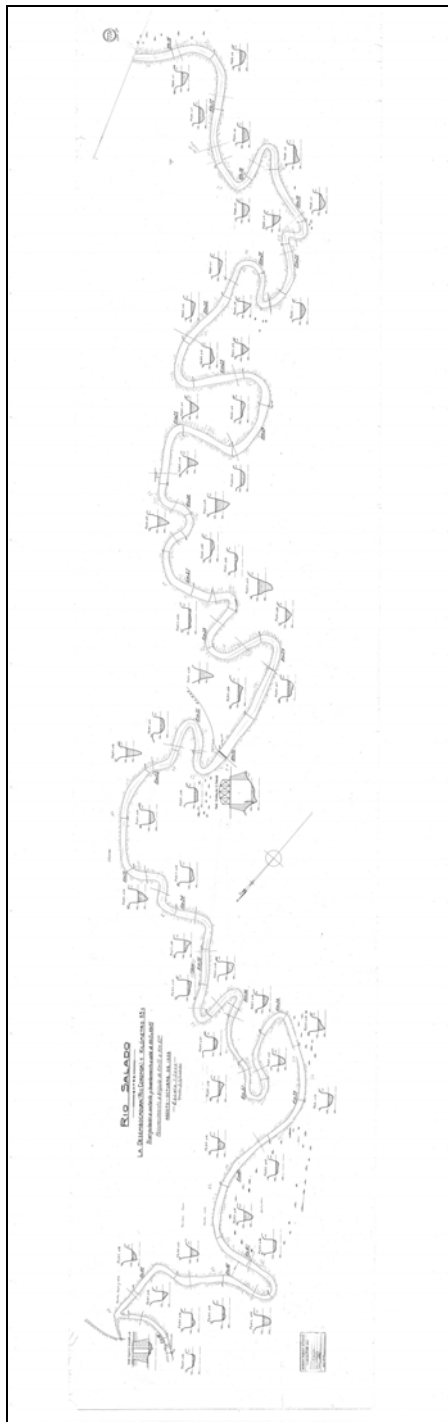


Figura IX. 2. Relevamiento río Salado 1928. Plano II (Fuente: A. y E. Fernández. DNCPyVN)

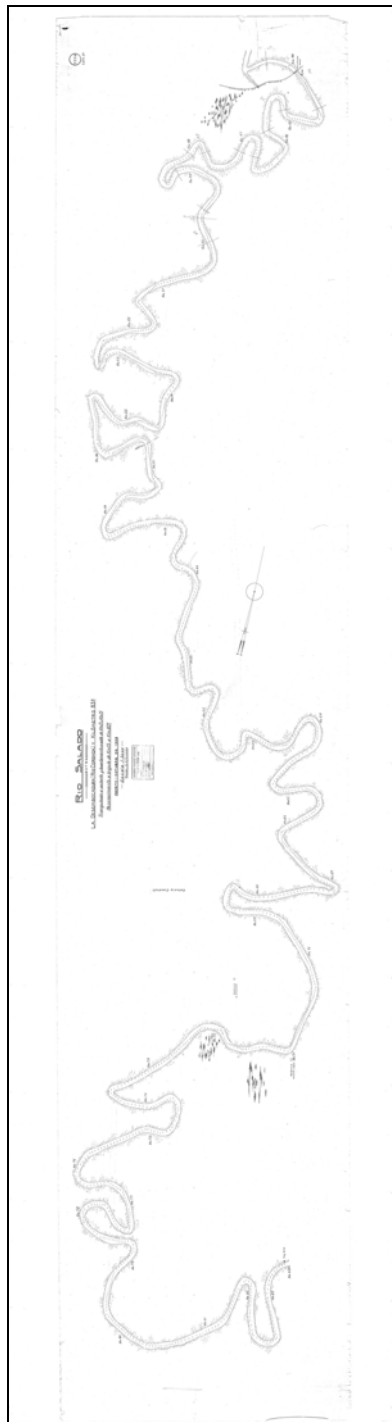


Figura IX. 3. Relevamiento río Salado 1928. Plano III (Fuente: A. y E. Fernández. DNCPyVN)

2.2 Obras que existieron y/o existen en el curso del río Salado

En este apartado se presentan las informaciones históricas y características que pudieron recopilarse de los antiguos pasos y/o obras que existieron u/o existen sobre el curso del río Salado, las cuales se tuvieron en cuenta a la hora de confeccionar el modelo hidráulico.

2.2.1 El Puente Cululú

A continuación se presentan aspectos relacionados con la obra facilitados por Zingerling (2005, *comunicación personal*). El 23 de noviembre de 1868 se reúnen en Santa Fe un oficial del Ministerio de Gobierno representando al Gobierno de la Provincia, los señores Christian Claus y Carlos Müller, y el escribano público de gobierno. Las tres partes se reúnen para firmar un contrato de construcción de un puente sobre el arroyo Cululú.

Seis días antes una ley provincial había establecido los procedimientos de contratación: Christian Claus y Carlos Müller habían estado esperando largamente ese momento. En esa reunión se conviene formalmente que:

“Christian Claus y Carlos Müller se comprometen a construir un puente por su cuenta y riesgo sobre el arroyo Cululú, en un paraje a convenir...”

“...El puente tendrá 28 varas de largo por 7 varas de ancho, y estará construido con madera de ñandubay, urunday o quebracho, a excepción de las barandillas laterales que serán construidas en algarrobo. El puente se elevará sobre pilares asentados en argamasa...”

También se les otorgaba a los citados empresarios el privilegio exclusivo por 20 años para el cobro del derecho de peaje: *“carros o carretas cargados un real y medio, carretas vacías medio real, persona a caballo medio real, 12 vacas o caballos 1 real, 12 ovejas medio real, todo lo que pase por cuenta del gobierno gratis...”*

“El gobierno prohibirá establecer en un radio de una legua, chatas o canoas puestas al servicio público, “ni menos” estará permitido construir un nuevo puente...”

Al cabo de los 20 años de concesión el puente quedaría en propiedad del Estado, *“debiéndose entregársele en buenas condiciones de uso,... mientras tanto el Gobierno se compromete durante ese período a no cerrar el camino que lleva al puente...”*

El 9 de junio de 1870 el puente ya está construido, pues se nombra una comisión de tres notables para reconocer los trabajos de construcción, y verificar que se hubieran cumplido las condiciones estipuladas en el contrato.

Durante estos años Christian Claus vivía en Puente Mihura, puente construido sobre el río Salado entre Santa Fe y Esperanza, en condiciones similares a las del Cululú. La tradición oral ubica a Julio Huber como administrador del puente y cobrador del peaje, lo que se confirma

con las constancias de domicilio en este paraje dadas cuando su casamiento en 1872, y los nacimientos de sus hijos hasta 1880.

El puente se construyó en lo que hoy es el camino viejo entre la localidad de Cululú y Esperanza, precisamente a cinco kilómetros al sur del paraje denominado ABC, un camino polvoriento que ya casi nadie transita, entre ombúes y paraísos, se va rodeando de pronto de espinillos: señal de proximidad del arroyo.

Ese fue el lugar elegido y no debe confundirse con el otro puente próximo a la localidad de Progreso, ya destruido, cuyos restos se ven junto al muy moderno que lleva el nombre de “Christian Claus”, ni con el otro más cercano a la localidad de Cululú, también con sus dos versiones.

La historia del puente transcurre sin sobresaltos hasta 1882. Un documento fechado el 6 de septiembre de ese año en Santa Fe se dispone rematar el puente y casa con terreno, así como sus privilegios, a consecuencia de la ejecución hipotecaria sobre Christian Claus, por el crédito no saldado obtenido en su momento de Sofía Quellet de Fromont, domiciliada en la recientemente fundada La Plata, ya no, aparece más el nombre de Carlos Müller. El puente se remata por el valor de la deuda, 2.200 pesos bolivianos, adquiriéndolo la misma Sofía.

En algún momento a partir de 1881, la administración del puente pasó a Germán Huber, cuando su padrastró Tulio Huber decidió vivir en el recientemente fundado Progreso. El 1° de junio de 1886, un contrato firmado en Esperanza transfiere la propiedad del puente, su casa con terrenos y privilegios a Hermann (Germán) Huber, quien los adquiere de Sofía por 1.500 pesos nacionales. Su explotación estaba próxima a caducar...

2.2.2 El Puente Paso del Vinal (Esperanza)

Como cita Clauss (2003), en el año de 1892 es aprobado por las cámaras legislativas el proyecto de construcción del puente Paso del Vinal, el cual se encontraría concesionado por 20 años, con cobro de peaje, el mismo fue inaugurado en 1896, con un costó \$ 2500.

El pliego de condiciones técnicas de está obra (Bianchi, 1895) establecía que el mismo debía ser construido con quebracho colorado (del Paraguay), por aquel entonces considerada como la madera más dura del país, “...*el puente tendrá una longitud de todo el cauce del río de 56 metros de largo, dividido en 10 tramos, seis de ellos de seis metros de largo y cuatro de 6, 67 m...*” el ancho total del mismo era de 6,30 m y se componía de una calzada principal de 4,50 m y 0,90 m a los costados para el tránsito peatonal. Del mismo pliego se extrae que “*Cada pila está formada por 4 grandes pilotes y los 6 en el centro además con dos laterales de contrafuerte, unidos entre sí por medio de cabezales de quebracho y cruces...*”

Los pilotes medían 25 cm. por cara y eran de quebracho colorado, el resto del puente tenía maderas de lapacho, sauce, urunday y cedro. La parte superior del puente o superestructura era de urunday y cedro.

Como criterio de diseño hidrológico, Bianchi (1895), empleaba un método muy común para la época, el cual consistía en estimar la altura del tablero en base a la adopción del máximo valor observado hasta el momento más una revancha. De acuerdo a este criterio, se establecía que la altura del mismo debía ser 90 centímetros por encima de la creciente máxima conocida. La cual, se habría registrado según diversas crónicas en 1886, por lo que teniendo en cuenta, relevamientos realizados recientemente, en los restos del terraplén de aproximación de este antiguo puente (Figura IX. 5) se pudo establecer que la cota del tablero era de aproximadamente 22,80 m snm, valor a partir del cual se podría deducir el nivel alcanzado por las aguas en el evento de 1886.



Figura IX. 4. Vista aérea del puente paso el Vinal (izquierda de la fotografía antiguo puente de madera a la derecha se puede observar el nuevo puente de la Ruta Provincial 6)



Figura IX. 5. Fotografía desde los terraplenes de aproximación del antiguo puente Paso del Vinal (Clérico, 2005, comunicación personal).

2.2.3 El Puente Mihura

El Puente Mihura o Puente del Mihura fue construido antes que el puente Cululú; el mismo estuvo ubicado en jurisdicción de Esperanza, a unos quince kilómetros de la actual planta urbana, sobre el río Salado, en el camino viejo que unía la ciudad de Esperanza con la ciudad con Santa Fe.

El lugar fijado para la construcción de este puente fue el antiguo Paso Mihura, lugar en donde el río hacía un meandro, y era tan poco profundo que, salvo en épocas de creciente, era posible cruzarlo por su lecho sin mayores dificultades. Desde la fundación de Esperanza en 1856, era el paso obligado hacia la capital provincial.

Por contrato del Gobierno Provincial, Christian Claus y Carlos Müller recibieron el encargo de su construcción en 1864. En 1866 fue inaugurado, los términos del contrato son casi idénticos a los que se establecieron para el Puente Cululú. Varían los montos del peaje (en el Mihura, de paso obligado, los valores son más altos que en el Cululú, más de fomento, cuyo camino no conducía en principio a ningún pueblo). Según algunos historiadores en el Mihura se cobró peaje por primera vez en la provincia de Santa Fe, y habría sido una de las primeras

modalidades en el ámbito nacional. Otra diferencia está en el lapso fijado para la percepción de peaje: quince años en el Mihura y veinte en el Cululú.

En la actualidad se puede llegar al Puente Mihura sólo por el lado de Esperanza, desde Santa Fe-Recreo el camino está obstruido, se llega al lugar por un camino de tierra vecinal, que se desvía de la ruta a Empalme San Carlos. Del viejo puente quedan algunos pilares de madera, estos están recostados sobre los pilares de material del puente construido décadas después, muy angosto y ya abandonado. (Figura IX. 6)

Actualmente el curso principal del Salado ya no corre por allí, pues abandonó el meandro por donde discurrían sus aguas, buscando un curso más directo. En época de sequía, el agua remanente del Salado no tiene allí más que un metro de ancho, aunque en sus adyacencias el lecho es fangoso, y caminar por él significa enterrarse unos cuantos centímetros. Unos 100 metros después de cruzar el puente (a pie), un sendero cubierto de matorrales conduce a un pequeño puente, que hacía de aliviador del principal en época de creciente, posiblemente éste también pertenezca a la obra original (Figura IX. 7). Su grado de deterioro es mayor: sus travesaños ya no sostienen piso alguno.

Pocos metros antes de llegar al primer puente, se levanta la vieja casa familiar, donde nacieron los hijos mayores de Christian Claus y Elisa Koch, y donde también vivieron Guillermina Claus y sus dos pequeños hijos antes de casarse con Julio Huber.



Figura IX. 6. Restos del puente Mihura, de la vieja estructura sólo se conservan los pilotes de madera.



Figura IX. 7. Vista del aliviadero lateral del puente Mihura.



Figura IX. 8. Vista del último puente Mihura construido en material.

2.2.4 Otros Puentes

También se tuvo acceso a informaciones de otros puentes que atraviesan al río Salado a lo largo de la provincia de Santa Fe, sobre todo en su tramo inferior y medio, entre las informaciones más destacadas se puede incluir el informe elaborado por el Dr. Edwin Kindel (1939), sobre el nuevo puente carretero Santa Fe – Santo Tomé.

En el se detallan las generalidades del proyecto, la forma de licitación, ejecución de los distintos elementos estructurales y las pruebas de recepción, aunque no se aporta información hidráulica y/o hidrológica relevante.

2.3 Información Linnimétrica

La principal fuente de información de este tipo empleada en el este Anexo, fue la DNCPyVN, la cual, a lo largo del tiempo operó distintas estaciones de medición de niveles en este curso de agua, aunque lamentablemente los datos perdieron continuidad, a partir de mediado de la década del 90.

Sobre el curso del río Salado, las principales estaciones operada por esta institución nacional fueron:

- Cuatro Bocas
- Empalme San Carlos
- Puente Mihura

A lo largo de este Anexo se presentara la información recopilada y el procesamiento que se le dio a la misma.

2.4 Crecidas Históricas del río Salado

Gracias a la colaboración del Historiador Hugo Zingerling y a la búsqueda de material en archivos periodísticos y museos regionales, se logro detectar distintos eventos que por su magnitud fueron plasmados en los medios de comunicación de la época, o que permanecen en la memoria popular.

En un primer momento se contó con algunos indicios que permitieron orientar la búsqueda, como ser distintas crónicas que relataban los trastornos ocasionados en distintas localidades ribereñas del río Salado o de la misma ciudad de Santa Fe. De acuerdo a ellas, se pudieron detectar eventos de este tipo en los años de 1905, 1914, 1916 (las crónicas relatan que durante junio se registraron nevadas), 1929, 1938/1939, 1973, 1998 y obviamente el evento del 2003, pero a medida que se fue avanzando en la investigación alguna de estas fueron descartadas

debido a que se trataba de crecidas del río Paraná, o eventos focalizados en una determinada localidad y no propios del río Salado.

A lo largo de este apartado se presentaran la información recopilada de los eventos más significativos que pudieron ser detectados durante el transcurso de la presente pericia.

2.4.1 Evento de 1886

Como ya se mencionara oportunamente se presentara en este Anexo, la recopilación de información histórica no es una tarea fácil, pero tampoco imposible y la información que se aporta puede ser sumamente importante.

Por ejemplo, como ya se mencionó oportunamente en la descripción histórica del Puente Mihura el cuál fue uno de los más antiguos sobre el río Salado, esta obra se inauguró en 1866 y estuvo en funcionamiento durante veinte años, hasta que según se relata Roverano en su libro “...hasta que la creciente de 1886 lo inutilizó por completo...”.

Uniendo un poco la información recopilada en el curso de esta pericia se puede concluir que el evento de 1886 fue el evento adoptado como condición de diseño de otra importante obra sobre este río, como lo fue el puente de Paso el Vinal, que como se establece Bianchi (1885) en el pliego de condiciones técnicas de esta obra “...el piso del puente se eleva noventa centímetros sobre la creciente máxima conocida; a fin de que quede siempre seco...”, por lo que teniendo en cuenta que el tablero de este puente se hallaba aproximadamente en cota 22,80, se puede concluir que el nivel del evento de 1886 alcanzó en la zona próxima a la ciudad de Esperanza una cota aproximada de 21,90 m snm.

2.4.2 Evento de 1914

Durante los meses de abril/mayo de 1914, la cuenca santafesina del río Salada se encontró afectada por un evento hidrológico de inusitada severidad, que afectó fuertemente a las localidades de El Tostado y Esperanza las cuales vieron anegada buena parte de sus cascos urbanos.

Al realizar la recorrida por la cuenca, se pudo tener acceso a material histórico de sumo interés. En particular, se obtuvieron documentos fotográficos que reflejaban la magnitud del mismo, parte de este material, es reflejado en las Figuras IX. 9 a Figura IX. 14, las cuales permiten apreciar la magnitud de los efectos de las lluvias en distintos puntos de la cuenca. Siendo de destacar dos de ellas, a saber; i) la Figura IX. 13, en donde se puede apreciar el camino que conducía al puente Mihura, el cual se halla totalmente anegado por las aguas y ii) la Figura IX. 14 muestra que el nivel alcanzado por las aguas del río Salado en Esperanza llegó hasta el tablero del Puente Paso del Vinal, la cual se emplea como sección de control.



Figura IX. 9. Inundación de la ciudad de Esperanza (esq. 1° de Mayo y Lehmann. Fuente: Museo de la Colonización, Esperanza)



Figura IX. 10. Inundación de la ciudad de Esperanza (Jefatura de Policía. Fuente: Museo de la Colonización, Esperanza)



Figura IX. 11. Descarrilamiento de una locomotora de ferrocarril Santa Fe – Rafaela, a 7 km de San Cristóbal. (Fuente: Revista del Centenario de San Cristóbal.)



Figura IX. 12. Anegamiento de vías Férreas durante la inundación de 1914, en proximidades a la localidad de San Cristóbal.



Figura IX. 13. Inundación de 1914, en proximidades del puente Mihura. (Fuente: Museo de la Colonización, Esperanza)



Figura IX. 14. Vista del puente Paso del Vinal. (Fuente: Museo de la Colonización de Esperanza, facilitada por Clérico, 2005)

De este evento, no solo pudo recuperarse información fotográfica, si no que afortunadamente se contó con mayor información que en el caso anterior (1886), debido a que los daños ocasionados por este evento, fueron reflejados en el periódico Santafesino “Nueva Época” y también se pudieron obtener datos hidrométricos como ser los registros pluviométricos diarios de la estación que funcionara en el Colegio Inmaculada Concepción de la ciudad de Santa Fe , además de lecturas diarias de nivel de la estación Cuatro Bocas, que el 1° de Mayo de 1914, registrara una lectura de 5.14 m (14,05 m snm Fuente: DNCPyVN).

A forma de ejemplo ilustrativo, las figuras Figura IX. 15 a Figura IX. 19, muestran algunos de los principales artículos periodísticos y planillas diarias de pluviometría.

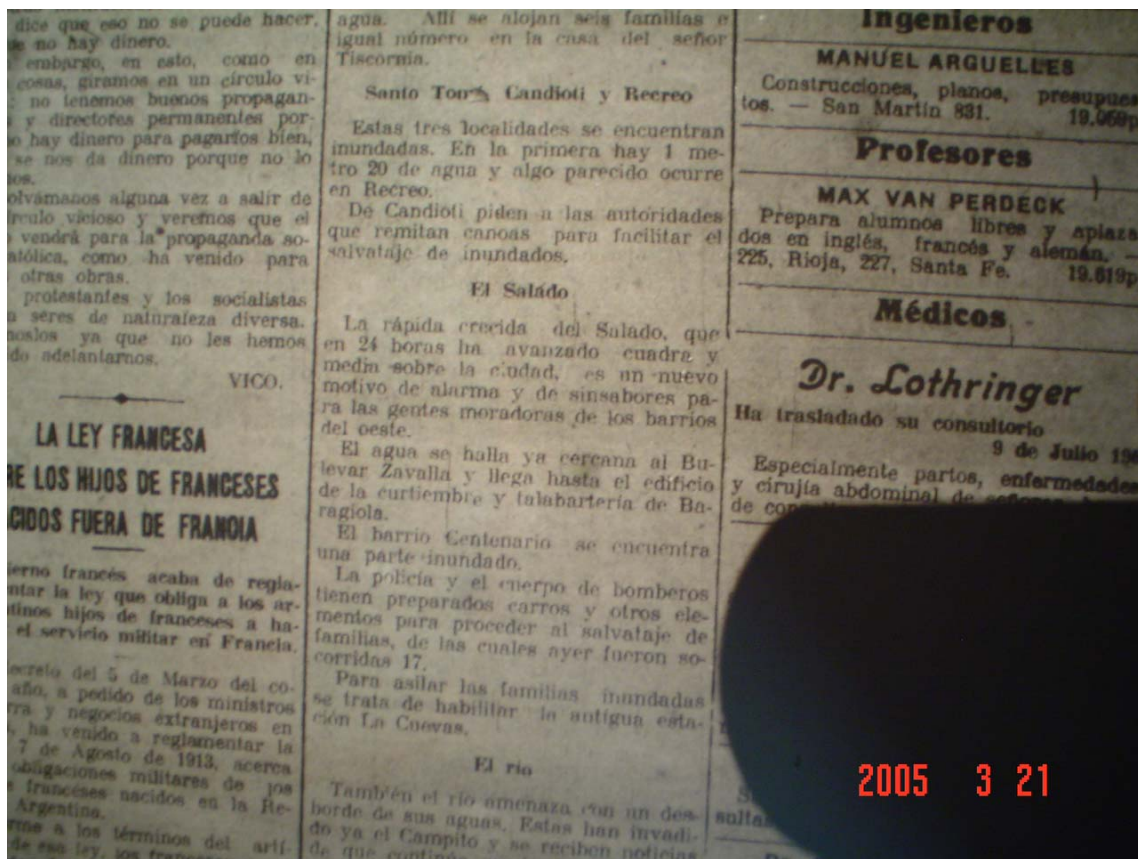


Figura IX. 15. Reflejo del avance de las aguas en la ciudad de Santa Fe. (Fuente: Nueva Época, 1914)

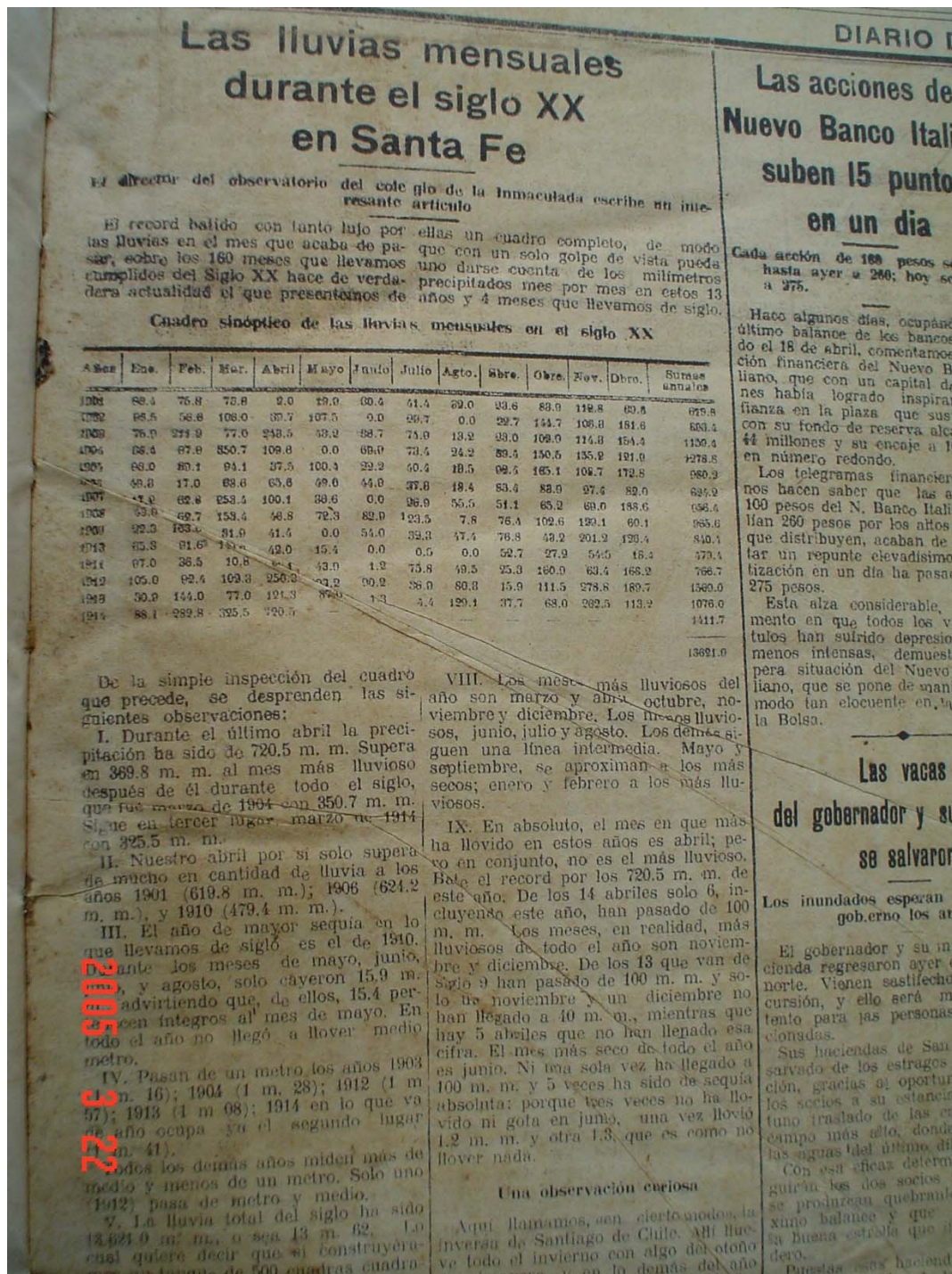


Figura IX. 16. Registros de lluvias mensuales durante el siglo XX, a raíz del record de precipitación alcanzado durante el mes de Abril de 1914. (Fuente: Nueva Epoca, 1914)



Figura IX. 17. Artículo de Investigación periodista (Fuente: El Litoral)

mes de Abril de 1914

DÍA		TEMPERATURA		HUMEDAD		VIENTO		PRECIPITACIÓN		OBSERVACIONES	
HORA	TEMPERATURA	TEMPERATURA	HUMEDAD	HUMEDAD	DIRECCIÓN	VELOCIDAD	VELOCIDAD	CANTIDAD	TIPO	TIPO	TIPO
1	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
2	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
3	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
4	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
5	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
6	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
7	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
8	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
9	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
10	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
11	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
12	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
13	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
14	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
15	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
16	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
17	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
18	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
19	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
20	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
21	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
22	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
23	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
24	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
25	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
26	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
27	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
28	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
29	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
30	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0
31	18	15	75	75	N	10	10	0	0	0	0

Figura IX. 18. Planilla de pluviometría diaria (Abril 1914, Fuente: Colegio Inmaculada, Santa Fe)

mes de Mayo de 1914

Día	Temperatura		Viento		Nube	Humedad	Presión	Observaciones
	Máx	Mín	Dir	Fuerza				
1	21	10	SW	12	100	1000	1000	
2	21	10	S	10	100	1000	1000	
3	21	10	S	10	100	1000	1000	
4	21	10	S	10	100	1000	1000	
5	21	10	S	10	100	1000	1000	
6	21	10	S	10	100	1000	1000	
7	21	10	S	10	100	1000	1000	
8	21	10	S	10	100	1000	1000	
9	21	10	S	10	100	1000	1000	
10	21	10	S	10	100	1000	1000	
11	21	10	S	10	100	1000	1000	
12	21	10	S	10	100	1000	1000	
13	21	10	S	10	100	1000	1000	
14	21	10	S	10	100	1000	1000	
15	21	10	S	10	100	1000	1000	
16	21	10	S	10	100	1000	1000	
17	21	10	S	10	100	1000	1000	
18	21	10	S	10	100	1000	1000	
19	21	10	S	10	100	1000	1000	
20	21	10	S	10	100	1000	1000	
21	21	10	S	10	100	1000	1000	
22	21	10	S	10	100	1000	1000	
23	21	10	S	10	100	1000	1000	
24	21	10	S	10	100	1000	1000	
25	21	10	S	10	100	1000	1000	
26	21	10	S	10	100	1000	1000	
27	21	10	S	10	100	1000	1000	
28	21	10	S	10	100	1000	1000	
29	21	10	S	10	100	1000	1000	
30	21	10	S	10	100	1000	1000	
31	21	10	S	10	100	1000	1000	

(Note: The table above is a simplified representation of the handwritten data. The actual image shows a detailed daily log with columns for temperature, wind, clouds, humidity, and pressure, along with handwritten notes in Spanish.)

Figura IX. 19. Planilla de pluviometría diaria (Mayo 1914, Fuente: Colegio Inmaculada, Santa Fe)

2.4.3 Evento de 1929

Los primeros indicios del acontecimiento de un evento severo durante la primera quincena del mes de Marzo 1929, fueron dados por uno de los mapas que fuera presentado en el Anexo I, en el cual se demarca la línea de inundación que acusara la ciudad de Santa Fe durante ese año.

La misma abarca los terrenos del Parque Garay, llegando hasta las inmediaciones de calle Paraguay; abarca también a la Maestranza Municipal y prácticamente a todo el trazado de la actual Av. J.D.Perón. Esta línea rodea también al Cementerio Municipal. En el sector de barrio Barranquitas se observa el avance de la línea de máxima inundación hacia el este de la actual Av. J.D.Perón. Analizada la topografía de la zona se concluye que la misma es prácticamente coincidente con la cota 15 m.snm.

Este dato no es menor, pero luego del análisis de la información recopilada se pudo concluir, que los niveles alcanzados en la ciudad de Santa Fe y que quedaron plasmados en el plano antes mencionado fue causado principalmente por una crecida del río Paraná en combinación con una creciente moderada del río Salado. A continuación, se presentan distintos artículos periodísticos que reflejan como este evento supero el umbral de percepción de la población Santafesina.

En primer lugar se presenta la Figura IX. 20, la cual refleja el aumento de niveles del río Paraná temiéndose que esta fuera mayor a la onda de la crecida registrada en 1905, la Figura IX. 21 presenta un extracto de un artículo periodístico del diario El Litoral, en donde se reflejaba la situación de riesgo de vecinos del Barrio Centenario y otras zonas de la ciudad ante el avance impetuoso de las aguas.

Por último, la Figura IX. 22 nos permite tener una imagen de cómo avanzaban las aguas de los ríos Paraná y Salado en forma conjunta sobre la ciudad de Santa Fe.

Además se contaron con datos de niveles y caudales en las estaciones R168 – Colastiné y Laguna Setúbal, sobre el río Paraná, esta información fue provista por la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación. En ambas estaciones el máximo caudal se registra el día 24 de Marzo de 1929, con 4100 m³/s y 5270 m³/s.

Por parte del río Salado, la DNCPyVN proveyó información limnimétrica en dos estaciones la primera de ellos fue Cuatro Bocas, en donde el pico se dio el 24 de Marzo coincidiendo con el pico observado en Colastiné y Setúbal, observándose un nivel de 6,24 (15,18 m snm). El segundo puesto de medición fue Empalme San Carlos, aquí el pico se registro el día 29 de marzo, en donde, la lectura alcanzo el nivel 6,15 (15.18 m snm), este desfase temporal observado entre los niveles y caudales máximos del río Salado y Paraná, es justificado cuando se esta en presencia de una remontada de las aguas del río Paraná sobre el Salado, que es “*embalsado*” por el primero, por lo que se puede establecer que se trata de una crecida del Paraná que repercutió notoriamente sobre el río Salado y por ende en la ciudad de Santa Fe.



Figura IX. 20. Reflejo del evento en la ciudad de Santa Fe. (Fuente: Diario El Litoral, 2 de Marzo de 1929)

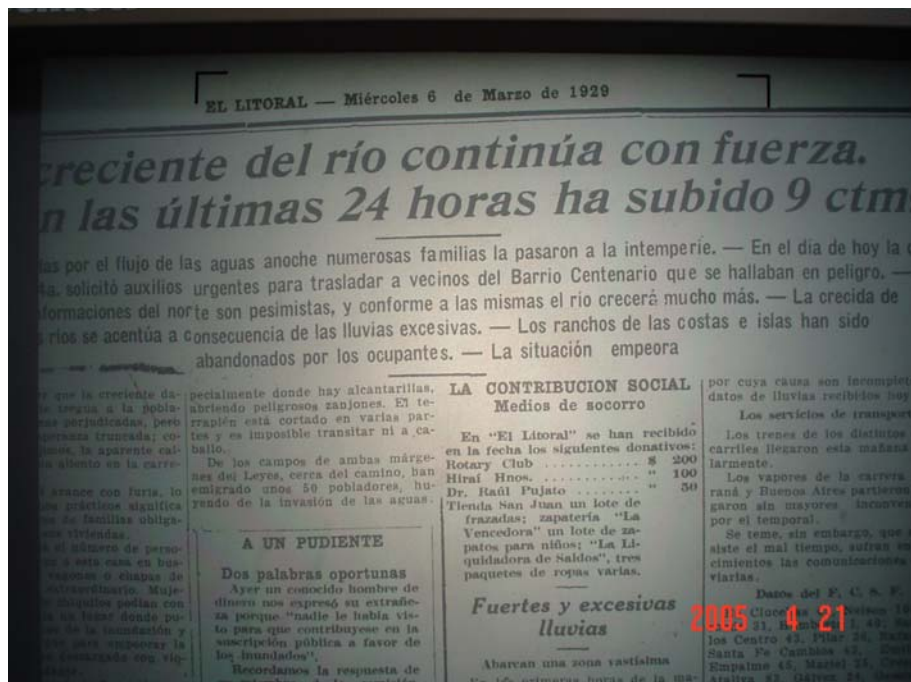


Figura IX. 21. Reflejo del evento en la ciudad de Santa Fe, en donde se relata el urgente traslado de vecinos del Barrio Centenario. (Fuente: Diario El Litoral, 6 de Marzo de 1929)



Figura IX. 22. Reflejo del evento en la ciudad de Santa Fe. (Fuente: Diario El Litoral, 18 de Marzo de 1929)



Figura IX. 23. Reflejo del evento en la ciudad de Santa Fe. (Fuente: Diario El Litoral, 18 de Marzo de 1929)

2.4.4 Evento de 1938

El interés de este evento surgió luego de la recorrida por la cuenca, principalmente se le da importancia un artículo publicado en “La revista del Centenario de Tostado”, en donde se relata la ocurrencia de tres eventos severos en esta localidad en los años de 1914, 1938 y 1973. Por lo que se procedió de igual manera que en los casos anteriores, pero luego de un análisis de los distintos artículos periodísticos, se pudo concluir que se trató de un evento que si bien fueron severos para distintas localidades del interior Santafesino, no supero el umbral de percepción ciudad Capital, más halla de indicarse los daños ocasionados en la cuenca y un aumento sorpresivo de los niveles del río Salado (Figura IX. 24, Figura IX. 25).

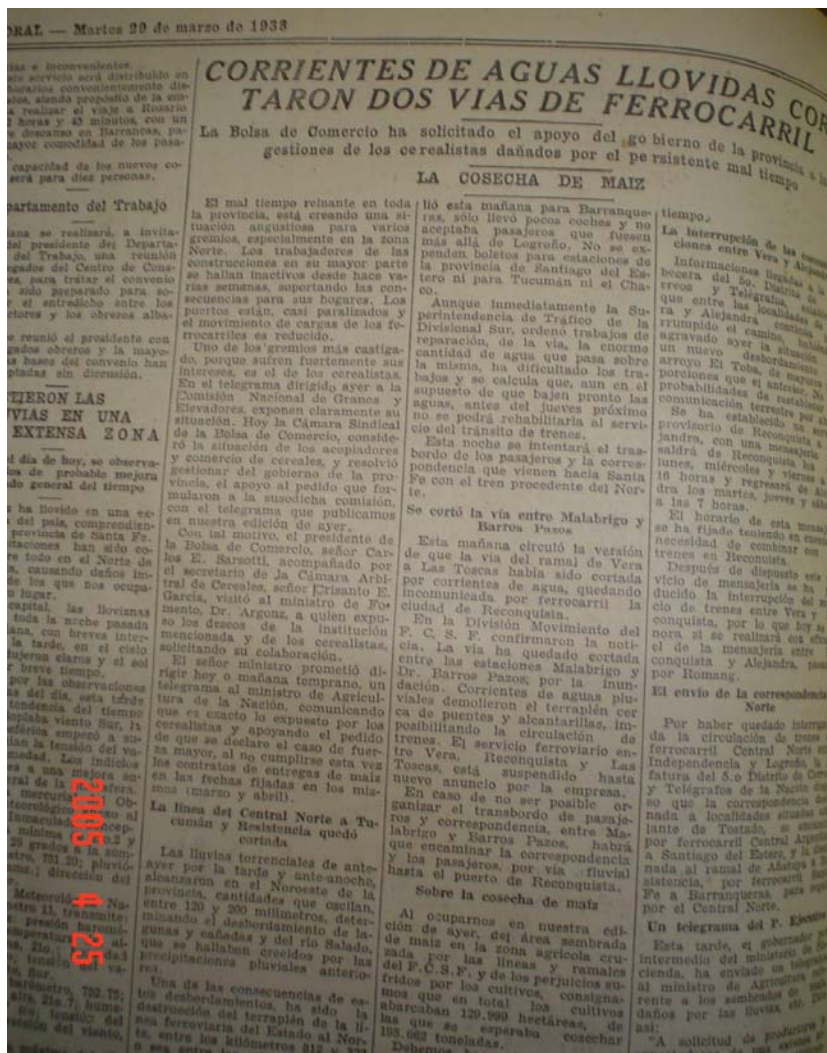


Figura IX. 24. Artículo periodístico que refleja los daños ocasionados en distintas partes de la cuenca del río Salado (Fuente: Diario El Litoral, 29 de Marzo de 1938)

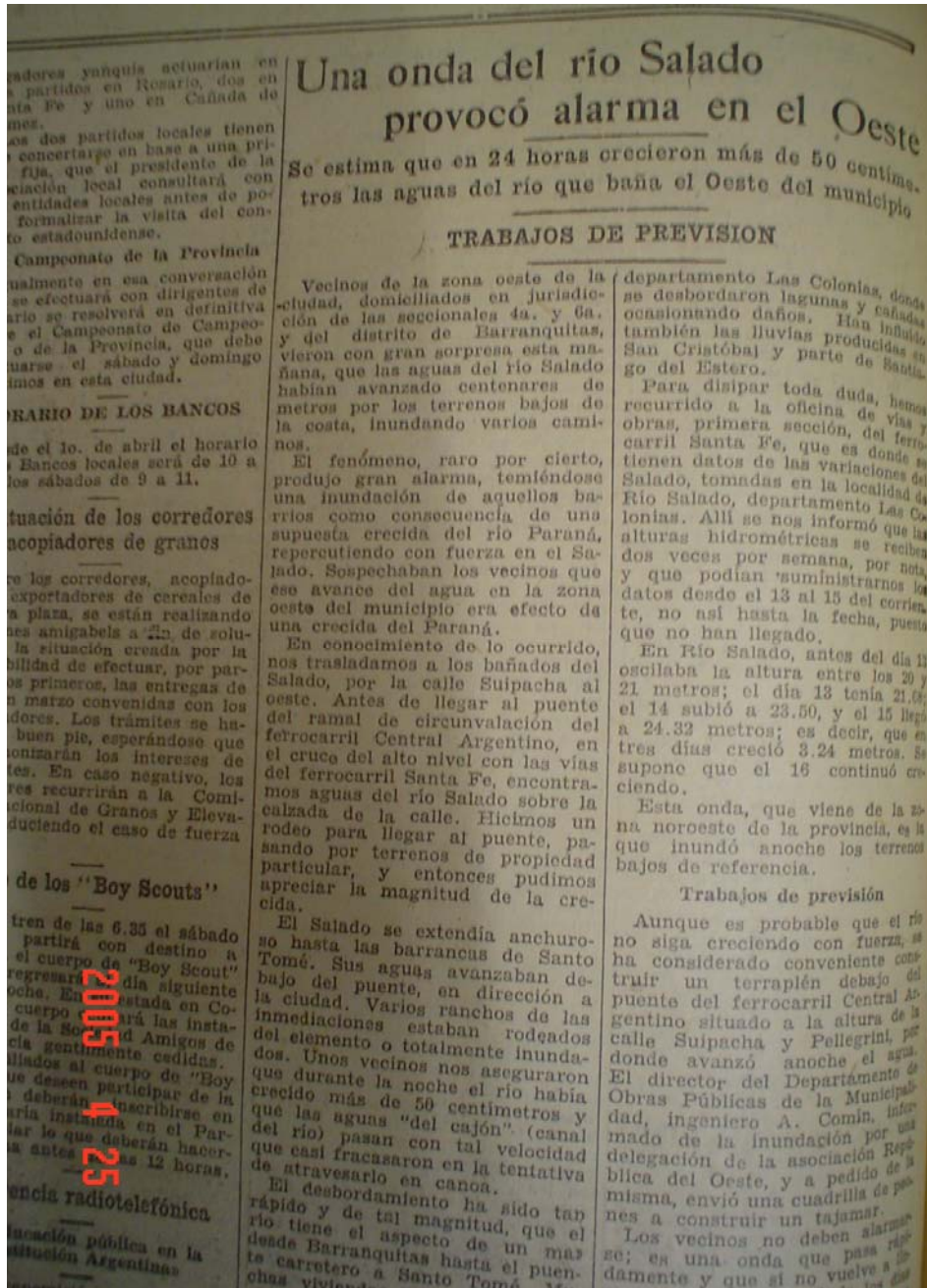


Figura IX. 25. Repercusiones de la crecida del río Salado en 1938 (Fuente: Diario El Litoral)

2.4.5 Evento de 1973

Este es uno de los eventos más severos que se recuerda del río Salado, en esa oportunidad en la estación de la Ruta Provincial 70 se registraron más de 2400 m³/s y es recordado por la población santafesina por que ocasiono la caída del primer puente de la autopista a Rosario AU01. Las figuras reflejan como se percibió este evento en la Capital Provincial.



Figura IX. 26. Reflejo periodístico del evento de 1973. (Fuente: Diario El Litoral, 13 de Junio de 1973)



Figura IX. 27. La caída del puente de la autopista (Fuente: Diario El Litoral, 14 de Junio de 1973)



Figura IX. 28. Comparación entre el evento de 194 y 1973 (Fuente: Diario el Litoral)

3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1 Digitalización de Información Cartográfica

Como oportunamente se mencionara, distintos organismos e instituciones Nacionales y Provinciales realizaron a lo largo del tiempo relevamientos cartográficos y batimétricos sobre el curso del río Salado, pero como el objetivo fundamental del presente Anexo, es determinar el comportamiento histórico del río Salado, se procedió a la digitalización del relevamiento realizado por A. y E. Fernández de la DNCPyVN, 1928.

En el mismo, que fuera descripto oportunamente en el apartado 2.1 del presente Anexo, presenta un pormenorizado relevamiento del curso principal del río Salado, realizado por medio de los elementos disponibles por aquel entonces, es decir mediante triangulación a sextante y levantamiento por cable, desde la zona de Cuatro Bocas hasta el kilómetro 83 del río Salado.

Este trabajo es de destacar, dado que por tratarse de un relevamiento realizado sin el empleo de los métodos más precisos que se disponen en la actualidad, presenta una precisión digna de ellos. Como ejemplo de dicha precisión, en las Figura IX. 29 y Figura IX. 30 se muestran dos tramos del río Salado, en proximidades de la ciudad de Santa Fe, en donde se puede apreciar como fondo una imagen aérea y montada sobre ella se aprecia la planimetría de este relevamiento histórico, pudiéndose observar la elevada exactitud con que copia a la imagen, para conseguir un correcto empalme de las planimetrías, solo fue necesario realizar una pequeña corrección de 3° en la orientación del norte.

Al margen de este dato anecdótico, se digitalizaron los 94 perfiles que se presentan en el relevamiento antes mencionado, la Figura IX. 31 presenta el resultado de la digitalización, por una cuestión de escala solo se presenta una pequeña porción del tramo inferior del río Salado los tres planos originales con sus respectivos perfiles fueron digitalizados de igual manera.

En cambio las Figura IX. 32 y Figura IX. 33 ofrecen dos perfiles de los noventa y cuatro que presenta el trabajo original, el primero corresponde a uno de los puentes que atraviesa al río Salado, mientras que la segunda corresponden a un perfil tipo.



Figura IX. 29. Fotomontaje de la digitalización del relevamiento de 1928 sobre una aérea imagen actual.

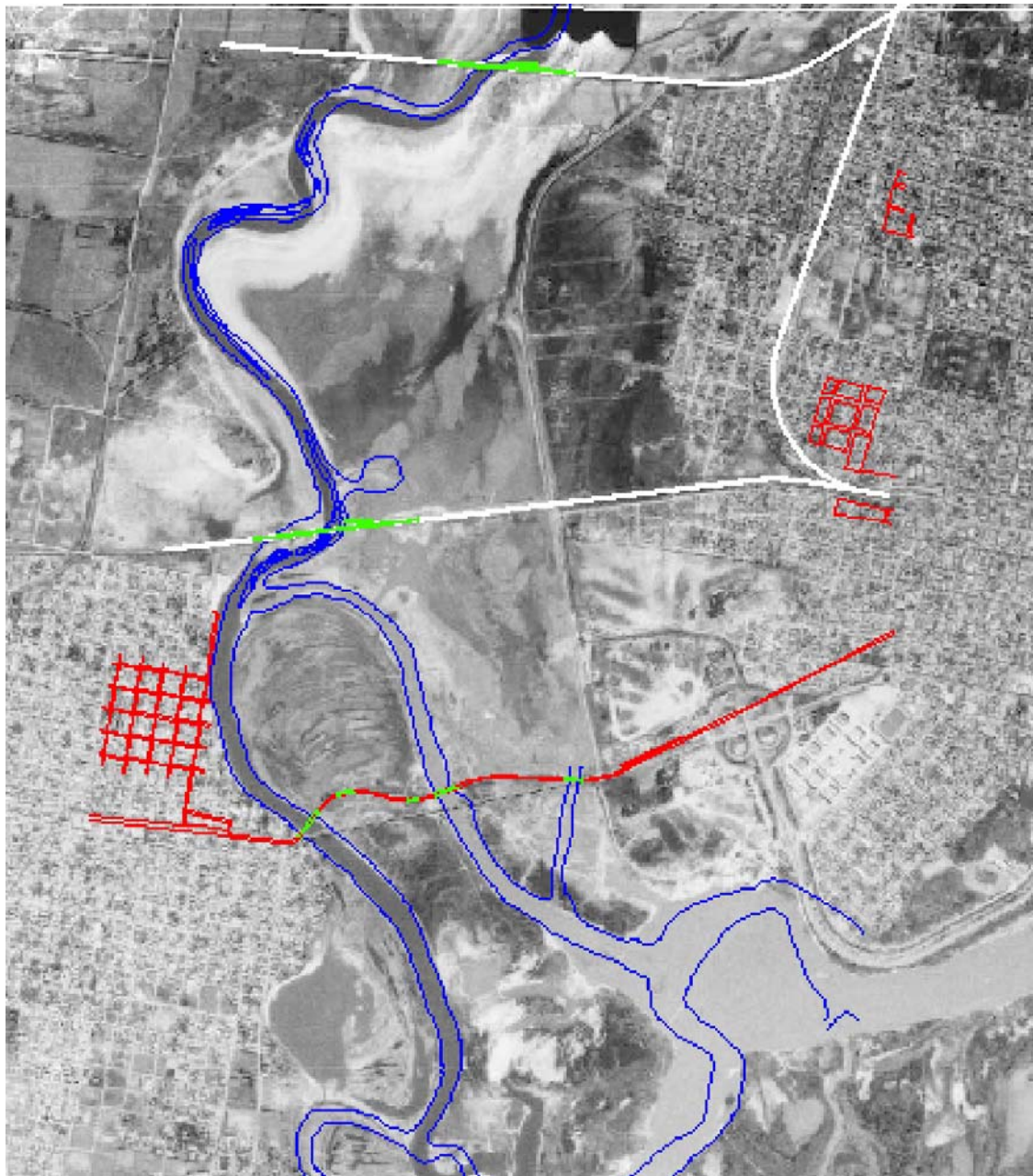


Figura IX. 30. Fotomontaje de la digitalización del relevamiento de 1928 sobre una aérea imagen actual.

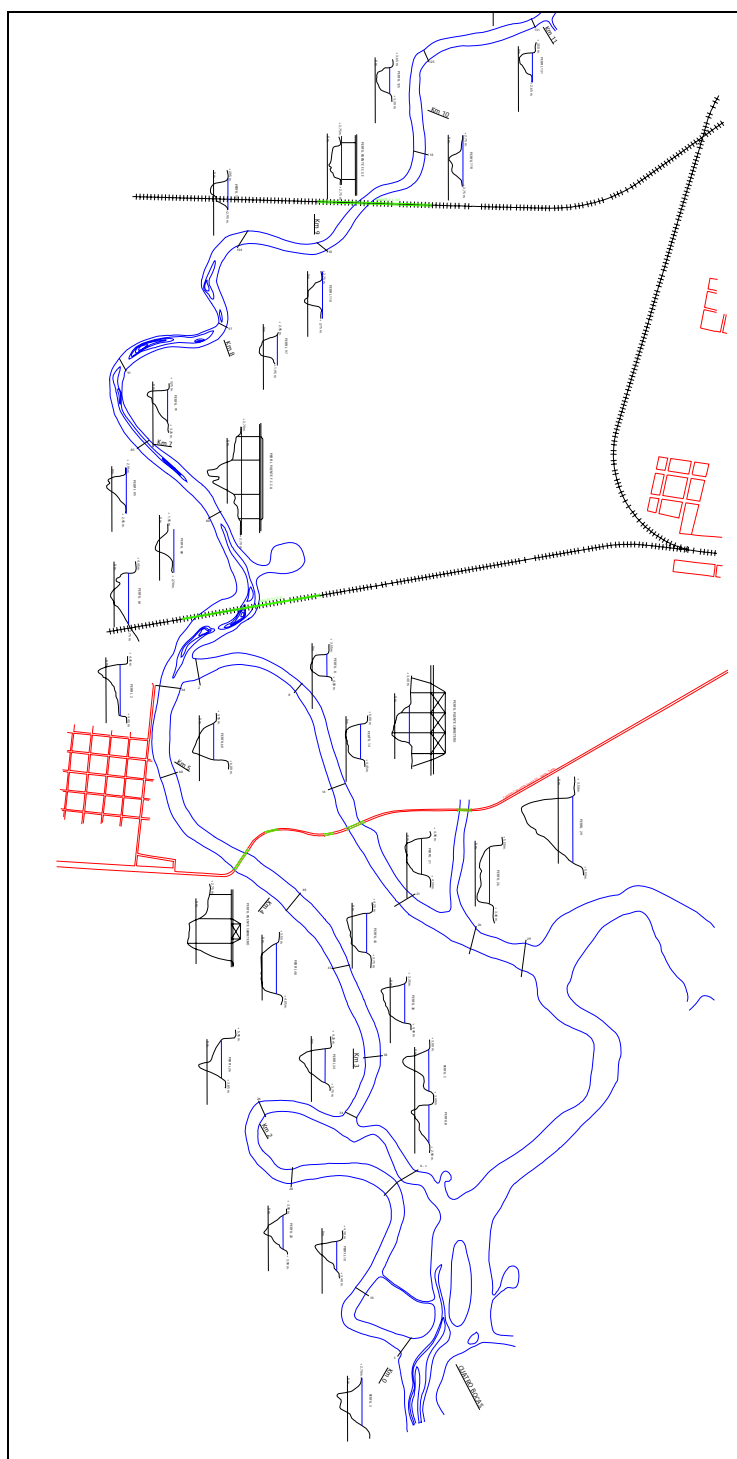


Figura IX. 31. Ejemplo del resultado de la digitalización del tramo inferior del relevamiento de A. y E. Fernández de la DNCPyVN, 1928

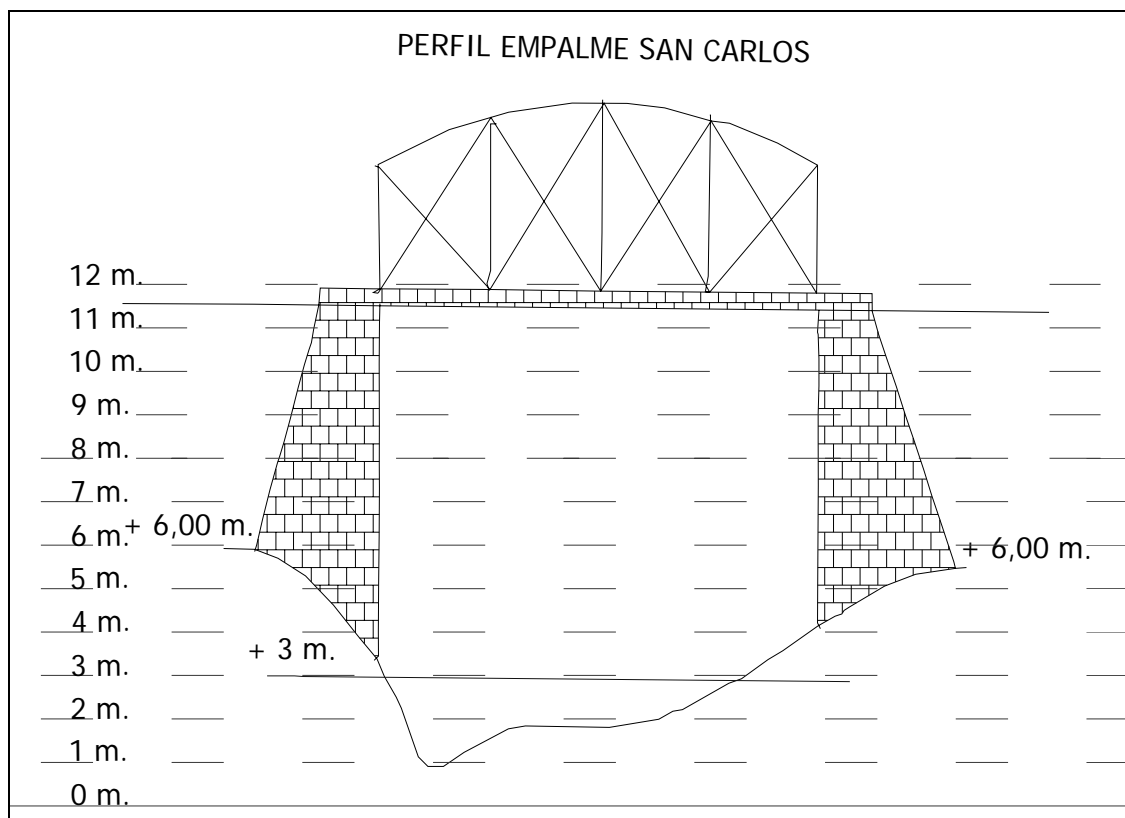


Figura IX. 32. Perfil correspondiente al Puente de Empalme San Carlos.

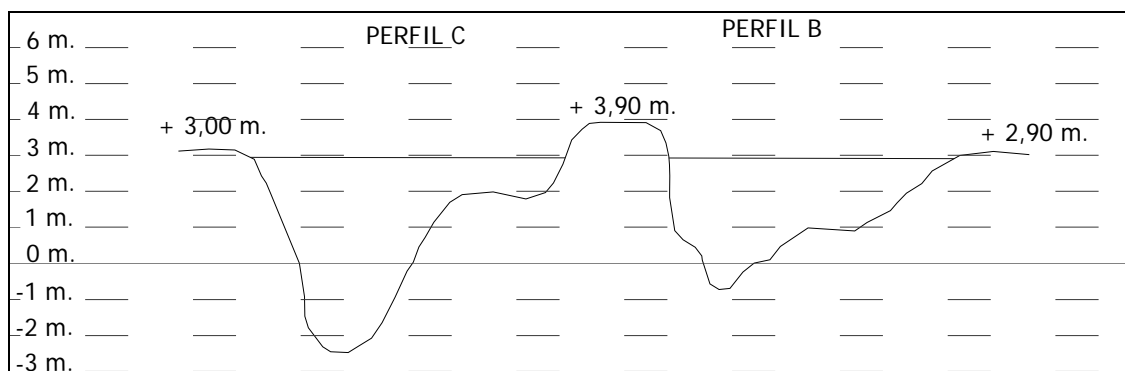


Figura IX. 33. Perfil tipo del río Salado, correspondiente a la zona próxima a la desembocadura del mismo.

3.2 Procesamiento de información Hidrométrica

La DNPyVN, apporto además de todo el material cartográfico previamente citado, datos limnigráficos, referentes a distintas estaciones que operaban en el curso del río Salado, ellas son:

1. Cuatro Bocas: Años 1914, 1929, 1973, la cota del cero de dicha estación es 8,901 m snm.
2. Empalme San Carlos: Serie Completa 1928-1993, cota del cero 9,019 m snm, está serie presente una excelente calidad, con solo un faltante del 4,74%, sobre todo a partir de mediados de la década del 80'.
3. Puente Mihura: Año 1973. Cota cero: 9.913 m snm

Otra parte de la información empleada en el presenta Anexo, fue brinda por el Sistema Nacional de Información Hídrica de la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación, la cual apporto datos de alturas y caudales de 3 estaciones, a saber:

1. Ruta Provincial 70 (RP70, Actual camino a Esperanza), serie sistemática de niveles desde 1952-2005, con un faltante del 11,56 %, Caudales Medios diarios en el periodo 1954-2004. Además de un resumen de las campañas de aforo desde 1990 hasta la actualidad.
2. Colastiné R168. Serie de Caudales Medios Diarios período 1903-2004, con un faltante del 10,54%.
3. Laguna Setúbal-La Guardia. Serie de Caudales Medios Diarios período 1905-2004, con un faltante de solo el 0,16%.

3.3 Modelación Hidráulica Histórica del río Salado

3.3.1 Generalidades del Modelo Hidráulico

Con la finalidad de estimar los caudales de los eventos históricos de los cuales se pudo recoger información, es que se confecciono en HEC-RAS 3.1.3© un modelo Hidráulico, entre el puente de Paso del Vinal (Esperanza) y la desembocadura del río Salado en Cuatro Bocas.

Para ello, se empleó una combinación de la información cartográfica digitalizada de A. y E. Fernández de la DNCPyVN (1928) en combinación con los perfiles que fueran confeccionados por INCOCIV (2003), teniendo en cuenta para ello, la progresiva y la ubicación del cauce. Esto es así debido a dos factores principales, a saber;

- i. Los 94 perfiles brindados por el relevamiento de 1928, no se extienden más allá del cauce principal del río Salado, por ende, los perfiles empleados surgen de la

combinación con los perfiles de INCOCIV (2003), los cuales son utilizados para representar las planicies de inundación.

- ii. Si bien la información cartográfica de 1928 llega hasta el kilómetro 83 del curso, la perfilaría solo llega hasta el Puente Mihura, y de allí en adelante solo se presenta la planimetría general y la pendiente de fondo del cauce principal. Por ese motivo desde aguas arriba de puente Mihura y hasta 2500 m aguas arriba del Puente de Paso del Vinal, es que se adoptan los perfiles de INCOCIV tanto de las planicies de inundación como del cauce principal.

Otro punto importante a la hora de armar el modelo, fue que si bien los perfiles de 1928, se encontraba referenciados aun mismo cero, la cota del mismo no se encontraba expresada. Por lo cual, el ajuste del mismo se llevo a cabo mediante la consideración de las cotas de los tableros de los puentes ferroviarios, la mayoría de los cuales existen hoy en día, la Tabla IX. 1, presenta la información referida a la cota IGM de los distintos puentes que atraviesan al río Salado, esta información fue en parte brindada por el Ministerio de Asuntos Hídricos de Santa Fe.

Tabla IX. 1. Cota IGM de distintos puentes sobre la cuenca del río Salado

Lugar	Cota [m snm]	Observaciones
RP 39	44,89	A° Retobado
RP 39	44,87	Puente Principal
RP 2	38,54	Puente Principal
RP 2	37,45	Riel FFCC
RP 61	37,70	Pte Principal – Primer tramo estribo lado Soledad
RP 62	32,34	Puente Principal y aliviaderos
RP 80-S	26,83	Puente Principal
RP 4	27,33	Viaducto lado San Cristóbal
RP 4	27,17	Riel FFCC
RP 6	24,01 – 23,54	Lado Esperanza – Lado Manucho
RP 70	19,38	Puente Principal
Mihura	18,10	Puente Mihura (1928)
Empalme San Carlos	20,45	Puente Ferroviario
AP 01	20,00	Puente Principal
FCSF	14,80	Puente Ferroviario
FCCA	15,80	Puente Ferroviario
RN 11	18,68	Puente Carretero
Notas:		
RN: Ruta Nacional, RP: Ruta Provincias, AP: Autopista		

Luego de realizado el ajuste de la cota cero del relevamiento histórico, se observó, la existencia de una muy buena coincidencia entre todos los perfiles del cauce principal y las planicies de inundación adoptadas de la perfilaría provista por la fuente más reciente .

Además como otro elemento de control, se contó con el valor del cero de escala de las 3 estaciones limnimétricas de la DNCPyVN que operaron en el río Salado, es decir, Cuatro Bocas, en donde la cota del cero de dicha estación es 8,901 m snm. Empalme San Carlos, cuya cota es de 9,019 m snm, y por último Puente Mihura con cota cero en 9.913 m snm, la cual se hallaba representada en el perfil correspondiente del relevamiento realizado A. y E. Fernández de la DNCPyVN, 1928.

En lo referido a los perfiles que se encuentran frente a la ciudad de Santa Fe los mismos fueron extendidos hacia la margen izquierda (ciudad de Santa Fe) mediante el empleo de las curvas de nivel, ya que en la versión reciente disponible (INCOCIV, 2003) solo se llega hasta la cota de la defensa lateral.

3.3.2 Calibración y ajuste del Modelo Hidráulico

Gracias a la recopilación del material histórico se pudo determinar la existencia de tres eventos sumamente significativos en la historia del río Salado. Es decir, las crecidas de 1886, 1914 y 1929, y teniendo en cuenta, que se reunió información más que suficiente para la confección de un modelo hidráulico que responde a las características físicas del curso para el año de 1928, es que se decidió emplear el evento registrado en marzo de 1929 como evento de calibración.

A continuación, se realiza un listado de la información hidrológica disponible para llevar a cabo este análisis, como primera medida se contó con 2 puntos de control, los cuales son presentados en la Tabla IX. 2, más un tercer punto que como ya fuera citado oportunamente, fue brindado por un plano del la ciudad de Santa Fe, en donde, se destaca la curva de inundación de este evento la cual es coincidente con la curva de nivel de 15 m snm (aproximadamente).

Tabla IX. 2. Resumen de la información disponible para la calibración del evento de 1929

Lugar	Cota Observada en 1929 [m snm]	Fuente
Cuatro Bocas	15,18	DNCPyVN
Empalme San Carlos	15,18	DNCPyVN
Línea de Inundación	~15,00	Plano década del 30

Teniendo en cuenta, estos datos y tratando de representar la curva de remanso que origino este evento en el río Salado, es que se procedió a ajustar los n de Manning del modelo hasta que se obtuvieran los valores deseados, al igual que los caudales escurridos, de está manera se logro estimar cual fue el caudal del río Salado que hubiera originado los niveles observados.

La Tabla IX. 3, muestra los resultados alcanzados para un caudal de 500 m³/s, mientras que la Tabla IX. 4, presenta un resumen de los n de Manning adoptados finalmente.

Tabla IX. 3. Resumen de los niveles Observados vs Modelados

Estación	Cota Observada [m snm]	Cota Modelada [m snm]
Cuatro Bocas	15,18	15,18
Emp. San Carlos	15,18	15,20
Línea de Inundación	~15,00	15,18

Tabla IX. 4. Resumen de los n de Manning adoptados

Ubicación	n Manning
Cauce Principal en zona de desembocadura	0,028
Planicie de inundación en zona de desembocadura	0,045
Cauces secundarios en zona de desembocadura	0,030
Máximo en cauce principal	0,030
Máximo en planicie de inundación	0,075
Valor medio en la planicie de inundación	0,050
Valor medio en los cauces secundarios	0,035

Determinación del caudal para el evento 1886 y 1914

Para la modelación del evento ocurrido en abril/mayo de 1914, se considerando dos puntos de control, estos fueron el puente Mihura (el cual aparece tapado por las aguas en la Figura IX. 13) y la cota del terraplén de aproximación del puente Paso del Vinal (aprox. 22,80 m snm, en base a la fotografía Figura IX. 14). Por último se adopta como condición de borde de aguas abajo, e valor máximo observado en la estación de Cuatro Bocas, el 1° de mayo de 1914, el cual, fue de 14,05 m snm.

Teniendo en cuenta los condicionantes previamente mencionados, la modelación arroja un caudal estimado, para este evento, del orden de los 2750 m³/seg, alcanzando con este caudal los niveles observados sin necesidad de modificar los n de Manning empleados en la calibración.

De igual manera, considerando el antecedente del mayor evento registrado, que es citado en el Pliego de Condiciones para la construcción del Puente sobre el Río Salado (Bianchi, 1895) (90 cm por debajo de la cota del tablero 21,80 m snm), se obtiene un caudal para este evento histórico de 1750 m³/seg.

Determinación de caudales característicos del río Salado

Teniendo en cuenta el modelo confeccionado y calibrado se procedió a retirar todas las obras de infraestructuras existentes, para de esta manera determinar el caudal máximo posible del Paleocauce el cual fue estimado como de 10.000 m³/s; mientras que el caudal máximo del cauce principal (o cauce menor) se estimo entre los 400 a 500 m³/s, coincidente con el caudal estimado para crecidas frecuentes.

3.3.3 Análisis de incertidumbre de primer orden

De acuerdo a la metodología propuesta por Chow, et al (1995), se realizó el estudio de sensibilidad del modelo, siguiendo la metodología FOVE (*First Orden Variance Estimation*), este análisis fue realizado con base en las ecuaciones (IX.1) y (IX.2)

$$CV_Q^2 = \frac{1}{4} CV_{S_f}^2 + \frac{1}{\Psi^2} CV_{n_c}^2 + \left(\frac{\Psi - 1}{\Psi} \right)^2 CV_{n_b}^2 \quad (IX.1)$$

$$\Psi = 1 + 2 \left(\frac{n_c}{n_b} \right) \left(\frac{A_b}{A_c} \right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{P_c}{P_b} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (IX.2)$$

y contemplan las incertidumbres en el caudal como producto de incertidumbres en:

- a) el coeficiente n de Manning del canal principal (adoptando un CV = 10%);
- b) el coeficiente n de Manning en la planicie de inundación (adoptando un CV= 15%)
- c) la pendiente de la línea de energía, (adoptando un CV = 5%).

Se observa en la Tabla IX. 5 los valores máximos, medios y mínimos registrados a lo largo de todo el modelo, el cual abarca el tramo Puente Vinal-Cuatro Bocas. Los valores que encabezan cada columna de la Tabla IX. 5 son los caudales empleados en el análisis de sensibilidad.

Tabla IX. 5. Análisis de incertidumbre de primer orden sobre los caudales

	CVq											
	200	250	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Promedio	24.5%	23.7%	20.0%	16.4%	15.1%	14.5%	14.3%	14.1%	14.0%	14.0%	13.9%	13.9%
Máximo	31.7%	31.7%	31.5%	26.6%	21.6%	19.1%	19.0%	17.4%	15.9%	15.1%	14.9%	14.5%
Mínimo	14.4%	14.4%	13.8%	13.8%	13.8%	13.8%	13.8%	13.8%	13.8%	13.8%	13.8%	13.8%

Del análisis de la Tabla IX. 5 se desprende que:

1. la incertidumbre en los caudales como producto de las incertidumbres en los n de Manning y de la pendiente de energía disminuyen a medida que aumenta la magnitud de las crecidas;

2. la estimación de los caudales de grandes crecidas, es decir, aquellas superiores a 1000 m³/s y hasta 3000 m³/s, poseen una incertidumbre que varía entre 17% y 26%;
3. la estimación de caudales de crecidas recurrentes, de 200 a 500 m³/s, asociadas al cauce principal, posee una incertidumbre del orden del 31%;
4. la incertidumbre en los caudales disminuye hacia aguas abajo (esto se observa al realizar el estudio, aunque no está reflejado en esta planilla);
5. los valores correspondientes a la ruta Ruta Provincial 70 (RP70) se encuentran entre los valores medios y máximos (esto se observa al realizar el estudio, aunque no está reflejado en esta planilla);

El análisis de crecidas hasta 3.000 m³/s se justifica por el hecho de ser el rango en el cual está siendo aplicado el modelo considerado.

En síntesis, las crecidas históricas tendrían una incertidumbre máxima por las razones antes apuntadas que harían variar los caudales según lo indicado a continuación:

- Año 1886: Caudal de referencia: 1750 m³/s +/- 350 m³/s (1400 a 2100 m³/s);
- Año 1914: Caudal de referencia: 2750 m³/s +/- 500 m³/s (2250 a 3250 m³/s);
- Año 1929: Caudal de referencia: 500 m³/s +/- 150 m³/s (350 a 650 m³/s).

De igual manera se realizó el análisis de incertidumbre de los tirantes, para tal fin se empleó también la metodología propuesta por Chow, et al (1995), pero empleando la ecuación (IX.3) que es presentada a continuación:

$$s_y^2 = \frac{CV_Q^2 + CV_n^2 + \left(\frac{1}{4}\right)CV_{S_f}^2}{\left(\frac{2}{3R} \frac{dR}{dy} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dy}\right)^2} \quad (\text{IX.3})$$

Esta ecuación representa la varianza de la profundidad de flujo, y, como una función de los coeficientes de variación del caudal, del n de Manning, de la pendiente de fricción y de la función de la forma del canal.

Por este medio y haciendo variar un 15% el coeficiente de Manning, se obtienen los siguientes resultados.(Tabla IX. 6)

Tabla IX. 6. Resumen de las incertidumbres la variar un 15 %, el CV del n de Manning

	250	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
Promedio	1.68%	2.29%	3.12%	3.45%	3.08%	3.07%	3.15%	3.24%	3.40%	3.62%	3.73%
Máximo	5.15%	5.00%	5.77%	6.20%	6.30%	4.01%	4.40%	4.17%	4.38%	4.75%	4.92%
Mínimo	0.11%	0.38%	1.08%	1.61%	0.46%	0.57%	0.57%	0.65%	0.98%	2.34%	2.44%

Como conclusión se puede decir que las variaciones del n de Manning no producen cambios significativos en los niveles (siendo más sensibles con respecto a las velocidades) en el sector de control de niveles, que se ubica aproximadamente 4,5 a 5 km aguas arriba de Cuatro Bocas. La influencia del Sistema Paraná y la baja pendiente generalizada del tramo explicarían la baja sensibilidad de los niveles al n de Manning (el sector opera como un embalse en función a los niveles que presente el Sistema Paraná).

4 ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES Y CAUDALES (PERÍODO 1928-1954 RP70)

Dado a que se pudo contar con información limnimétrica de la estación Empalme San Carlos (ESC) de la DNCPyVN, la cual fuera operara durante el periodo comprendió entre 1928-1993, y que se halla localizada aguas abajo de la estación de Ruta Provincial 70 (RP 70) la cual posee datos sistemáticos a partir de 1954 hasta la actualidad.

Se plantea el aprovechamiento de la primera niveles de ESC, para extender la longitud de la serie sistemática de caudales en la RP70. Para tal fin, se utilizo al periodo en que ambas estaciones funcionaron simultáneamente para calibrar mediante el empleo de regresiones lineales, un modelo que fuera capaz de transformar los niveles observados en ESC, en niveles en RP70, para su posterior transformación en caudales admitiendo por simplificación que no hubo cambios de la sección.

Esta hipótesis es considerada apropiada a los efectos de ser empleada en la estimación del orden de magnitud de las crecidas, máximas anuales de la RP70.

A modo de prueba y de comprobación de la hipótesis, se planteo un modelo de regresión para caudales (Q) y alturas (H), en el periodo 1954-1993, en donde las variables explicativas son el caudal de Laguna Setúbal (adoptada como reflejo del sistema Paraná) y las alturas observadas en ESC y RP70.

También se optó por restringir la aplicación del ajuste, que como se detallaran más adelante en el presente Anexo, permiten tener en cuenta los efectos del Sistema Paraná sobre el río Salado. En una primera aproximación, estas condiciones fueron:

- i. Caudal mayor o igual a 500 m³/s en RP70
- ii. Caudal menor o igual a 1500 m³/s en Laguna Setúbal.

Bajo estas condiciones los resultados alcanzados fueron excelentes para los dos casos ($R^2 > 0,99$) y los mismos son presentados en las Figura IX. 34 y Figura IX. 35, donde el valor porcentual, indica el porcentaje de la serie que fuera empleada en el ajuste del modelo.

Ya con fines de simulación, se calibró nuevamente el modelo de regresión lineal simple, pero en está oportunidad las variables explicativas fueron el Q de Laguna Setúbal y los niveles de la estación ESC, mientras que, se empleaba el nivel de la RP70 como variable a explicar, respetando los condicionantes iniciales, los resultados alcanzados se muestran en la Figura IX. 36, en donde el coeficiente de correlación múltiple alcanzado fue de 0,81.

Luego la Figura IX. 37, ofrece el resultado de la calibración, pero está vez se emplea el Q de Laguna Setúbal y los niveles ESC como variables, mientras que, se utiliza el caudal de la RP70 como la variable a explicar, mediante este ajuste se alcanza un coeficiente de correlación múltiple igual a 0,80.

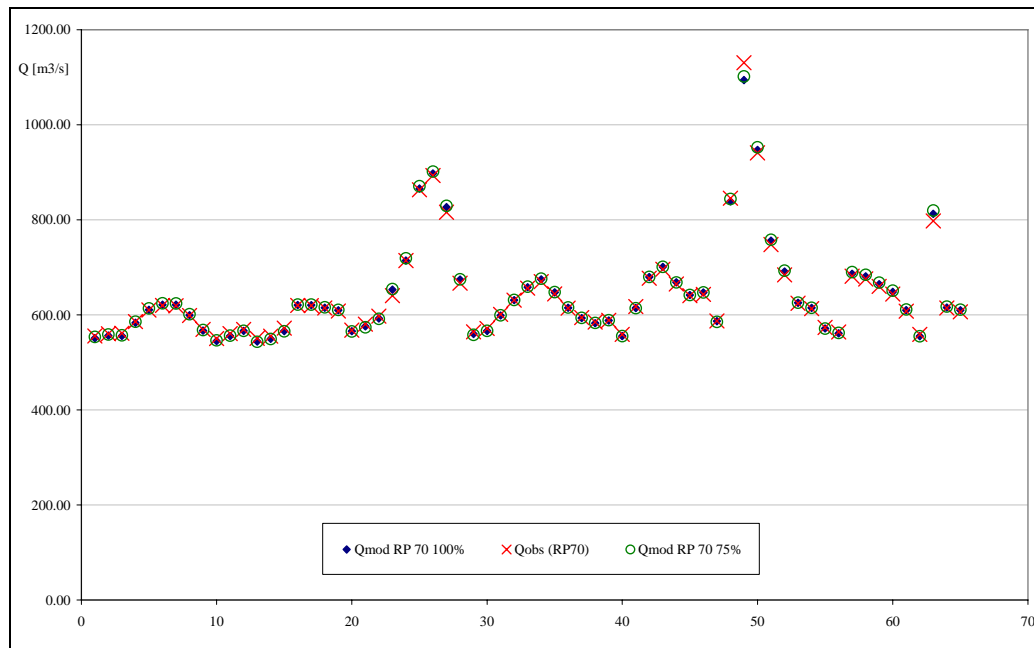


Figura IX. 34. Grafico de los resultados alcanzados (Calibración Q)

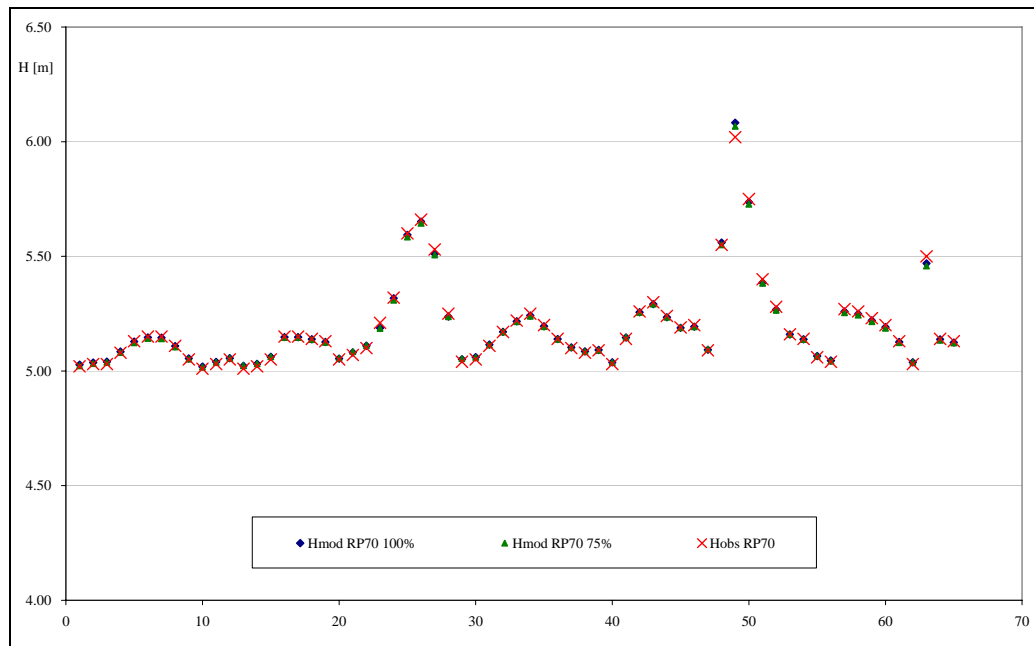


Figura IX. 35. Grafico de los resultados alcanzados (Calibración H)

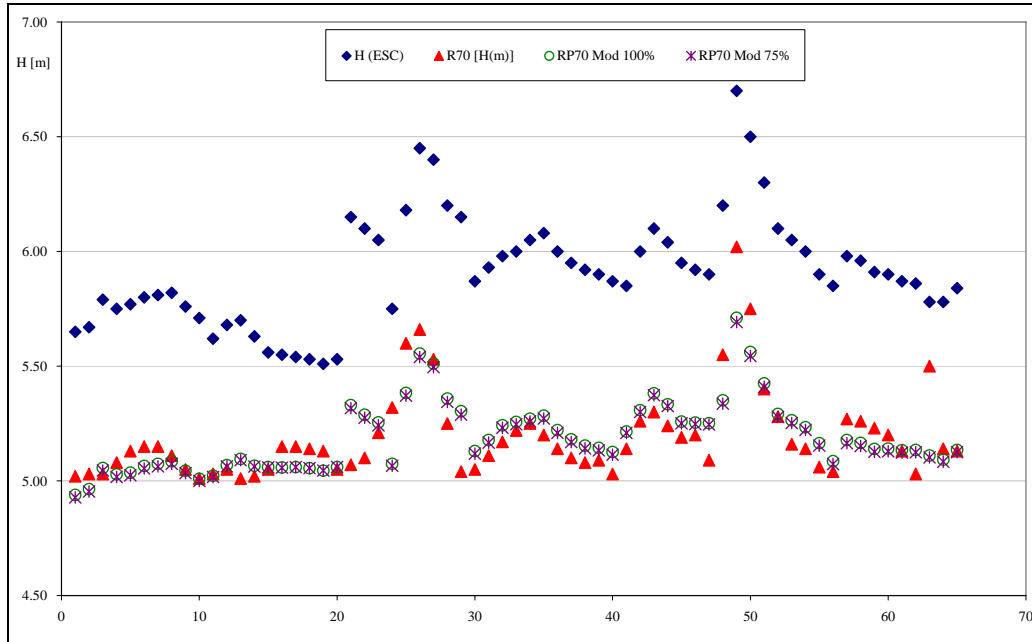


Figura IX. 36. Resultado Modelo de regresión lineal para alturas en RP70

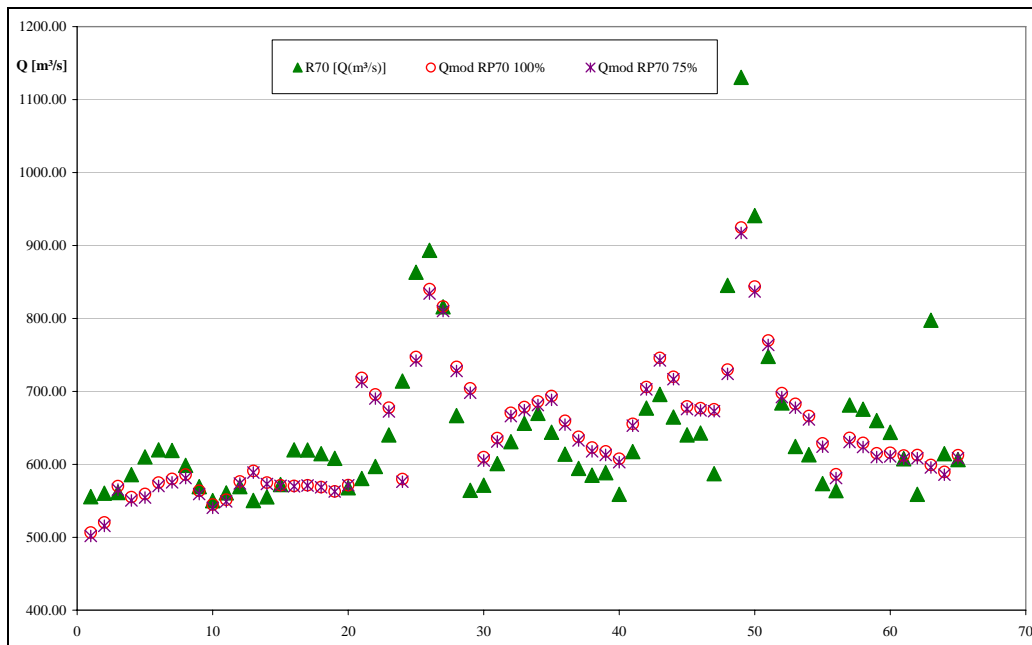


Figura IX. 37. Resultado Modelo de regresión lineal para caudales en RP70

Una vez que se pudo ver la factibilidad de poder ajustar un modelo de este tipo, se procedió a realizar un nuevo filtrado en la serie de ajuste, las nuevas condiciones adoptadas fueron un caudal mayor o igual a 350 m³/s en RP70 y un caudal menor o igual a 1750 m³/s en Laguna Setúbal, con este filtrado la nueva serie paso de tener un tamaño muestral de 69 datos a 500, para el periodo bajo análisis 1954-1993.

Con esta nueva calibración la calidad del modelo aumento notablemente obteniéndose un coeficiente de correlación múltiple para H y Q superior al 0.86 (para las 500 observaciones), adoptándose para extender la serie de niveles de RP70, del periodo original 1954-2005 a 1928-2005. A continuación se presenta el grafico de la calibración en el periodo 1954-1993 (Figura IX. 38)

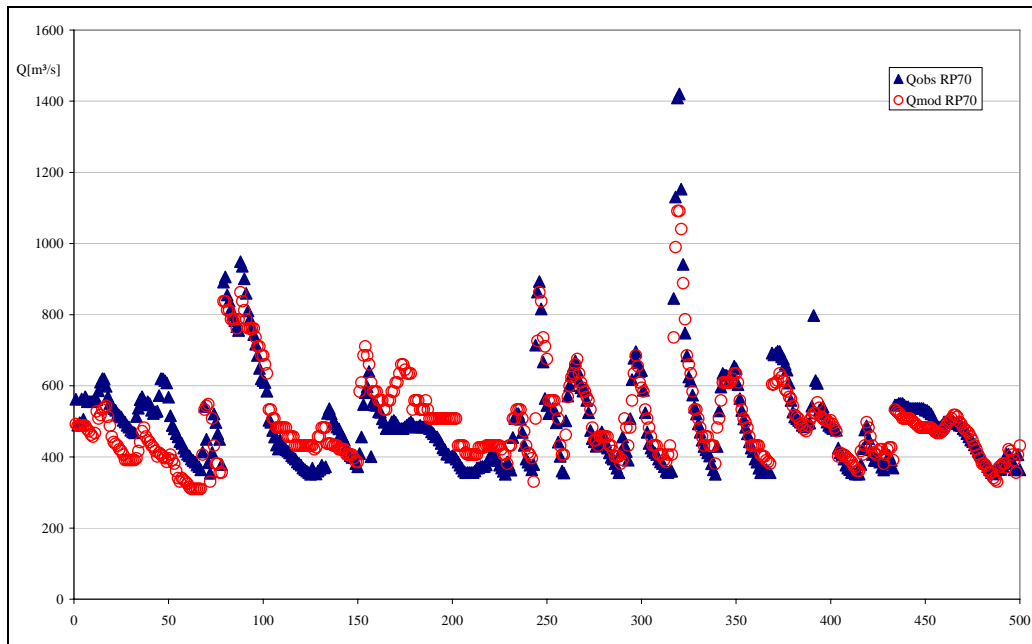


Figura IX. 38. Valores de caudal observados vs calibrados para la RP70. (Periodo 1954-1993)

5 EFECTOS DEL SISTEMA PARANÁ SOBRE LA ESTACIÓN DE RP70

Durante el análisis de la serie de alturas y caudales de la estación Ruta Provincial 70, se pudo detectar la presencia de distintos valores de caudal para una misma altura, acusando la falta de existencia de una relación biunívoca en dicha estación. Las posibles causas de esta variación podrían estar dadas por un cambio en la sección de aforo, o eventualmente, por la influencia de efectos de remanso ocasionados por niveles elevados del Sistema Paraná sobre la misma.

Las Figura IX. 39 y Figura IX. 40, reflejan la relación H-Q existente en la serie sistemática de la estación RP70, en ella puede apreciarse por lo menos tres curvas distintas, a su vez, en la misma figura se identifican todos los máximos anuales del período 1954-2005 y los aforos realizados en el periodo 1990-2004 (Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos)

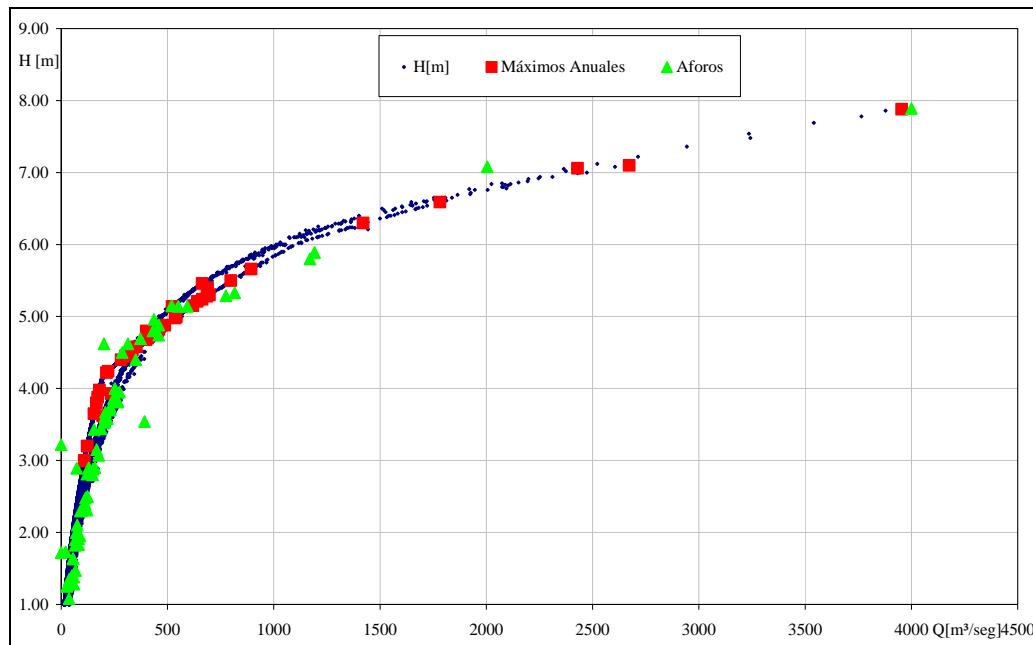


Figura IX. 39. Relación H-Q RP70. (se indican los máximos anuales y los aforos realizados)

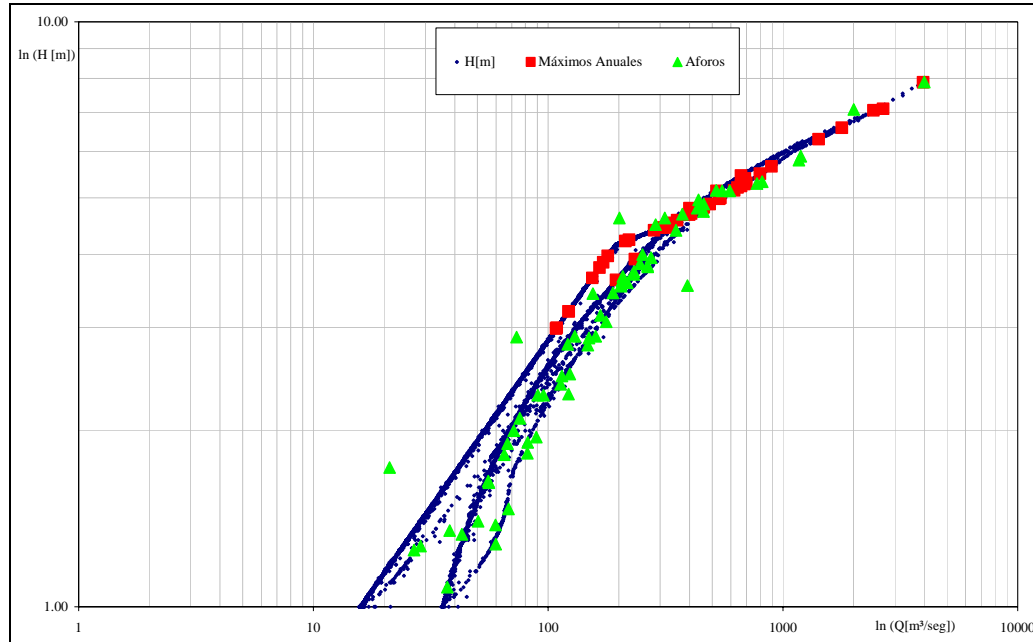


Figura IX. 40. Relación H-Q RP 70 en escala logarítmica para facilitar su interpretación.

Ante la existencia de esta incertidumbre, se analizaron las posibles causas, a fin de determinar cual era el motivo de la existencia de las distintas curvas.

5.1 Identificación de las condiciones en que fueron realizados los aforos en RP70

Como primer paso en la determinación de la influencia del Sistema Paraná sobre la estación RP70, se procedió a identificar en la serie de caudales diarios que valores correspondieron a los aforos realizados, junto a la identificación de crecidas en el Sistema Paraná, para de esa manera poder cuantificar el orden de magnitud de las influencias del sistema mayor sobre los caudales en la RP70. (Figura IX. 41)

Mediante el empleo de la serie cronológica de Laguna Setúbal y Colastiné (empleada a los fines de verificación) en representación del Sistema Paraná y de la estación Empalme San Carlos (DNPYVN) y RP70, como representantes del río Salado. Se procedió al estudio de la correlación existente entre las mismas, la cual es un muy buen indicativo de la influencia del Sistema Paraná sobre el río Salado

Teóricamente, Empalme San Carlos se encuentra fuertemente influenciado por el Sistema Paraná ante crecidas regulares del mismo, esto es así por su proximidad a la desembocadura del Salado, mientras que en crecidas importantes del río Salado, podría asumirse sin

influencia, comportándose de forma muy similar a la RP70, dado a que no existen aportes significativos, en el tramo que los separa. La Tabla IX. 7 ofrece un resumen estadístico de las estaciones, junto con los indicadores de calidad de las mismas.

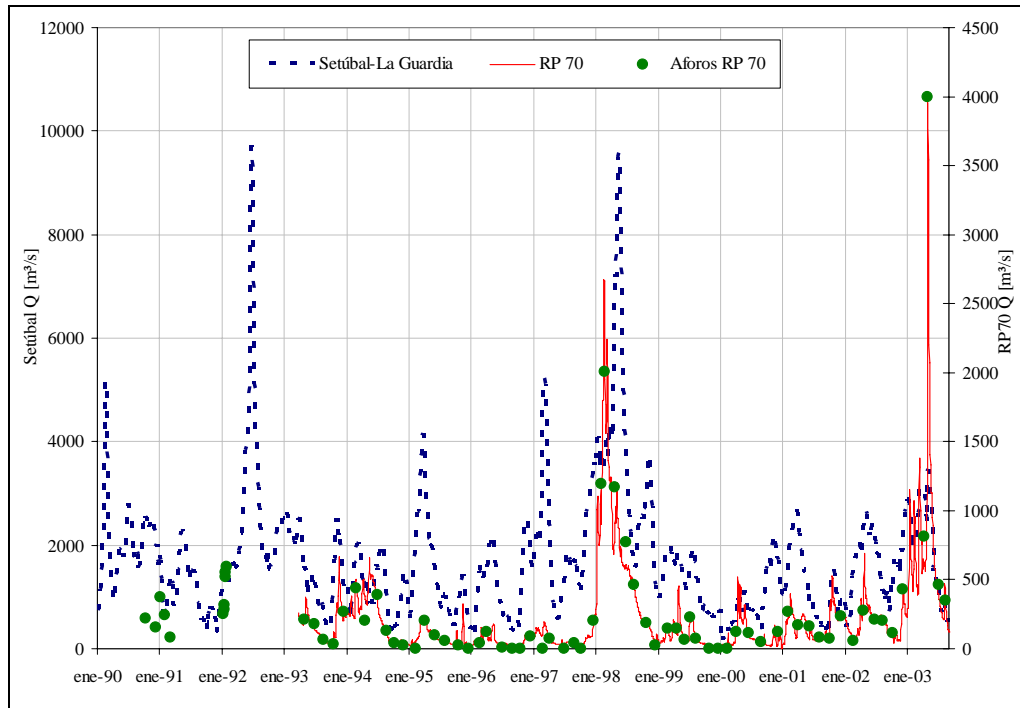


Figura IX. 41. Identificación de los aforos en el periodo 1990-2004

Tabla IX. 7. Resumen Estadístico de las series empleadas

	Colastiné R168	Setúbal-La Guardia	Empalme San Carlos	R70
Media	1738.0	1100.4	3.8	2.5
Error típico	3.9	5.8	0.0	0.0
Mediana	1585.6	886.1	3.8	2.2
Moda	1569.2	0.0	3.5	1.0
Desviación estándar	701.8	1100.8	1.2	1.5
Varianza de la muestra	492549.4	1211849.1	1.6	2.2
Curtosis	7.4	20.7	-0.9	-0.8
Coefficiente de asimetría	2.0	3.2	0.0	0.4
Rango	6255.7	13824.0	7.0	7.8
Mínimo	590.0	0.0	0.9	0.1
Máximo	6845.6	13824.0	7.9	7.9
Suma	57368858.2	39993336.1	87012.1	40748.4
Cantidad de valores	33009.0	36344.0	22850.0	16531.0
Período	1903-2004	1905-2004	1928-1993	1954-2005
Datos faltantes en el periodo	3889	59	911	2280
Porcentaje de faltantes en la serie	10.54%	0.16%	4.7%	11.76%

En la Tabla IX. 8, se pueden apreciar los coeficientes de correlación cruzada entre las distintas estaciones, de ella se puede sacar algunas conclusiones interesantes:

1. Como era de esperar, Colastiné y Setúbal se encuentran fuertemente correlacionadas, por lo que indicaría una buena representación del Sistema Paraná
2. Empalme San Carlos, al estar próximo a la desembocadura del Salado en el Paraná (27 km aproximadamente) se encuentra influenciado por el mismo el 61 % de las veces.
3. La limnimetría de la Ruta Provincial 70 presenta una muy buena correlación con Empalme San Carlos, cosa que era de esperar dado que no existen aportes significativos en ese tramo del curso, por lo que una creciente en RP70 se tiene que ver reflejada en ESC (91 % de las veces)
4. No es menor la influencia del Sistema Paraná (aquí representado por Laguna Setúbal) sobre la RP70 (localizada a 47 km de la desembocadura), dado que el 47% de las veces, que se registro un aumento de caudales en Laguna Setúbal estos influyeron en RP70, lo que habla a las claras de que la estación en estudio no es la mejor sección de aforo, por que puede hallarse influenciada por las crecidas del Paraná.
5. También analizando la correlación entre las alturas y los caudales de RP70 se puede apreciar la relación no biunívoca de la relación H-Q

Tabla IX. 8. Coeficientes de correlación cruzada.

	Colastiné R168	Setúbal-La Guardia	Empalme San Carlos	R70 [H(m)]	R70 [Q(m³/s)]
Colastiné R168	1,00				
Setúbal-La Guardia	0.97	1,00			
Empalme San Carlos	0.66	0.61	1,00		
R70 [H(m)]	0.48	0.47	0.91	1,00	
R70 [Q(m³/s)]	0.37	0.38	0.70	0.76	1,00

5.2 Identificación de distintos tipos de flujo

Del análisis de la serie de caudales de la RP70, ESC y Laguna Setúbal, se pudo establecer luego de la aplicación de numerosos filtros, que cuando los caudales de Laguna Setúbal son superiores a los 1750 m³/s, no se puede afirmar que los niveles en la RP70, se encuentren libres de la influencia del Sistema Paraná, por ese motivo se adopta tal valor como filtro el

cual, permite afirmar que la estación RP70 se encuentra sin influencia o en un “*flujo uniforme*”.

La Figura IX. 42 permite observar los valores de la serie filtrada y los aforos realizados en periodos con influencia del Sistema Paraná (“*flujo gradualmente variado*”) y sin influencia del mismo, en ella se puede apreciar que luego de la aplicación del filtro antes mencionado, se logra obtener una única curva H-Q para la estación RP70

Teniendo en cuenta esta nueva serie de alturas y caudales en RP70, se ajusto una expresión analítica que permitiera obtener la relación H-Q sin influencias del Sistema Paraná, la misma se encuentra compuesta de dos tramos y se la puede observar en la Figura IX. 44.

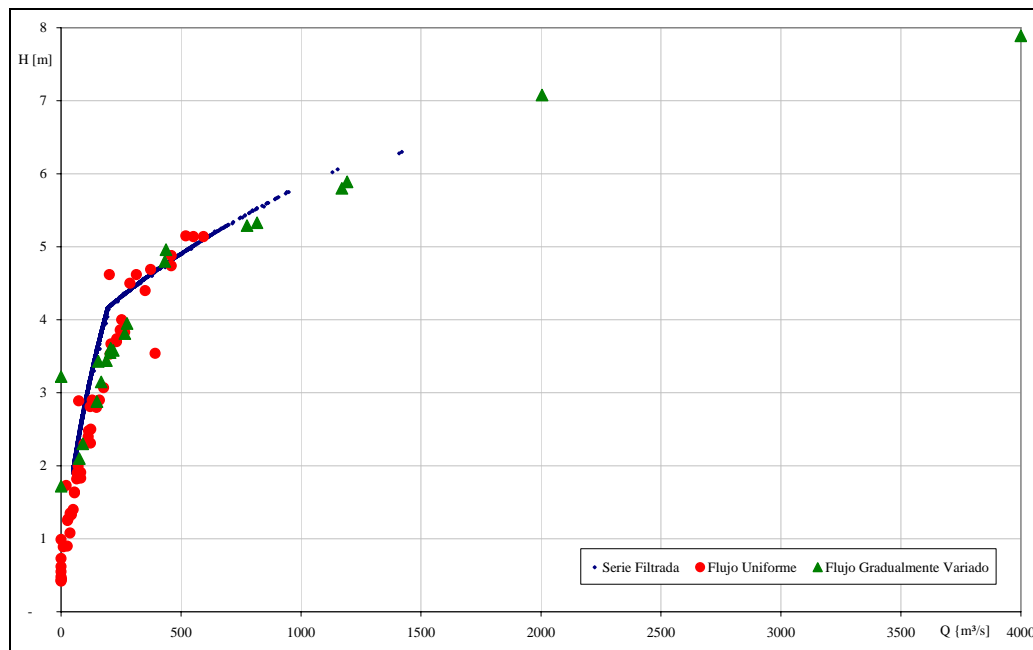


Figura IX. 42. Relación H-Q en RP70, luego de la aplicación de un filtro en Laguna Setúbal ($Q=1750 \text{ m}^3/\text{s}$) e identificación de las condiciones de aforo.

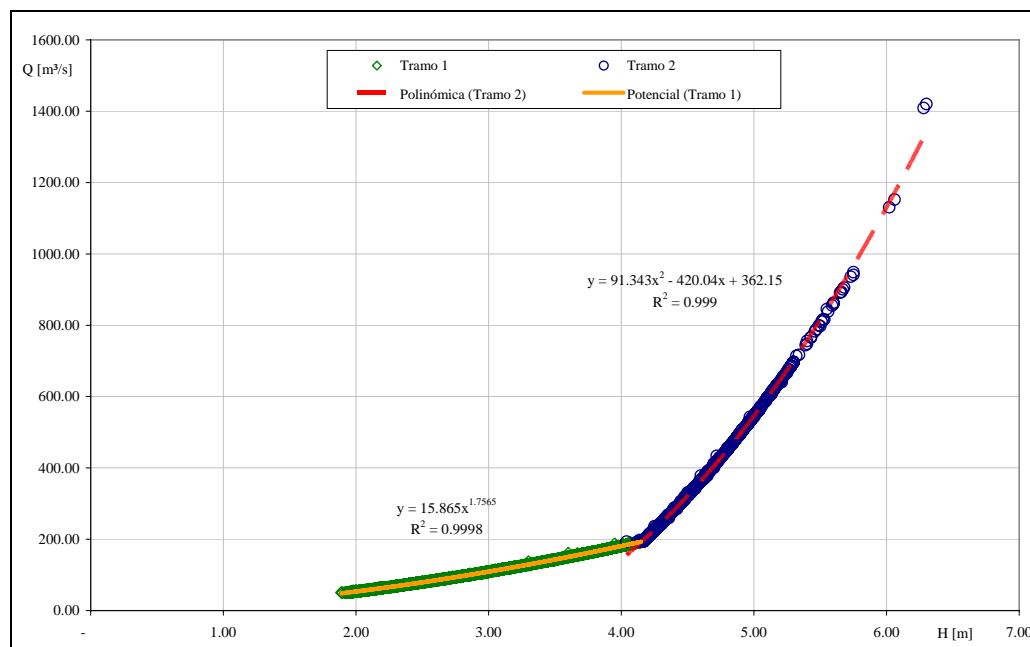


Figura IX. 43. Ajuste de funciones analíticas H-Q en la RP70, en base a la serie filtrada por efecto de remanso del Sistema Paraná.

6 CORRECCIÓN DE CAUDALES POR EFECTO DE REMANSO

Teniendo en cuenta las consideraciones previas, es que se procede a la corrección de los caudales, la cual se basa en emplear los niveles de una estación de aguas abajo (ESC) para corregir por medio de las ecuaciones de Saint Venant los caudales de aguas arriba (RP70). Además se presentan la modelación de las curvas de remanso en función de los niveles del Sistema Paraná y los caudales del Río Salado empleando para tal fin el Modelo Hidráulico Histórico (confeccionado con los datos de 1928) y el Modelo Hidráulico confeccionado con la información actual presentado en el Anexo V.

6.1 Corrección Analítica - Ecuaciones de Saint Venant

6.1.1 Principios Teóricos

El escurrimiento superficial se encuentra regido por leyes físicas que son representadas cuantitativamente por variables tales como el caudal (Q), la profundidad (h) y la velocidad (V). Mientras que el comportamiento del mismo, es descrito por tres principios fundamentales, a saber;

- *Conservación de la Masa.*, (1^{er} Ecuación de Saint Venant (1871))

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (\text{IX.4})$$

- *Conservación de la Cantidad de Movimiento.* (2^{da} Ecuación de Saint Venant (1871))

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x} = g \cdot A \cdot (S_0 - S_f) \quad (\text{IX.5})$$

- *Conservación de energía* (la cual normalmente no es empleada en flujo a superficie libre)

Tabla IX. 9. Resumen de las Ecuaciones de Saint Venant. (fuente Chow, et al (1999))

<i>Ecuación de continuidad</i>					
Forma conservativa		$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$			
Forma no conservativa		$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$			
<i>Ecuación de momentum</i>					
Forma conservativa					
$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0$					
Término de aceleración local	Término de aceleración convectiva	Término de fuerza de presión	Término de fuerza gravitacional	Término de fuerza de fricción	
Forma no conservativa (elemento de ancho unitario)					
$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0$					
				Onda cinemática	
				Onda de difusión	
				Onda dinámica	
* Despreciando flujo lateral, cortante por viento, pérdidas por corrientes de eddy y suponiendo que $\beta = 1$.					

Clasificación del Esguerrimiento Superficial

La forma de clasificar el Esguerrimiento Superficial suele hacerse en función del tiempo, el espacio y sus respectivas combinaciones. De acuerdo a esta, el esguerrimiento es clasificado en *función del tiempo*, como:

- *Permanente.*

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \tag{IX.6}$$

- *No Permanente.*

$$\frac{\partial A}{\partial t} \neq 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0 \tag{IX.7}$$

Mientras que si se realiza en función del espacio, este puede ser:

- *Uniforme.*

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = 0 \tag{IX.8}$$

- *No Uniforme o Variado.*

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \neq 0 \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) \neq 0 \quad (\text{IX.9})$$

De estas clasificaciones pueden surgir las siguientes combinaciones:

- *Permanente* → *Uniforme* (Clásico en Canales)
 - *No Uniforme* → *Gradualmente Variado*
 - *Rápidamente Variado*
- *No Permanente* → *Uniforme* (Teórico, No empleado en la practica)
 - *No Uniforme* → *Gradualmente Variado*
 - *Rápidamente Variado*

Las ecuaciones de Saint Venant, a pesar de las simplificaciones adoptadas, son capaces de representar la mayoría de los problemas de escurrimientos en ríos, canales, embalses y sobre la cuenca de aporte.

El escurrimiento de una onda de creciente en un canal produce la atenuación y disminución de la onda debido al:

- Almacenamiento (tanto en el canal principal como en las planicies de inundación)
- Rugosidad entre las superficies del canal y difusión debido al gradiente de presión.

En las ecuaciones de Saint Venant, esos efectos son representados por medio de la ecuación de continuidad (1^{er} Ecuación) que considera la amortiguación debido a la variación de la capacidad de almacenamiento del sistema y a la ecuación de la cantidad de movimiento (2^{da} Ecuación) que representa a la gravedad, agotamiento, presión e inercia del flujo.

6.1.2 Deducción de la ecuación empleada en la corrección de caudales en RP70

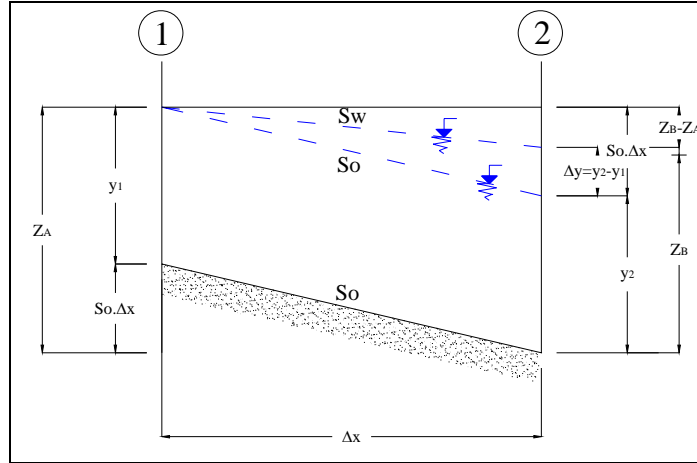


Figura IX. 44. Componentes de la ecuación de Flujo Gradualmente Variado

De acuerdo a lo previamente citado, la segunda ecuación de Saint Venant (IX.5), puede ser expresada para flujo Gradualmente Variado como;

$$g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x} = g \cdot A \cdot S_0 - g \cdot A \cdot S_f \quad (\text{IX.10})$$

simplificando y reordenando, se obtiene que la pendiente de energía es igual a;

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (\text{IX.11})$$

En cambio, para flujo uniforme, la expresión IX.5, se puede expresar como;

$$0 = g \cdot A \cdot S_0 - g \cdot A \cdot S_f \quad \therefore \quad S_0 = S_f \quad (\text{IX.12})$$

En donde la pendiente de energía es igual a la pendiente de fondo.

Otra forma de expresar la ecuación de Saint Venant (IX.5), es por medio de la ecuación de Chezy, en donde

$$Q = C \cdot R^{\frac{1}{2}} \sqrt{\left(S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \cdot \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \right)} \quad (\text{IX.13})$$

Por lo tanto, aplicando la ecuación de Manning para flujo gradualmente variado se obtiene

$$Q_{gv} = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \sqrt{\left(S_0 - \frac{\partial y}{\partial x}\right)} \quad (\text{IX.14})$$

Y considerando la relación entre el caudal a flujo uniforme y gradualmente variado se obtiene la expresión IX.16, la cual es empleada para realizar la corrección de los caudales de la estación RP70 cuando los caudales de Laguna Setúbal superen los 1750 m³/s

$$\frac{Q_{gv}}{Q_u} = \frac{\frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \sqrt{\left(S_0 - \frac{\partial y}{\partial x}\right)}}{\frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \sqrt{S_0}} = \sqrt{\frac{S_0 - \frac{\partial y}{\partial x}}{S_0}} = \sqrt{1 - \frac{\frac{\partial y}{\partial x}}{S_0}} \quad (\text{IX.15})$$

$$Q_{gv} = Q_u \cdot \sqrt{1 - \frac{\frac{\Delta y}{\Delta x}}{S_0}} \quad (\text{IX.16})$$

Si $Z_A - Z_B < S_0 \cdot \Delta x$ entonces no existe efecto de aguas abajo, donde Z_A son los niveles en RP70 y Z_B los niveles de Empalme San Carlos (ESC)

6.1.3 Procedimiento de corrección

A continuación se presenta un resume de la metodología empleada, para llevar a cabo la corrección por efecto de remanso del río Salado debido a elevados niveles del Sistema Paraná para la serie de caudales en la estación de la RP70.

Como primera media se procedió al reconocimiento de la serie de las estaciones de RP70, ESC y Laguna Setúbal, para de esta manera obtener un acabado conocimiento del comportamiento de las mismas. Un ejemplo de esta comparación se presenta en las Figura IX. 45 y Figura IX. 46, las cuales corresponden a la serie de niveles y caudales de las distintas estaciones analizadas en dos años hidrológicos distintos.

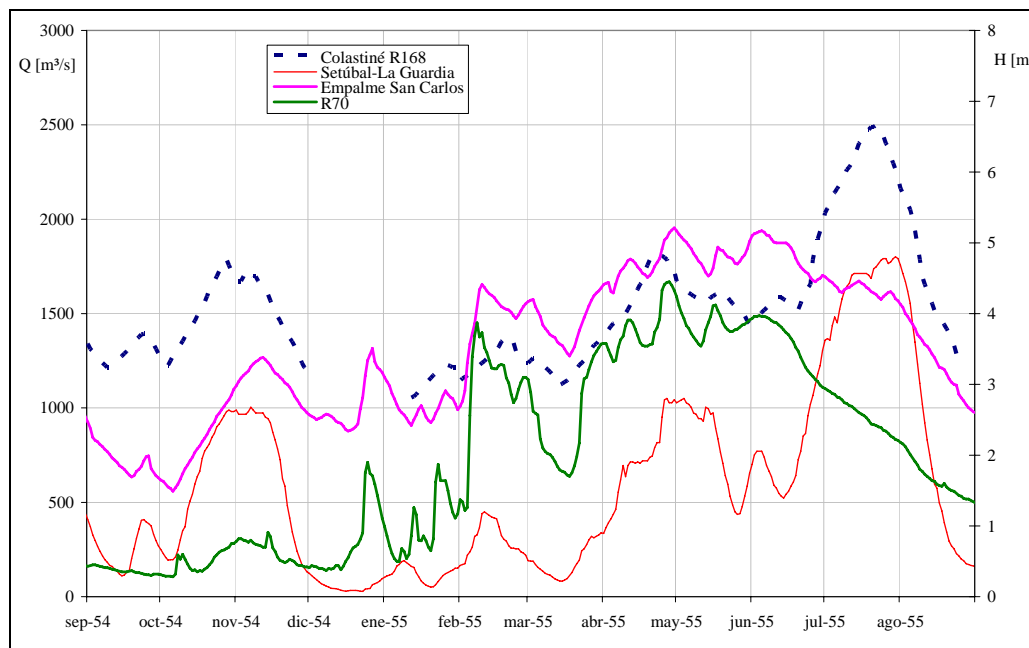


Figura IX. 45. Series de caudales en Colastiné y Laguna Setúbal y niveles en ESC y RP70 (1954-1955)

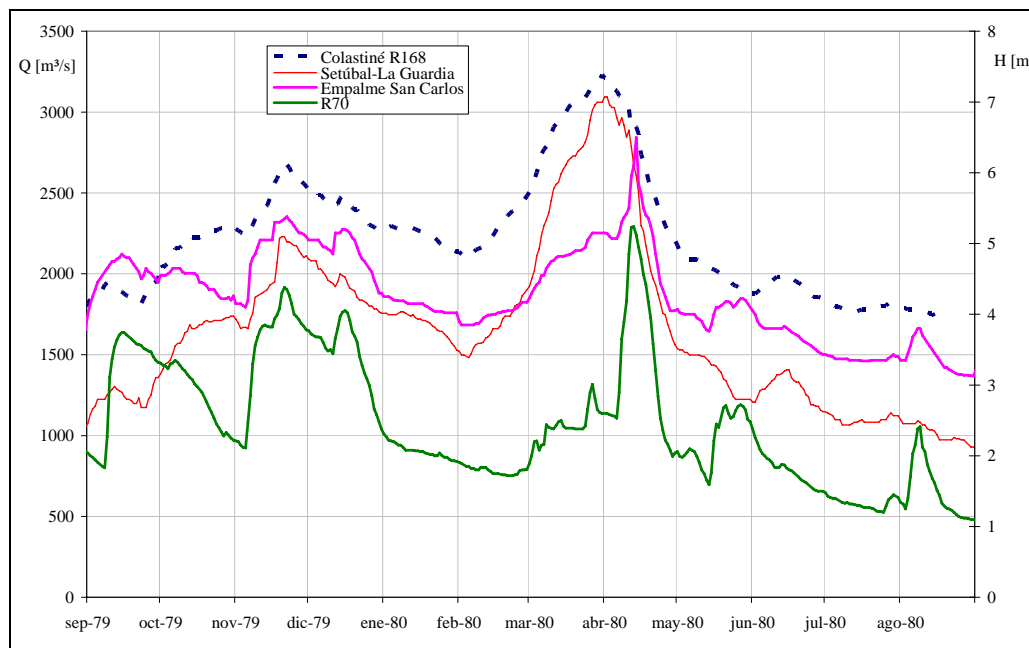


Figura IX. 46. Series de caudales en Colastiné y Laguna Setúbal y niveles en ESC y RP70 (1979-1980)

Gracias a este análisis se adopto como criterio de separación un caudal menor a 1750 m³/s en Laguna Setúbal y un caudal mayor o igual a 350 m³/s en el río Salado (o de crecidas frecuentes)

La segunda medida fue la determinación de en que tipo de condiciones se habían realizado los aforos en la RP 70 (Apartado 5.1 del presente Anexo). Una vez identificados los periodos, se procede a determinar sobre aquellos en que los datos registrados estuvieron en condiciones de flujo gradualmente variado, o mejor dicho en donde se presentaba una influencia cierta del Sistema Paraná sobre los niveles en RP70, y sobre ellos se aplico los siguientes ítems.

- a. Selección de todos los posibles picos de crecidas
- b. Determinar los valores de $\Delta x/\Delta y$ en cada caso (es decir la distancia entre las estaciones de ESC y RP70 y la diferencia de cota registrada)
- c. Aplicación la ecuación de flujo gradualmente variado (IX.16)

Por último, como herramienta de verificación, se emplean los aforos identificados como de flujo Gradualmente Variado como patrón de contraste de la estimación realizada en forma analítica, en todos los casos detectados los resultados fueron compatibles.

6.2 Modelación de las Curvas de Remanso

A continuación se presentan la modelación de las curvas de remanso en función de los niveles del Sistema Paraná y los caudales del Río Salado empleando para tal fin el Modelo Hidráulico Histórico (confeccionado con los datos de 1928) y el Modelo Hidráulico confeccionado con la información actual presentado en el AnexoV, ambos realizados con el software HEC-RAS 3.1.3©.

En primera medida se presentan los resultados mediante el empleo del Modelo Histórico en las Figura IX. 47 a

Figura IX. 50., en las mismas se pueden apreciar caudales de 200, 750, 1500 y 3000 m³/s para la estación RP70 y niveles del Sistema Paraná de 10, 12, 14, 16 y 18 m junto con el hipotético caso de que existiera una caída libre en la desembocadura del río Salado (representado en el grafico como “Uniforme”). Además la línea punteada indica la progresiva en donde se encuentra ubicada la estación RP70.

En cuanto que las Figura IX. 51 a Figura IX. 54, muestran la misma información que el caso anterior pero habiendo sido realizada la modelación mediante el empleo del modelo actual detallado en el Anexo V, e indicando la progresiva que ocupa el puente de la AU01 y RP70.

De estas figuras se puede apreciar como a medida que aumenta el caudal en RP70, disminuye la influencia del Sistema Paraná, llegando a ser imperceptible a partir de los 1500 m³/s, por lo que se podría afirmar que los valores de eventos extremos en la RP70 no se encontrarían

influenciados por el efecto de remanso que causa el Sistema Paraná, no siendo así para crecidas frecuentes.

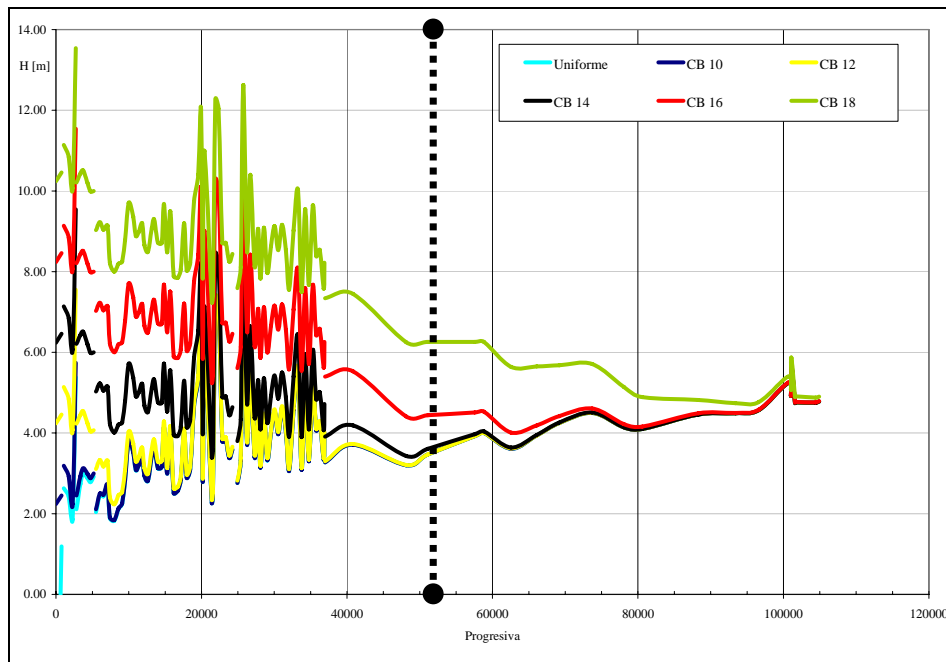


Figura IX. 47. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y $Q= 200 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Salado. (Modelo Hidráulico 1928)

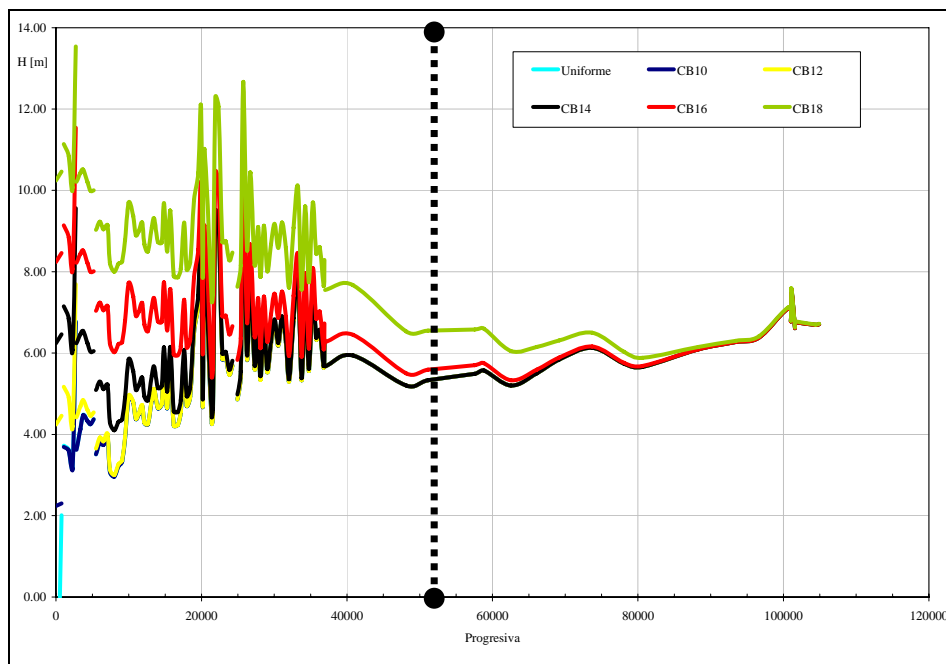


Figura IX. 48. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y $Q= 750 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Salado. (Modelo Hidráulico 1928)

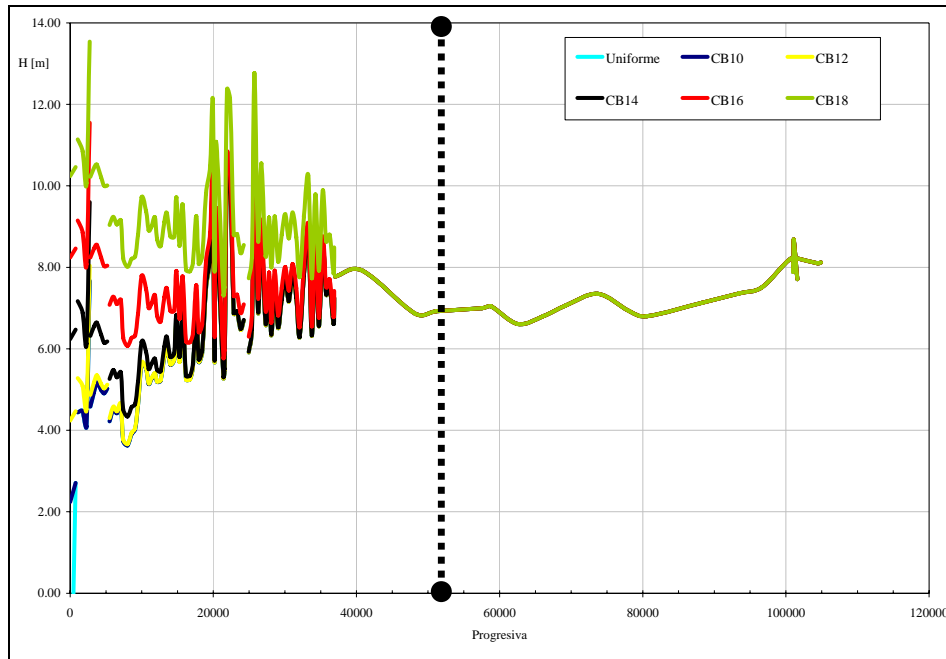


Figura IX. 49. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y $Q= 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Salado. (Modelo Hidráulico 1928)

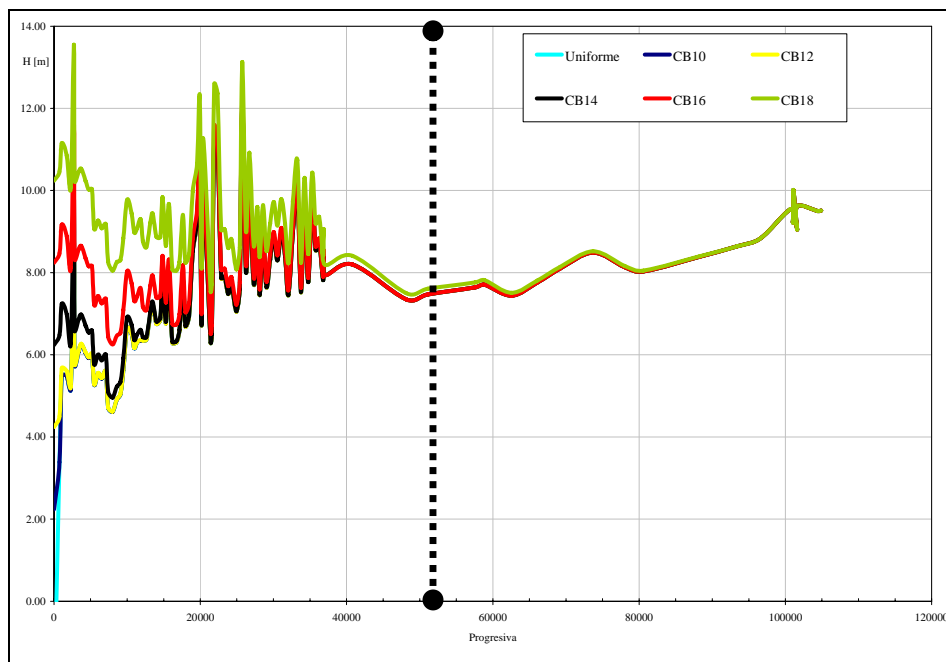


Figura IX. 50. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y $Q= 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Salado. (Modelo Hidráulico 1928)

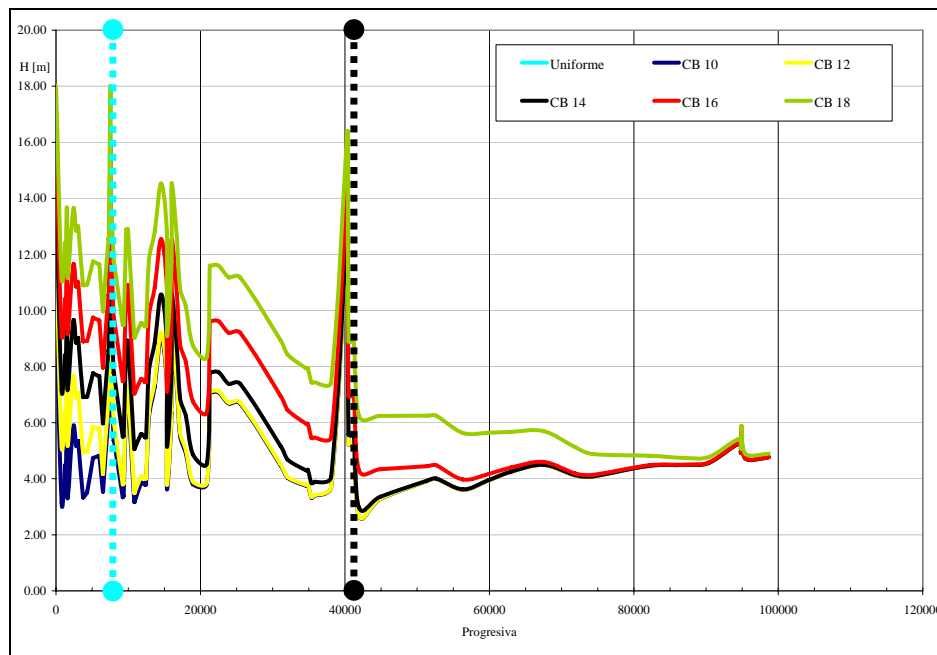


Figura IX. 51. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y $Q= 200 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Salado. (Modelo Hidráulico Actual)

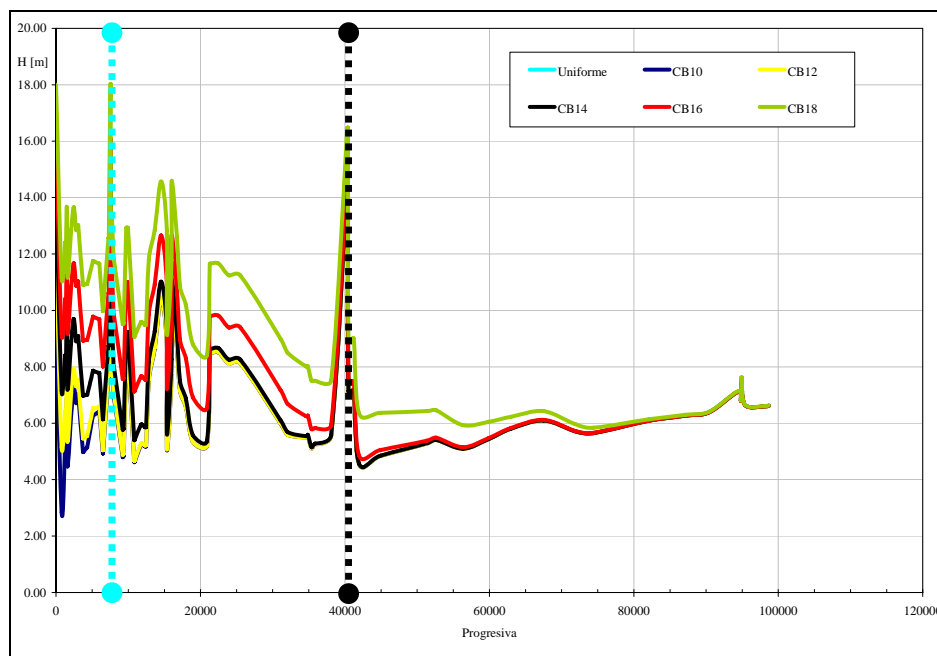


Figura IX. 52. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y $Q= 750 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Salado. (Modelo Hidráulico Actual)

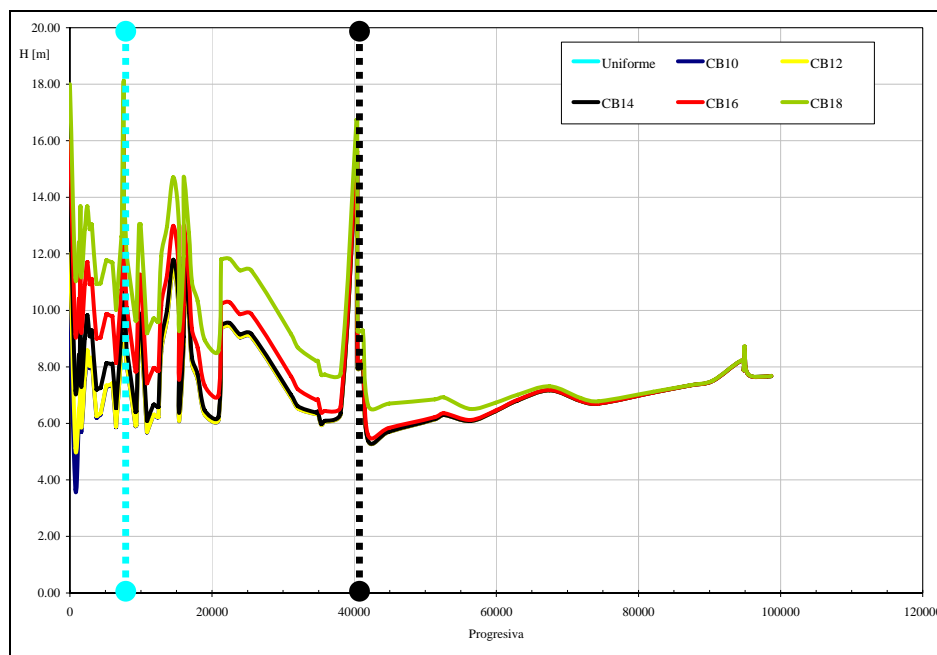


Figura IX. 53. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y $Q= 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Salado. (Modelo Hidráulico Actual)

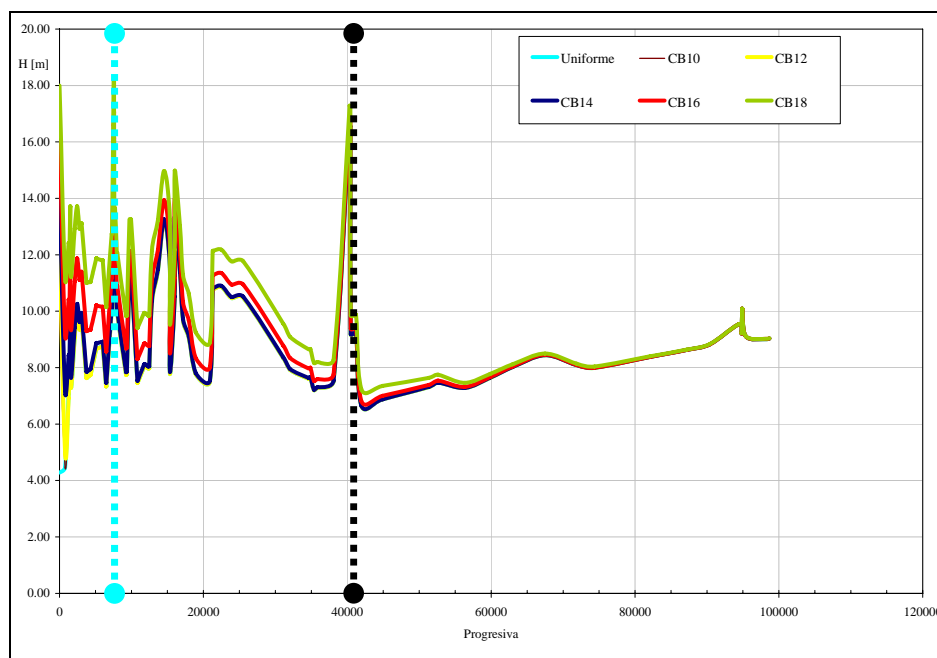


Figura IX. 54. Curvas de Remanso para distintos niveles del Sist. Paraná y $Q= 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Salado. (Modelo Hidráulico Actual)

7 SERIE GENERADA SIN INFLUENCIA DEL SISTEMA PARANÁ (1928-2005)

El fin último de este Anexo era obtener una serie de Caudales Máximos Anuales en la estación de RP70, que considerara toda la información disponible sobre el río Salado. La misma es presentada en la Tabla IX. 10, la cual abarca un periodo de 120 años en vez de los 50 años de la serie original. De esta manera se puede emplear una serie que permita validar los estudios de recurrencia que se realicen sobre el evento del 2003, además de poder ser considerada como libre de influencias del Sistema Paraná lo cual ofrece una homogeneidad adicional a la misma. Por último, teniendo en cuenta que los resultados alcanzados son un indicador del orden de magnitud del evento máximo, y aplicando el análisis de incertidumbre realizado en el apartado 3.3.3 y tomando como umbral de percepción de 350 m³/s en el río Salado. Se puede concluir que con una incertidumbre del +15%, 16 de los máximos anuales se encontraron por encima de dicho umbral de percepción, o por el contrario si la incertidumbre es del -15%, serían 11 los máximos anuales que se hubieran colocado por encima del umbral fijado para el periodo 1928 – 1953

Tabla IX. 10. Serie completa de caudales máximos anuales empleada en los estudios estadísticos.

Año Hidrológico	Q [m ³ /s]	Tipo de dato	Año Hidrológico	Q [m ³ /s]	Tipo de dato	Año Hidrológico	Q [m ³ /s]	Tipo de dato	Año Hidrológico	Q [m ³ /s]	Tipo de dato
1886/1887	1750.0	H	1946/47	1160.8	R	1966-1967	334.9	S	1986-1987		
1913/1914	2759.0	H	1947/48			1967-1968	541.9	S	1987-1988		
1928/29	546.2	R	1948/49	103.0	R	1968-1969	122.4	S	1988-1989		
1929/30	325.3	R	1949/50			1969-1970	122.3	S	1989-1990		
1930/31	387.1	R	1950/51			1970-1971	354.1	S	1990-1991		
1931/32	629.7	R	1951/52			1971-1972	165.5	S	1991-1992		
1932/33	498.1	R	1952/53	183.3	R	1972-1973	2429.0	S	1992-1993		
1933/34	467.4	R	1953/54	189.15	R	1973-1974	535.6	S	1993-1994	662.9	S
1934/35	350.7	R	1954-1955	301.9	S	1974-1975	640.3	S	1994-1995	234.4	S
1935/36	402.0	R	1955-1956	108.7	S	1975-1976	71.9	S*	1995-1996	322.6	S
1936/37	183.3	R	1956-1957	179.5	S	1976-1977	1013.9	S*	1996-1997	194.7	S
1937/38	766.7	R	1957-1958	213.3	S	1977-1978	893.4	S	1997-1998	2672.0	S
1938/39	518.1	R	1958-1959	619.9	S	1978-1979	696.0	S	1998-1999	454.3	S
1939/40	467.4	R	1959-1960	322.8	S	1979-1980	532.7	S*	1999-2000	521.5	S
1940/41	717.8	R	1960-1961	282.5	S	1980-1981	1420.0	S	2000-2001	400.0	S
1941/42	355.8	R	1961-1962	155.7	S*	1981-1982	361.8	S*	2001-2002	688.6	S
1942/43	619.6	R	1962-1963	308.2	S*	1982-1983	477.8	S*	2002-2003	3954.0	S
1943/44			1963-1964	221.0	S	1983-1984	797.6	S	2003-2004	290.5	S
1944/45	178.6	R	1964-1965	108.1	S	1984-1985	487.5	S	2004-2005	1050.0	S
1945/46	795.9	R	1965-1966	398.9	S	1985-1986	561.7	S*			

Observaciones: H = Deducido de marca histórica; R = Caudal Estimado S = Dato Sistemático S* = Dato Sistemático corregido por remanso

Los caudales corregidos por efectos de remanso no corresponden necesariamente al mismo día de observación del valor de caudal originalmente considerado como extremo anual. Ello es una consecuencia directa del análisis de los efectos de remanso por el sistema Paraná, resultando que no necesariamente los caudales máximos se correspondieron con los niveles máximos.

Datos Originales (sin corrección por efectos de remanso del sistema Paraná)							
1961-1962	171.5	1962-1963	406.6	1975-1976	154.2	1976-1977	1782
1979-1980	663.4	1981-1982	460.0	1982-1983	685.9	1985-1986	697.3

8 CONCLUSIONES

En este Anexo se han presentado de manera sucinta algunos de los resultados correspondientes a la intensa búsqueda de información histórica que condujo a estimar los caudales correspondientes a tres crecidas históricas del nivel de las aguas del río Salado en proximidades de la ciudad de Santa Fe.

En particular, fueron estimadas con base en un conjunto de informaciones disponibles los caudales máximos correspondientes a las crecidas de 1886, 1914 y 1929. Esta última crecida fue provocada por el sistema del río Paraná. Las otras dos marcas históricas, correspondientes a crecidas del río Salado, fueron utilizadas en los estudios de frecuencia presentados en el Anexo X.

La recopilación realizada ha permitido conformar un importante conjunto de informaciones para profundizar en el futuro el estudio del comportamiento hidrológico-hidráulico del río Salado.