

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y  
Naturales



## PRACTICA SUPERVISADA

"Análisis de la Dinámica de los Bañados del  
Río Dulce y de la Curva H-Q en Secciones de  
Interés, Paso de la Cina y Paso de los  
Oscars"



Alumna: Milagros Seveso

Tutor: Ing. Cecilia E. Pozzi Piacenza

Supervisor Externo: Ing. Gerardo Hillman

2015

# AGRADECIMIENTOS

---

*A mis padres, Jorge y Adriana, por su apoyo incondicional, por confiar siempre en mí, y por su amor ante todas las cosas, mis logros son dedicados a ellos.*

*A mi hermano, Sebastián, por sus consejos, por ser mi ejemplo a seguir.*

*A mi novio, Matías, por su paciencia, por alentarme en los momentos difíciles.*

*A mis amigos, por los momentos compartidos, porque con su presencia todo fue más sencillo, ellos son lo más preciado que me llevo de esta etapa.*

*A mi tutora, la Ing. Cecilia Pozzi, por su seguimiento, su paciencia, su enseñanza, su tiempo dedicado, porque en todo momento demostró ser lo buena persona que es.*

*A la Ing. Érica Díaz, al Ing. José Manuel Díaz Lozada, al Ing. Nicolás Guillen, a la Ing. Constanza Vargas, por el apoyo, por la ayuda incondicional, por el compañerismo.*

*A mi supervisor externo, el Ing. Gerardo Hillman, por sus aportes realizados para que pueda concluir mi práctica supervisada.*

*Mi agradecimiento al Tribunal, a la Ing. Mariana Pagot, quien me guio desde los inicios y a la Ing. Leticia Vicario por tomar parte de su tiempo en leer este informe.*

*Al Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba por darme un espacio, y a todas las personas que forman parte de él por hacerme sentir una más.*

# RESUMEN

---

**Título del Trabajo:** "Análisis de la Dinámica de los Bañados del Río Dulce y de la Curva H-Q en Secciones de Interés, Paso de la Cina y Paso de los Oscares"

**Nombre del Autor:** Seveso, Milagros

**Matrícula:** 35.063.574

**Carrera:** Ingeniería Civil

**Plan:** 2005, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba

**Palabras Claves:** Laguna Mar Chiquita, Bañados del río Dulce, nivel, caudal, Curva H-Q

La Laguna Mar Chiquita es el colector final de una cuenca sin salida al mar, alimentada por los ríos Suquia y Xanaes, provenientes de las sierras de Córdoba, y por el río Dulce, que se origina en la sierra de Aconquija en Tucumán.

Entre los principales tributarios del sistema, el río Dulce, aporta en promedio alrededor del 80 % del agua que llega a la Laguna Mar Chiquita. El mismo escurre por más de 300 km y a lo largo de su cuenca está regulado por obras hídricas menores con fines de riego y por el embalse de Río Hondo, para la generación de energía y el control de sus crecidas. Superada su escasa capacidad de conducción en las crecidas estivales, los terrenos anegados llegan a cubrir hasta 12.000 km<sup>2</sup>. Se forman así los grandes humedales denominados "Bañados del río Dulce" sistema que alberga, junto con la Laguna, una alta biodiversidad protegida nacional e internacionalmente.

Durante las últimas décadas, las importantes fluctuaciones del nivel de agua en el sistema, definieron periodos históricos ricos a muy pobres . Estas variaciones impactaron directamente en el sistema, tanto a nivel ecológico como en el desarrollo social y económico de las comunidades asentadas en las proximidades de la Laguna.

En el presente trabajo se estudia el complejo sistema Bañados del río Dulce - Laguna Mar Chiquita observando, en primer lugar, las áreas de Bañados con relación a volúmenes desbordados del río Dulce, obtenidos a través de series de caudales erogados aguas abajo de la presa de Río Hondo.

Por otro lado se analizan las series de niveles obtenidas en dos secciones del río Dulce, Paso de la Cina y Paso de Oscares. En la primera de las secciones se construye una Curva Cota - Caudal, partiendo de caudales aforados en la misma y niveles asociados llevados primeramente a una cota de referencia. En la segunda, se obtiene el coeficiente de rugosidad de Manning característico de dicha sección, luego se calculan los caudales con la fórmula de Manning haciendo uso de dicho coeficiente, los cuales por ultimo son comparados con caudales aforados en campaña.

# INDICE DE CONTENIDOS

---

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>1</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>2</b>
<b>INDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>3</b>
<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>5</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>6</b>
<b>Capítulo 1</b>	
<b>INTRODUCCIÓN Y PROBLEMÁTICA .....</b>	<b>9</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.2. UBICACIÓN Y PROBLEMÁTICA DEL SISTEMA EN ESTUDIO .....	10
1.3. OBJETIVOS .....	15
1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	16
1.5. MARCO TEÓRICO.....	18
1.5.1. Marco Teórico de la Dinámica de los Bañados del río Dulce y la Laguna Mar Chiquita	19
1.5.2. Marco Teórico para la determinación de la Curva H-Q.....	21
1.6. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO .....	24
1.6.1. Cuenca del río Dulce (Petri).....	26
1.6.2. Bañados del río Dulce.....	28
1.6.3. Cuenca del río Primero (Suquia).....	29
1.6.4. Cuenca del río Segundo (Xanaes).....	30
1.6.5. Laguna Mar Chiquita (Mar de Ansenuza).....	31
<b>Capítulo 2</b>	
<b>REVISIÓN DE ANTECEDENTES .....</b>	<b>32</b>
2.1. ANTECEDENTES DE NIVELES DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA .....	32
2.2. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON EL ESTUDIO DE LA DINAMICA DE LOS BAÑADOS DEL RIO DULCE .....	32
2.3. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES .....	37
2.4. ANTECEDENTES DE CAUDALES EROGADOS POR EL RIO DULCE.....	38
2.5. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON LA EJECUCION DE CURVAS COTA - CAUDAL SOBRE EL RIO DULCE EN SECCIONES DE INTERES .....	42
2.5.1. Antecedentes de niveles y caudales aforados .....	42
2.5.2. Antecedentes de las Curvas Cota - Caudal e hidrogramas.....	43

### **Capítulo 3**

<b>ACTUALIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS EXISTENTE .....</b>	<b>45</b>
3.1. ACTUALIZACIÓN DE LA SERIE DE NIVELES DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA .....	45
3.1.1. Niveles diarios de la Laguna Mar Chiquita. ....	45
3.1.2. Niveles mensuales de la laguna Mar Chiquita .....	48
3.2. ACTUALIZACIÓN DE LA SERIE DE CAUDALES DEL RIO DULCE.....	51
3.2.1. Actualización de la serie de caudales del rio Dulce erogados aguas abajo de la presa de Río Hondo. ....	51
3.2.2. Actualización de la serie de caudales del rio Dulce erogados aguas abajo del dique Los Quiroga. ....	51
3.3. ACTUALIZACIÓN DE LA SERIE DE AFOROS REALIZADOS EN PASO DE LA CINA Y PASO DE LOS OSCARES.....	53
3.4. ACTUALIZACIÓN DE LA SERIE DE DATOS LIMNIMÉTRICOS DE PASO DE LA CINA Y PASO DE LOS OSCARES. ....	55

### **Capítulo 4**

<b>ANÁLISIS DE LA DINÁMICA HÍDRICA DE LOS BAÑADOS Y CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA H-Q PARA EL RÍO DULCE .....</b>	<b>56</b>
4.1. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE DESBORDE .....	56
4.2. MONITOREO DE LAS SECCIONES DE INTERES, PASO DE LA CINA Y PASO DE LOS OSCARES.....	68
4.2.1. Características del instrumental de medición.....	68
4.2.2. Campaña realizada al río Dulce en secciones de interés .....	77
4.3. TRATAMIENTO DE DATOS LIMNIMÉTRICOS.....	87
4.3.1. Serie de niveles Paso de la Cina .....	87
4.3.2. Serie de niveles Paso de los Oscares .....	90
4.4. CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA COTA - CAUDAL.....	93
4.5. CALCULO DEL CAUDAL UTILIZANDO LA FÓRMULA DE MANNING .....	102

### **Capítulo 5**

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>110</b>
5.1. ACTUALIZACION DE LA BASE DE DATOS.....	110
5.2. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE DESBORDE .....	111
5.3. TRATAMIENTO DE DATOS LIMNIMÉTRICOS.....	112
5.4. CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA COTA - CAUDAL.....	114
5.5. CALCULO DEL CAUDAL UTILIZANDO LA FÓRMULA DE MANNING .....	115

### **Capítulo 6**

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>116</b>
--------------------------	------------

# INDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Resumen de aforos realizados.....	42
Tabla 2. Resumen de aforos realizados.....	43
Tabla 3. Relevamiento topográfico de las escalas en la Laguna Mar Chiquita. ....	46
Tabla 4. Aforos actualizados en las secciones de Paso de los Oscares y Paso de la Cina. ....	53
Tabla 5. Áreas de bañados en el periodo de estudio 2006-2009.....	60
Tabla 6. Volumen desbordado entre dos fechas, volumen desbordado acumulado, .....	62
Tabla 7. Características técnicas del instrumento utilizado.....	76
Tabla 8. Ubicación y tareas realizadas en las estaciones de medición Paso de la Cina y .....	77
Tabla 9. Resultados arrojados por el instrumento de medición en Paso de la Cina.....	82
Tabla 10. Resultados arrojados por el instrumento de medición en Paso de los Oscares .....	86
Tabla 11. Datos iniciales para el cálculo de la serie de cotas.....	90
Tabla 12. Parámetros de la Ec 4 para una primera aproximación. ....	95
Tabla 13. Comparación entre caudales aforados y caudales calculados con cada cueva cota-caudal para Paso de la Cina.....	96
Tabla 14. Parámetros de la Ec. 4 para una segunda aproximación. ....	97
Tabla 15. Comparación entre caudales aforados y caudales calculados con la curva cota-caudal para Paso de la Cina. ....	97
Tabla 16. Determinación del n de Manning promedio para la .....	106
Tabla 17. Comparación de caudales aforados y caudales calculados con la .....	107
Tabla 18. Calculo del coeficiente de rugosidad de Manning .....	108

# INDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.....	10
Figura 2. Fauna en la región de la laguna Mar Chiquita.....	11
Figura 3. Problemáticas asociadas al sitio en estudio.....	12
Figura 4. Imágenes satelitales de la laguna aproximadamente en su período alto de su año hidrológico [1976/1977/1981/1986/1997/1999-2014].....	14
Figura 5. Esquema con la metodología de trabajo.....	17
Figura 6. Aportes hídricos del río Dulce para períodos hidrológicos 1926-27 a 2010-12.....	18
Figura 7. Curva de variación del nivel del lago modificada y corregida.....	19
Figura 8. Esquema típico de una curva altura de superficie libre (H) –caudal (Q).....	21
Figura 9. Sistema de la Laguna Mar Chiquita.....	25
Figura 10. Región superior de la cuenca de aporte del Río Dulce hasta el embalse Río Hondo.....	27
Figura 11. Región inferior de la cuenca del Río Dulce desde el embalse Río Hondo.....	28
Figura 12. Región de los Bañados del río Dulce.....	29
Figura 13. Cuencas hidrográficas de los Ríos Suquía (Primero) y Xanaes (Segundo).....	30
Figura 14. Laguna Mar Chiquita, ubicación.....	31
Figura 15. Subregiones definidas: 1) Río Dulce Medio (azul), 2) Bañados del Río Dulce (verde) y 3) Laguna Mar Chiquita.....	33
Figura 16. División de los Bañados en 3 áreas.....	34
Figura 17. Áreas de Bañados medidas. Período: 1997-2013.....	34
Figura 18. Área máxima de los Bañados en función del volumen de agua desbordada.....	35
Figura 19. Escenarios posibles con valores de volumen desbordado y área de los Bañados del río Dulce.....	36
Figura 20. Serie actualizada de áreas de Bañados: A1, A2, A3 y Área total. Período 2006 - 2013.....	37
Figura 21. Ubicación de las distintas estaciones encontradas.....	40
Figura 22. Resumen de series de caudales disponibles en diferentes.....	41
Figura 23. Caudales diarios calculados en Paso de los Oscares (m <sup>3</sup> /s).....	43
Figura 24. Caudales diarios obtenidos en Paso de la Cina (m <sup>3</sup> /s).....	44
Figura 25. Datos de caudales diarios correctos de Paso de los Oscares y Paso de la Cina.....	44
Figura 26. Ubicación de Miramar.....	46
Figura 27. Ubicación en planta de las escalas limnimétricas colocadas frente al Destacamento de la Reserva de la Laguna Mar Chiquita.....	47
Figura 28. Escala C6. Marzo de 2014.....	47
Figura 29. Niveles diarios LMCH. Período 2001-2014.....	48

Figura 30. Niveles mensuales LMCH. Período 2001-2014.....	49
Figura 31. Niveles mensuales LMCH con línea de tendencia. Período 2001-2014.....	49
Figura 32. Niveles mensuales LMCH. Período 1967-2014.....	50
Figura 33. Caudales medios diarios derivados aguas abajo del Dique Los Quiroga (m3/seg). Periodo actualizado 1997-2006 .....	51
Figura 34. Caudales medios mensuales derivados aguas abajo del Dique Los Quiroga (m3/seg). Periodo actualizado 1997-2011 .....	52
Figura 35. Aforos actualizados en las secciones de Paso de los Oscars y Paso de la Cina. ....	53
Figura 36. Aforos en Paso de los Oscars y Paso de la Cina.....	54
Figura 37. Ubicación Paso de los Oscars y Paso de la Cina. ....	57
Figura 38. Evolución de los Bañados en el período de estudio 2006-2009. ....	59
Figura 39. Caudales diarios erogados aguas abajo de la presa de Río Hondo y .....	60
Figura 40. Volumen desbordado acumulado .....	63
Figura 41. Volumen desbordado acumulado y áreas totales de bañados.....	64
Figura 42. Volúmenes desbordados entre dos fechas y áreas del Bañado Norte .....	64
Figura 43. Volumen desbordado acumulado y áreas del Bañado Este.....	65
Figura 44. Volumen desbordado acumulado y áreas de Bañado Sur .....	66
Figura 45. Caudal diario erogado por Río Hondo, caudal de desborde, volumen .....	67
Figura 46. Ubicaciones seleccionadas para la instalación de las estaciones limnimétricas.....	68
Figura 47. Esquema del limnímetro	Figura 48. Limnímetro.....
Figura 49. Estación limnimétrica	Figura 50. Estación limnimétrica .....
Figura 51: Esquema del lugar de emplazamiento de la nueva estación limnimétrica en la .....	70
Figura 52. Estructura instalada en Paso de la Cina sobre .....	71
Figura 53: Esquema del lugar de emplazamiento de la nueva estación limnimétrica en la .....	71
Figura 54. Estructura instalada en Paso de los Oscars.....	72
Figura 55. Recolector de Datos IRIS 120 .....	72
Figura 56. RTU. Gabinete de los sensores Waterlog H-334 .....	73
Figura 57. Sensor de nivel Waterlog H-334.....	74
Figura 58. Esquema de la estación limnimétrica.....	74
Figura 59. Esquema de funcionamiento del ADCP.....	75
Figura 60. ADCP y demás dispositivos montados en la plataforma móvil de medición .....	77
Figura 61. Ubicación estructura en el centro de la sección. ....	78
Figura 62. Estructura soporte del instrumental. ....	78
Figura 63. Instalación limnímetro. ....	79
Figura 64. Esquema acotado en estación limnimétrica ubicada en el centro de la.....	79
Figura 65. Ubicación estructura al este de la sección. ....	80



Figura 66. Estructura soporte del instrumental. ....	80
Figura 67. Descarga de datos. ....	81
Figura 68. Medición del pelo de agua PC. ....	81
Figura 69. Esquema acotado en estación limnimétrica ubicada al este de la .....	81
Figura 70. Aforo sección Paso de la Cina.....	82
Figura 71. Sección transversal en Paso de la Cina.....	83
Figura 72. Estructura soporte del instrumental Paso de los Oscars. ....	84
Figura 73. Descarga de datos. ....	84
Figura 74. Esquema acotado en estación limnimétrica ubicada en la .....	85
Figura 75. Aforo sección Paso de los Oscars .....	85
Figura 76. Sección transversal en Paso de los Oscars .....	86
Figura 77. Serie de niveles del limnómetro Thalimedes en Paso de la Cina .....	87
Figura 78. Errores en la serie de niveles del limnómetro Thalimedes en Paso de la Cina .....	88
Figura 79. Serie de niveles del limnómetro nuevo en Paso de la Cina.....	88
Figura 80. Diferencias horarias de la serie de niveles del limnómetro nuevo .....	89
Figura 81. Comparación de series de los diferentes limnómetros de Paso de la Cina .....	89
Figura 82. Serie de niveles de Paso de los Oscars .....	91
Figura 83. Errores en la serie de niveles de Paso de los Oscars .....	92
Figura 84. Ubicación de la sección en estudio. ....	93
Figura 85. Serie de niveles y caudales aforados en Paso de la Cina.....	93
Figura 86. Cotas vs Caudal.....	94
Figura 87. Esquema de un canal rectangular donde se representa al nivel de superficie libre registrado respecto a un nivel de referencia arbitrario (H) y el nivel caudal nulo (HQ0) .....	94
Figura 88. Curvas cota-caudal (serie nueva y serie Navarro Ramos 2010) .....	95
Figura 89. Curva Cota - Caudal para la sección de Paso de la Cina, .....	97
Figura 90. Curva cota-caudal ilustrada con imágenes satelitales de las fechas de algunos aforos. ....	100
Figura 91. Hidrogramas en Paso de la Cina.....	101
Figura 92. Caudales diarios en Paso de la Cina .....	101
Figura 93. Pendiente del río Dulce .....	105
Figura 94. n de Manning tabulados según diferentes.....	106
Figura 95. Comparación de imagen ilustrada en “Ven Te Chow, <i>Hidráulica de Canales Abiertos</i> ”, e imagen tomada en la sección de estudio.....	107
Figura 96. Caudales aforados vs caudales calculado con.....	108
Figura 97. Curva aguas arriba de la sección de medición .....	109
Figura 98. Flujo obstruido por el puente en Paso de la Cina .....	109

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN Y PROBLEMÁTICA

---

### 1.1. INTRODUCCIÓN

El presente informe refleja las tareas correspondientes a la Práctica Profesional Supervisada llevadas a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - UNC.

Inicialmente, en el año 2012, se realizó una Ayudantía de Investigación en donde se comenzó a trabajar en el marco del proyecto de investigación titulado "Análisis de la Variabilidad de los Sistemas (río Dulce, Suquia y Xanaes) Tributarios a los Bañados del río Dulce y Laguna de Mar Chiquita" del SeCyT en el periodo 2012 - 2014 y en el proyecto de investigación titulado "Análisis y Simulación Hidrológica de la Dinámica Hídrica del Sistema Bañados del Río Dulce y Laguna Mar Chiquita y su Monitoreo Hidrometeorológico" del SeCyT en el período 2014 - 2015.

Las tareas llevadas a cabo responden al estudio del complejo sistema Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita, situado en el noreste de la provincia de Córdoba y sureste de la provincia de Santiago del Estero.

El presente informe está constituido por seis capítulos, reseñados a continuación.

En el *presente capítulo*, se describe la problemática que dio origen a la Práctica Profesional Supervisada y las actividades realizadas por la alumna.

En el *Capítulo 2* se presenta toda la información y antecedentes recopilados y obtenidos con relación al sistema Bañados del río Dulce - Laguna Mar Chiquita, hasta la fecha.

En el *Capítulo 3* se detalla la actualización de la base de datos existente correspondiente a los niveles de la Laguna Mar Chiquita y a la serie de caudales y niveles del río Dulce.

En el *Capítulo 4* se presenta el resultado del análisis de la dinámica hídrica de los bañados y la calibración de una nueva curva H-Q para el río Dulce.

En el *Capítulo 5* se presentan las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron luego del análisis de resultados.

En el *Capítulo 6* se detalla la bibliografía consultada.

## 1.2. UBICACIÓN Y PROBLEMÁTICA DEL SISTEMA EN ESTUDIO

La laguna Mar Chiquita, en el noroeste de la provincia de Córdoba, es el mayor lago salino de Argentina y el quinto lago salino del mundo. Constituye un área de gran riqueza en biodiversidad y uno de los atractivos turísticos más importante del centro de Argentina. Junto con los Bañados del río Dulce constituyen un humedal de grandes dimensiones (uno de los mayores del mundo).

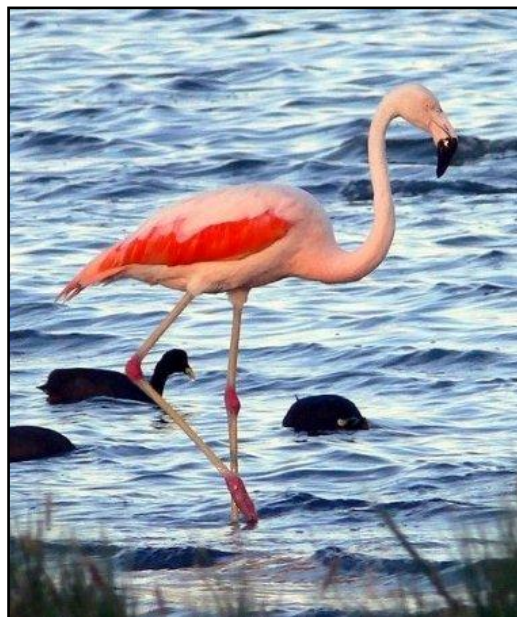
Desde el punto de vista geológico, Mar Chiquita es el colector final de una cuenca sin salida al mar, alimentada por los ríos Suquia y Xanaes, provenientes de las sierras de Córdoba, y por el río Dulce, que se origina en la sierra de Aconquija en Tucumán.

Entre los principales tributarios del sistema, el río Dulce aporta en promedio alrededor del 80 % del agua que llega a la Laguna Mar Chiquita. Mientras que el porcentaje restante lo integran los ríos Suquia (Primero) y Xanaes (Segundo), junto con otros arroyos menores. El río Dulce, a lo largo de su cuenca, está regulado principalmente por obras hídricas menores con fines de riego y por el embalse de Río Hondo, para la generación de energía y el control de sus crecidas (**Figura 1**).



**Figura 1.** Ubicación de la zona de estudio.  
Fuente: Navarro Ramos, 2010.

La cuenca en la que se encuentra el citado sistema, se distribuye en cinco provincias de Argentina. Estas provincias son: Catamarca, Salta, Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba, con mayor participación de las tres últimas, tanto en los aportes hídricos como en los derechos de uso y las obligaciones de conservación del recurso. Este complejo sistema hidro-ecológico cerrado constituye un importante hábitat para regiones semiáridas (Montenegro, 1998). Por este motivo, en el año 1994 se creó la “Reserva Provincial de Córdoba” y en 2002 se incorporaron los Bañados del río Dulce y la Laguna Mar Chiquita a los "Sitios Ramsar" creados por la Convención de Ramsar sobre Humedales (Ley Nacional de adhesión Nº 23.919/91). En el plano internacional, ha sido denominado sitio de valor hemisférico por la Red de Aves Playeras (1991), ya que es la región más importante de la provincia de Córdoba en cuanto a abundancia y diversidad de aves (**Figura 2**) y al mismo tiempo comprende el humedal de mayor importancia regional por el número de especies e individuos de aves acuáticas residentes y migratorias (Torres y Michelutti, 2005).



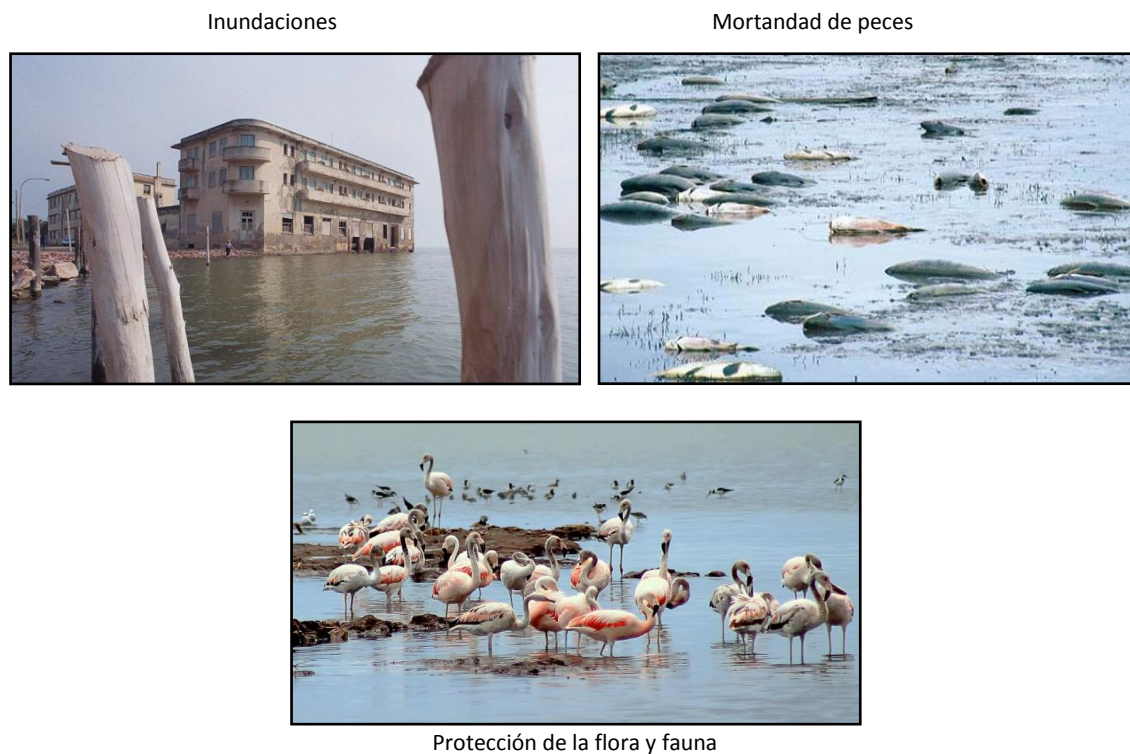
**Figura 2.** Fauna en la región de la laguna Mar Chiquita.

Durante las últimas décadas, las importantes fluctuaciones del nivel de agua en el sistema, definieron periodos históricos ricos a muy pobres (**Figura 4**). Estas variaciones impactaron directamente, tanto a nivel ecológico como en el desarrollo social y económico de las comunidades asentadas en las proximidades de la Laguna. Se manifestaron situaciones de distintas escalas ambientales, desde la ausencia de pejerrey como consecuencia de una importante concentración salina, hasta el aprovechamiento económico de una comunidad

costera como Miramar al mejorar el desarrollo turístico de la costa debido al marcado descenso del agua. Esta misma localidad, había sufrido en la década del '80, situaciones de inundación de un importante sector urbano, y nuevamente sobre la zona costera durante el año 2003.

En la **(Figura 3)** se distinguen algunos de los problemas importantes que aquejan a este sistema, como son en periodos húmedos: las inundaciones en Miramar (única ciudad costera de la Laguna Mar Chiquita) y los efectos negativos de acciones antrópicas no controladas que han provocado mortandad de peces.

En la necesidad de mantener la sustentabilidad del sistema debe prevalecer la protección de la flora y fauna autóctona y el mantenimiento de los ciclos hidrológicos de anegamiento en los Bañados del río Dulce.



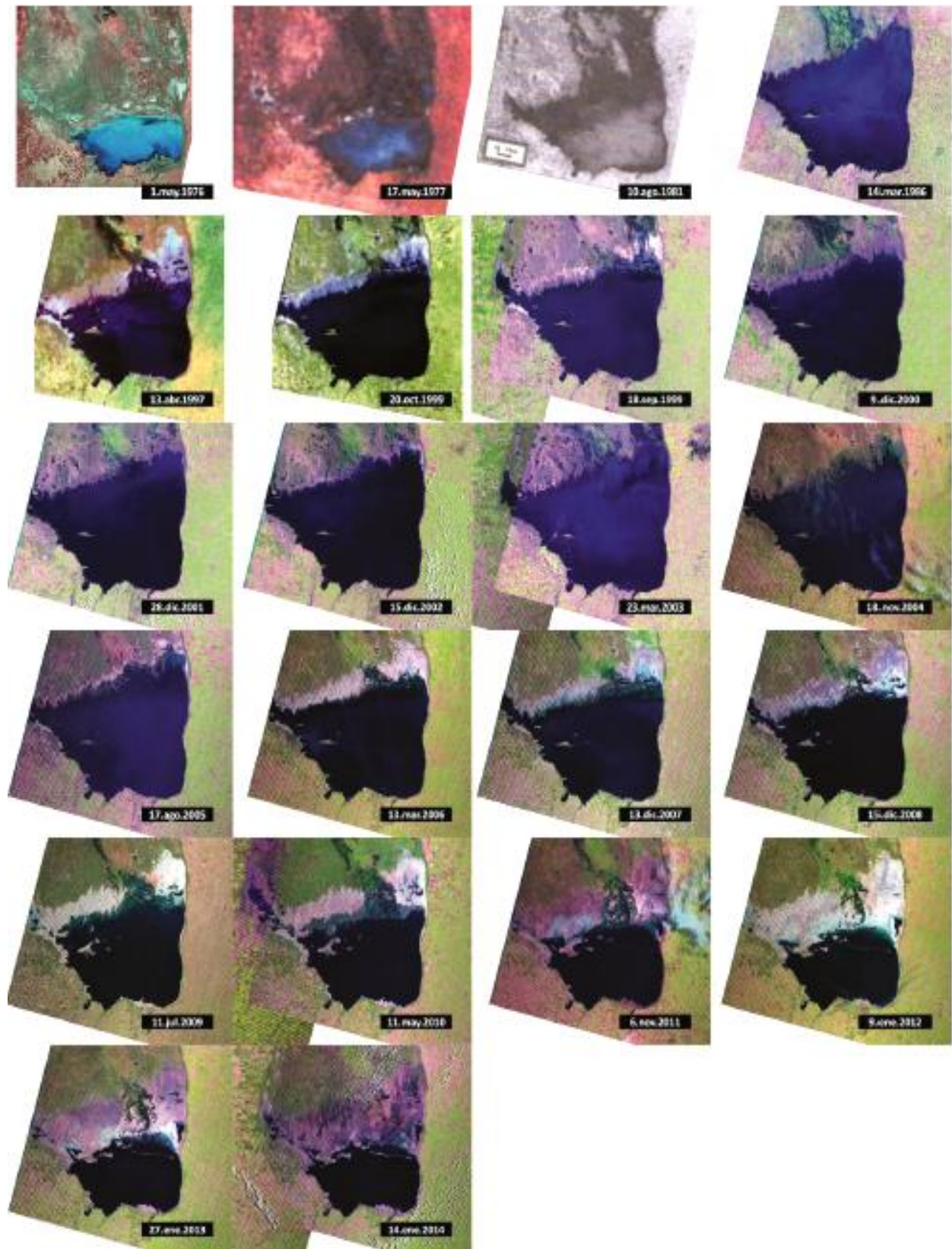
**Figura 3.** Problemáticas asociadas al sitio en estudio.

La Laguna Mar Chiquita o Mar de Ansenusa se emplaza en una zona de llanura que es responsable de su escasa profundidad, del orden de 5,5 m en la actualidad, cubriendo un área cercana a 2.500 km<sup>2</sup>, con un nivel de agua de 67,5 m s.n.m. Estos parámetros han pasado por grandes modificaciones históricas debido a que la costa de la Laguna presenta pendiente muy suave, por lo que la superficie varía de manera muy marcada aun para pequeños cambios de nivel. El máximo nivel medido se observó en el año 2003 con un valor próximo a los 72 m

s.n.m., lo que corresponde a una profundidad máxima promedio de 12 m y un área cubierta por agua de 6.500 km<sup>2</sup>.

Las disminuciones de nivel que afectan principalmente la extensión areal de la Laguna, condicionan la biodiversidad del sistema. Este cuerpo de agua incrementa su salinidad al disminuir su volumen de agua modificando las condiciones del hábitat. Estos aspectos y los reconocimientos de área nacional e internacionalmente protegida avalan el interés de mejorar su conocimiento, escaso por la gran extensión, la complejidad hidrológica y la baja densidad poblacional.

A su vez es importante analizar la dinámica areal de la Laguna para evaluar este nuevo período de niveles bajos, y así aportar bases técnicas para definir políticas de planificación y usos del suelo acordes a estas condiciones.



**Figura 4.** Imágenes satelitales de la laguna aproximadamente en su período alto de su año hidrológico [1976/1977/1981/1986/1997/1999-2014]

Fuente: Curletto, 2014.

### **1.3. OBJETIVOS**

Los objetivos de la presente Práctica Profesional Supervisada son los siguientes:

- Conocer y comprender la dinámica del Sistema Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita a través del estudio de antecedentes.
- Recopilar, actualizar y crear una base de datos con series de niveles de la Laguna Mar Chiquita, series de caudales y niveles del río Dulce entre el período 2001-2015.
- Verificar la metodología utilizada para el cálculo del caudal de desborde del río Dulce, a partir del análisis de imágenes satelitales y series de caudales erogados por la presa Río Hondo, con la finalidad de conocer la cantidad de agua que inunda la región de los bañados en distintos períodos.
- Evaluar la calidad de la serie de datos limnimétricos del río Dulce para el período 2012-2015.
- Actualizar la curva H-Q del río Dulce en secciones de interés, Paso de la Cina y Paso de los Oscars.
- Analizar la aplicación de la ecuación de Manning para el cálculo del caudal en las mismas secciones de estudio.



#### **1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

La metodología de trabajo consistió en una primera revisión y consulta de bibliografía específica sobre el tema. Esta etapa resultó fundamental para la comprensión del funcionamiento del complejo sistema Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita.

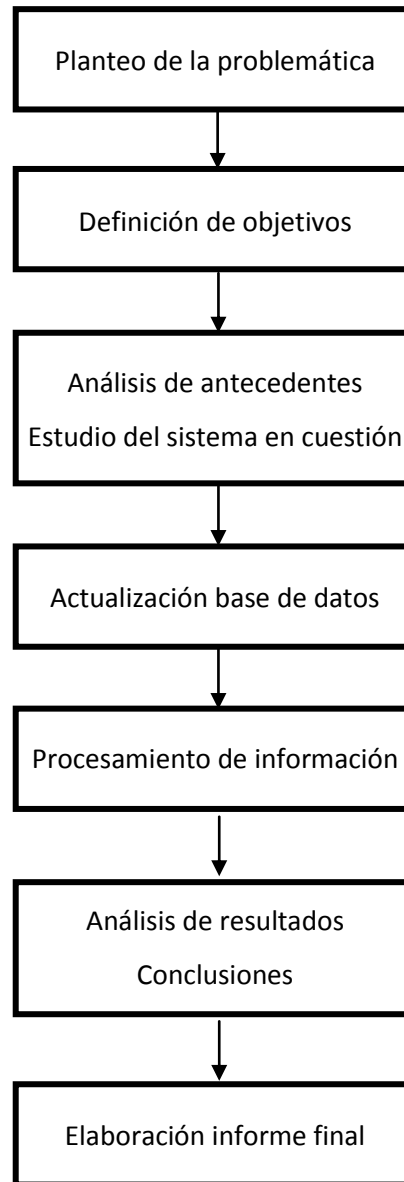
A continuación se realizó la recopilación de datos necesarios, los mismos fueron extraídos de diversas fuentes; y a su vez se actualizaron las series de datos con los valores obtenidos en el marco de esta Práctica Supervisada.

Las variables actualizadas hasta el año 2015 fueron: niveles de agua medidos de la Laguna Mar Chiquita, series de caudales erogados por el río Dulce desde el Embalse de río Hondo y Dique Los Quiroga y series de niveles y aforos realizados en el río Dulce en dos secciones del mismo, Paso de la Cina y Paso de los Oscars.

Luego se analizó y verificó el trabajo realizado por Mery Julien (2010), en el cual se identificó la ubicación de los puntos de desborde del río Dulce y el caudal desbordado asociado, cuya consecuencia es la formación de los distintos Bañados (A1, A2 y A3). Además se analizó a través del procesamiento de imágenes satelitales el área de los mismos. Este estudio tuvo lugar en un período de 4 años (2006 - 2009).

Por otro lado, se construyó una curva H-Q luego de la actualización de aforos y niveles en las secciones de interés sobre el río Dulce para el período (2014 - 2015). Para llevar a cabo dicho trabajo, se consultó el informe realizado por Navarro Ramos (2010).

A continuación, en la **Figura 5**, se puede apreciar de forma esquemática la organización de las tareas antedichas:



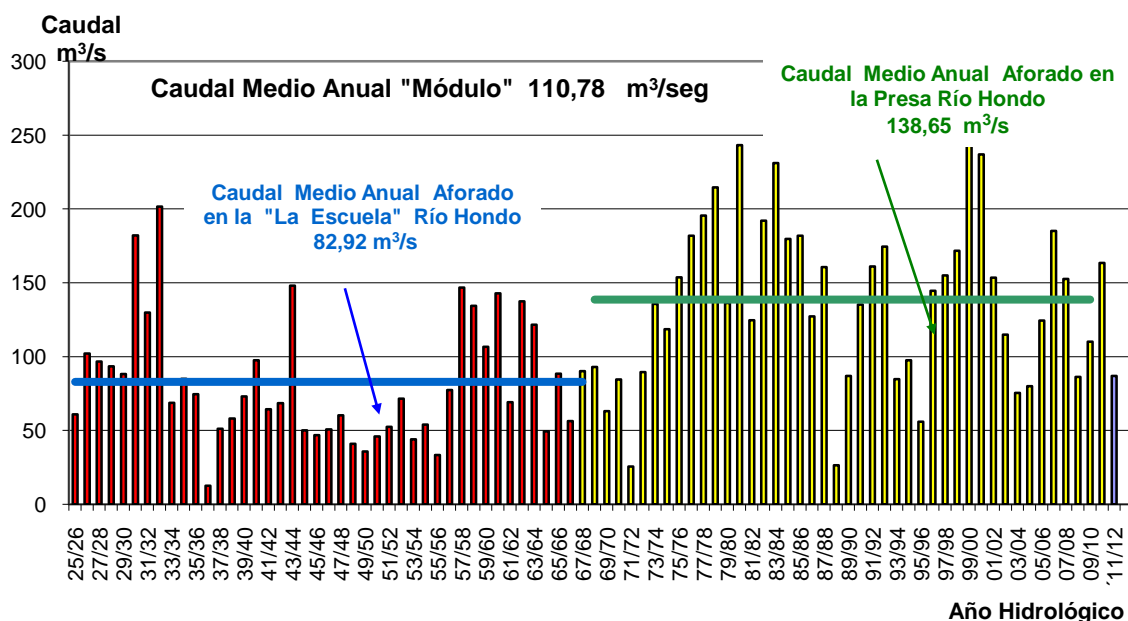
**Figura 5.** Esquema con la metodología de trabajo.

## 1.5. MARCO TEÓRICO

Durante las últimas décadas, se han observado importantes fluctuaciones en el sistema, pasando de períodos históricos ricos a intensas sequías.

En un Informe de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba (SSRRHH, 2012) se presenta un análisis de los caudales del río Dulce registrados durante el último siglo. En esta serie pueden distinguirse dos periodos (**Figura 6**). El primero desde 1926 hasta 1972 con un valor de caudal medio anual de 83 m<sup>3</sup>/s y otro desde 1972 hasta 2010 con un valor de caudal medio anual de 139 m<sup>3</sup>/s. En el primer periodo las sequías se caracterizan por su gran extensión temporal y magnitud, mientras que en el segundo periodo son de corta duración. El estudio de los periodos de sequía en las cuencas de los ríos Suquia, Xanaes y Dulce, presentado en Díaz (2013) permitió identificar una fuerte dependencia temporal entre las mismas.

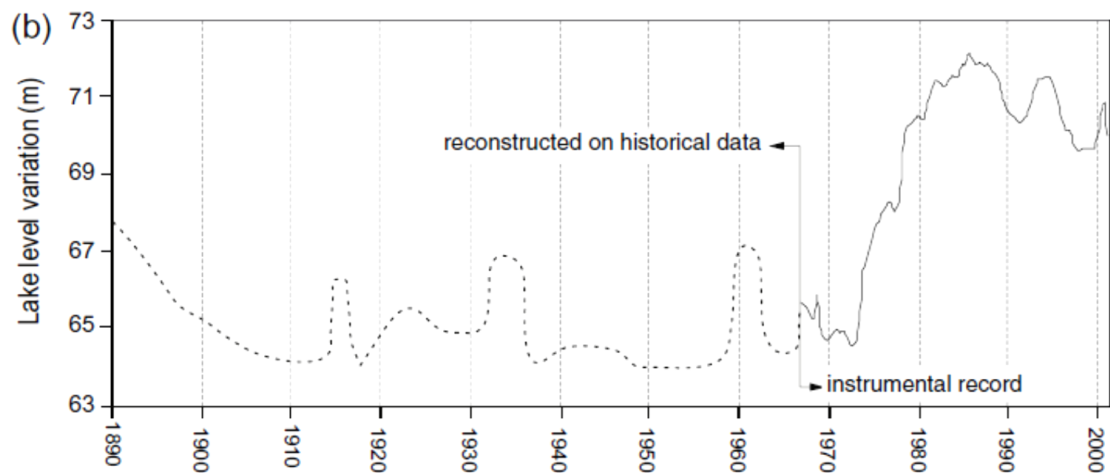
Como se señaló anteriormente, estos ríos son los principales tributarios de la Laguna Mar Chiquita, por lo tanto el período de excesos se corresponde con un marcado aumento del nivel de la Laguna a partir de la década del '70. A una escala regional y a partir de comparaciones con los datos obtenidos de la Cuenca del Plata, se ha sugerido que el aumento de los niveles de la Laguna podría atribuirse a un aumento de las precipitaciones y de la descarga de los ríos afluentes (Piovano et al., 2002). Este aumento de nivel ha sido sostenido hasta el año 2003, a partir del cual se observa que el nivel de la Laguna decrece anualmente.



**Figura 6.** Aportes hídricos del río Dulce para períodos hidrológicos 1926-27 a 2010-12.

Fuente: SSRRHH, 2012.

Además, con base en datos indirectos de sedimentos lacustres, las variaciones de la Laguna han sido reconstruidas durante los últimos 230 años (Piovano et al., 2002) (**Figura 7**). Aquí se muestra que la Laguna se caracteriza por condiciones secas dominantes hasta el inicio del último cuarto del siglo 20, con un aumento del nivel desde principios de 1970, el más importante en extensión y magnitud.



**Figura 7.** Curva de variación del nivel del lago modificada y corregida.  
Fuente: Piovano, 2002.

En la **Figura 7**, el intervalo de 1890 a 1966 fue reconstruido a partir de datos históricos (registros instrumentales durante niveles bajos desde 1967 hasta 1975 se han corregido a posteriori por Hillman (2003)).

Un aspecto importante a destacar es que el registro histórico de caudales medidos se produce en el Dique de Río Hondo a más de 300 km del inicio de los Bañados y del ingreso a la Laguna Mar Chiquita. Es entonces absolutamente importante conocer cuánto caudal ingresa efectivamente a la provincia de Córdoba.

Es por esto que en esta Práctica Profesional Supervisada no solo se aborda el tema de la Dinámica de los Bañados, sino también se presenta la actualización de la curva H-Q tendiente a aforar el caudal del cauce del río Dulce en su ingreso a la provincia de Córdoba.

### **1.5.1. Marco Teórico de la Dinámica de los Bañados del río Dulce y la Laguna Mar Chiquita**

Las técnicas del balance hídrico son un medio para solucionar importantes problemas hidrológicos teóricos y prácticos. A partir de un estudio del balance hídrico es posible plantear

una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre.

La ecuación dinámica de balance hídrico que puede aplicarse a una laguna presenta la siguiente forma:

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = (Q_i - Q_s) + AL (P - E) + (G_i - G_s) \quad \text{(Ec. 1)}$$

Donde  $\Delta V$  es la variación de volumen de la laguna (L),  $\Delta T$  es el intervalo de tiempo,  $Q_i$  son los caudales de entrada aportados por los tributarios al sistema, y  $Q_s$  los caudales de salida,  $AL$  es el área de la laguna,  $P$  la precipitación media areal sobre la laguna,  $E$  es evaporación, y  $G_i$  y  $G_s$  son los aportes y salidas de agua subterránea.

El sistema en estudio formado por la Laguna Mar Chiquita es endorreico, por lo tanto la variable de caudal de salida superficial es nula ( $Q_s = 0$ ). Además en Piovano et al. (2010) el estudio de un balance de cloruros indicó que el lago está hidrológicamente cerrado sin salida de agua subterránea significativa, por lo tanto la salida subterránea también se puede considerar nula ( $G_s = 0$ ) resultando:

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = Q_i + AL (P - E) + G_i \quad \text{(Ec. 2)}$$

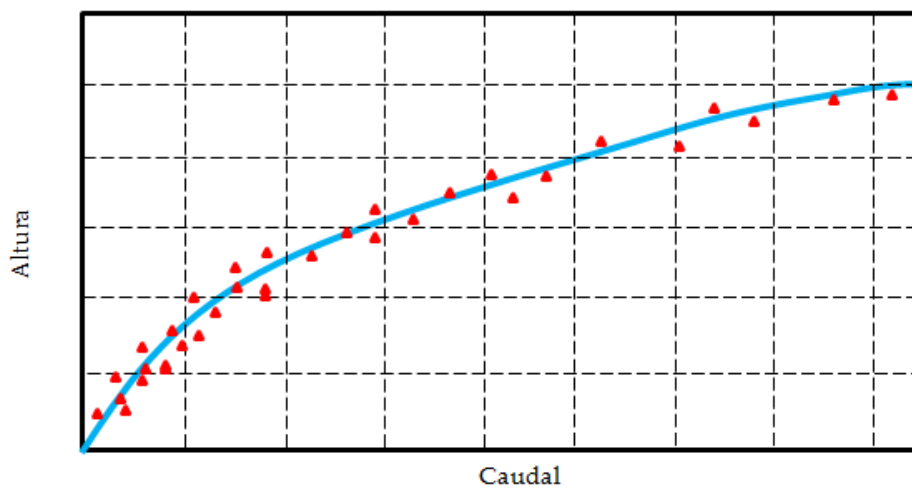
Finalmente, el conocimiento del balance hídrico permite una evaluación indirecta de cualquier componente desconocido dentro de este, por diferencia entre los componentes conocidos. En este sentido, las variables a la derecha de la (Ec. 2) presentan ciertas dificultades en su definición, ya que existen incertidumbres en la medición de sus componentes, principalmente los del agua subterránea ( $G_i$ ) y el caudal que ingresa al cuerpo de agua ( $Q_i$ ) luego de escurrir por los Bañados del río Dulce y las derivaciones por canales de riego no relevados en su totalidad.

Se destaca que, en el marco de dos Prácticas Supervisadas desarrolladas, se realizan los estudios de los caudales que ingresan a la Provincia de Córdoba y de las variables meteorológicas asociadas al balance vertical del sistema (P-E). En cuanto a la variable del agua subterránea ( $G_i$ ) que ingresa a la Laguna Mar Chiquita, se considera que es un término presente en la llanura que rodea el lago, ya que la capa freática se encuentra a pocos metros bajo la superficie del suelo. Sin embargo, no hay monitoreo piezométrico disponible para la

región que permita la cuantificación de los aportes de las aguas subterráneas a esta laguna, por lo que es necesario plantear su estudio y cuantificación.

### 1.5.2. Marco Teórico para la determinación de la Curva H-Q

Las curvas de altura de superficie libre (H) - caudal escurrido (Q) (**Figura 8**) permiten, a los organismos a cargo de la gestión de recurso hídrico, sistematizar el monitoreo de los caudales escurridos en un sistema fluvial en tiempo real, a través del monitoreo de una variable más sencilla para determinar experimentalmente como es la altura de superficie libre. Si estas curvas H-Q no cambian en el tiempo en una determinada sección de monitoreo, se dice que esta es una sección de control permanente. Por otro lado, la erosión o deposición de sedimentos en la sección de monitoreo, pueden generar variaciones temporales del lecho y por lo tanto producir alteraciones en las curvas. Las secciones de monitoreo en cursos fluviales con lecho rocoso o secciones que incluyan vertedero, por ejemplo construidos en hormigón, pueden ser aunque no siempre, secciones de control permanentes (Díaz Lozada, 2014).



**Figura 8.** Esquema típico de una curva altura de superficie libre (H) –caudal (Q)

Para la construcción de la curva H-Q se debe tener en cuenta que la sección seleccionada debe cumplir una serie de requisitos que garantizarán la validez de la curva en el tiempo, los mismos son:

- a) Estabilidad en el tiempo (procesos de erosión o deposición despreciables).
- b) Encontrarse en un tramo que no presente efectos significativos de curvas de remanso.

c) Cauce limpio y libre de obstáculos (se debe asegurar que la sección quede libre de elementos que modifique la rugosidad del lecho con la que fue calibrada la curva).

d) Accesibilidad y comodidad para tomar lectura en la escala y hacer los aforos necesarios cuando sea requerido.

La construcción de las curvas H-Q se puede realizar mediante:

- Aforos directos: Es el método tradicional y consiste en realizar numerosas mediciones de caudal en una sección determinada de un curso fluvial para un amplio rango de valores de alturas de superficie libre utilizando alguna técnica de aforo disponible (por ejemplo ADCP, Molinete, Velocimetría por imágenes de partículas a gran escala – LS-PIV-) y relacionarlas con la altura de superficie libre existente al momento de realizar la medición.

A partir de esta información, se realiza un ajuste estadístico de distintas expresiones matemáticas. Las expresiones obtenidas del ajuste estadístico son solo válidas en el rango de valores de H y Q incluidos en la calibración. Tradicionalmente las técnicas de velocimetría tradicionales, como por ejemplo molinetes, presentan falencias en el monitoreo de caudales durante crecidas debido al riesgo para el operario asociado a su implementación, por lo que no se disponen de datos de H-Q registrados en condiciones de aguas altas por lo que se reduce el rango de condiciones de flujo donde es apropiado utilizar estas curvas.

Actualmente, esta desventaja está superada gracias a la implementación del ADCP y LS-PIV. La principal ventaja de este método para construir curvas H-Q es la sencillez en su determinación. Como desventaja de esta metodología se puede decir que la misma insume mucho tiempo para la construcción de la curva, ya que se deben registrar valores de H y Q en diversas condiciones de flujo a lo largo de periodos de aguas bajas, medias y altas año para que la curva obtenida sea representativa.

- Ecuaciones empíricas: Existen ecuaciones empíricas que relacionan las profundidades de flujo y los caudales escurridos en una determinada sección natural de un curso fluvial (por ejemplo la ecuación de Manning) y para escurrimientos en estructuras de control (por ejemplo en vertederos). Estas ecuaciones incluyen parámetros que pueden ser determinados a priori a partir de ábacos existentes o partir de la calibración de esas relaciones utilizando datos obtenidos en campañas de aforo.

- Simulaciones Numéricas: Debido al desarrollo de los modelos numéricos y del incremento de la capacidad de cálculo de las computadoras disponibles, en la actualidad es posible construir curvas altura de superficie libre - caudal mediante simulaciones numéricas del flujo en cursos fluviales y estructuras de control para distintas condiciones de escurrimiento (aguas altas, medias y bajas). En la implementación de esta metodología se requiere realizar algunos aforos con el objeto de calibrar y validar el modelo. Esta metodología permite ahorrar una gran cantidad de tiempo pero su principal desventaja se manifiesta en secciones donde se presentan condiciones de flujos complejas (con características bi y tridimensionales) por lo que requiere modelos numéricos engorrosos que requieren mayor resolución y tiempos de cálculo.



## **1.6. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO**

La Laguna Mar Chiquita y los Bañados del río Dulce, constituyen uno de los sistemas cerrados más importantes de Argentina. Este sistema tiene tres afluentes: al sur los Ríos Suquía y Xanaes y al norte el Río Dulce o Petri (**Figura 9**). Si consideramos la suma de las cuencas de aporte correspondientes a los tributarios se alcanza una superficie total cercana a los 72.000 km<sup>2</sup>.

Hacia el norte de la Laguna y por las características topográficas del terreno (pendiente <1%) se forman los Bañados del río Dulce, ocupando el sureste de la Provincia de Santiago del Estero y noreste de Córdoba. Este subsistema posee una gran fluctuación de superficie inundada, entre 325 km<sup>2</sup> en la época seca y 12000 km<sup>2</sup> en época húmeda.

Los 3 tributarios principales del sistema (los ríos Dulce, Suquía y Xanaes) poseen regulación antrópica. Por su parte, el río Suquía se encuentra regulado desde su nacimiento por el Dique San Roque y posee un caudal medio de aproximadamente 10 m<sup>3</sup>/s; en el trayecto hacia la laguna (203 km) la pendiente varía desde 6 m/km (6 ‰) a 3 m/km (3 ‰) en la cuenca baja.

El río Xanaes tiene una dirección Este-Noreste sensiblemente paralela al río Suquía, su cuenca es de aproximadamente 6.700 km<sup>2</sup> con pendientes de 3% al 1,5 %.

El río Dulce escurre por más de 300 km a través de una planicie de baja pendiente (0,025%), con frecuentes divagaciones y cambios de curso, en una red de canales difusa en su tramo inferior.

El uso de la tierra y las economías regionales en el humedal de Mar Chiquita varía en función de las distintas subregiones del sistema. En los bañados del río Dulce predomina la ganadería trashumante que aprovecha los pastizales inundables durante la bajante de invierno. La Laguna es en la actualidad un importante centro pesquero. La costa sur tiene un desarrollo turístico importante, al cual se agrega la creciente adición del ecoturismo nacional e internacional. Asimismo, la industria peletera a base de especies silvestres (principalmente nutria) es importante, aunque ha tenido variaciones importantes en las últimas décadas. La industria pesquera ha estado en continuo incremento desde que el nivel de las aguas permitió la expansión del pejerrey en la Laguna.

### Cuenca del Río Salí-Dulce y otras cuencas hidrográficas del Sistema Mar Chiquita

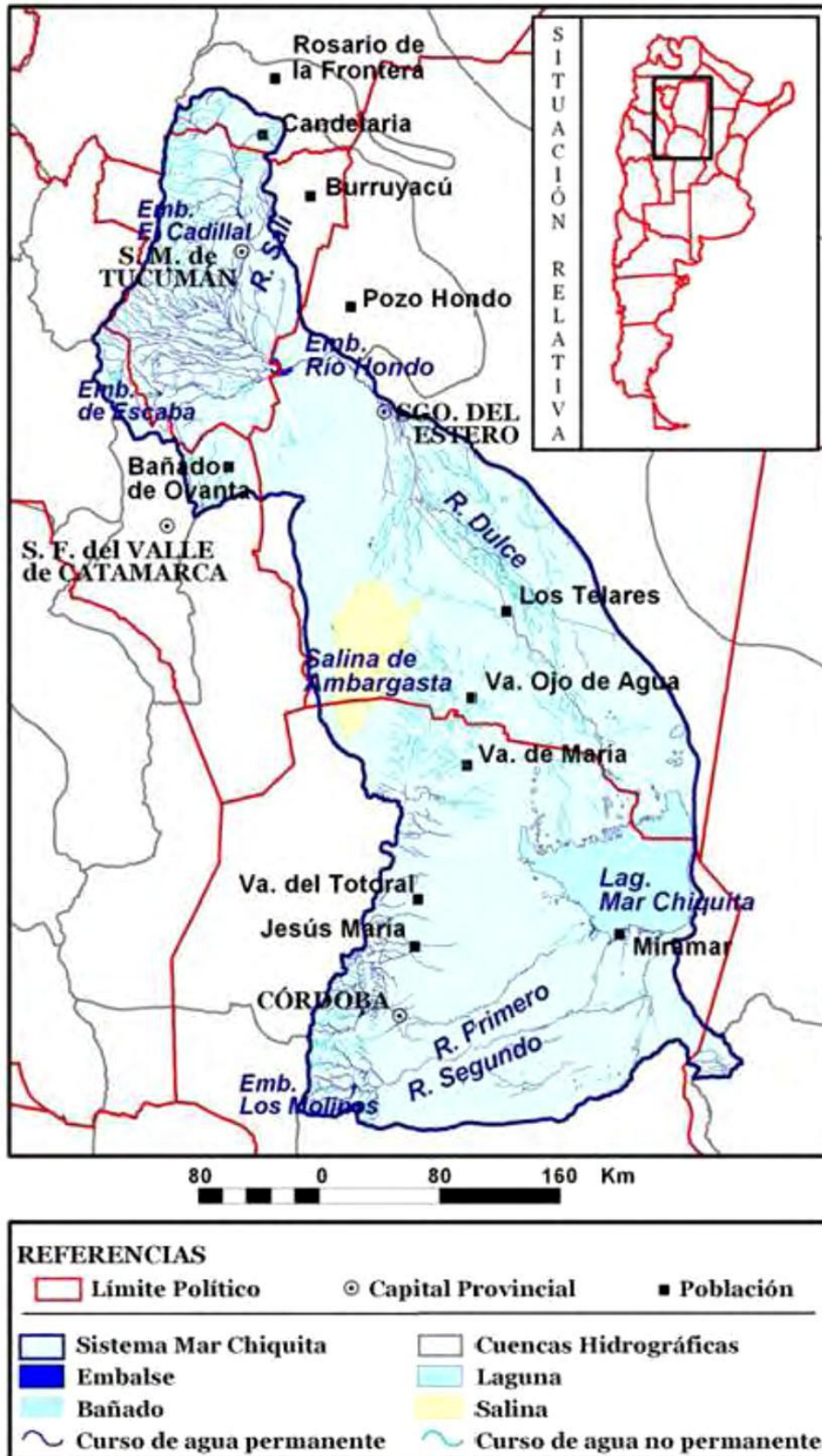


Figura 9. Sistema de la Laguna Mar Chiquita.

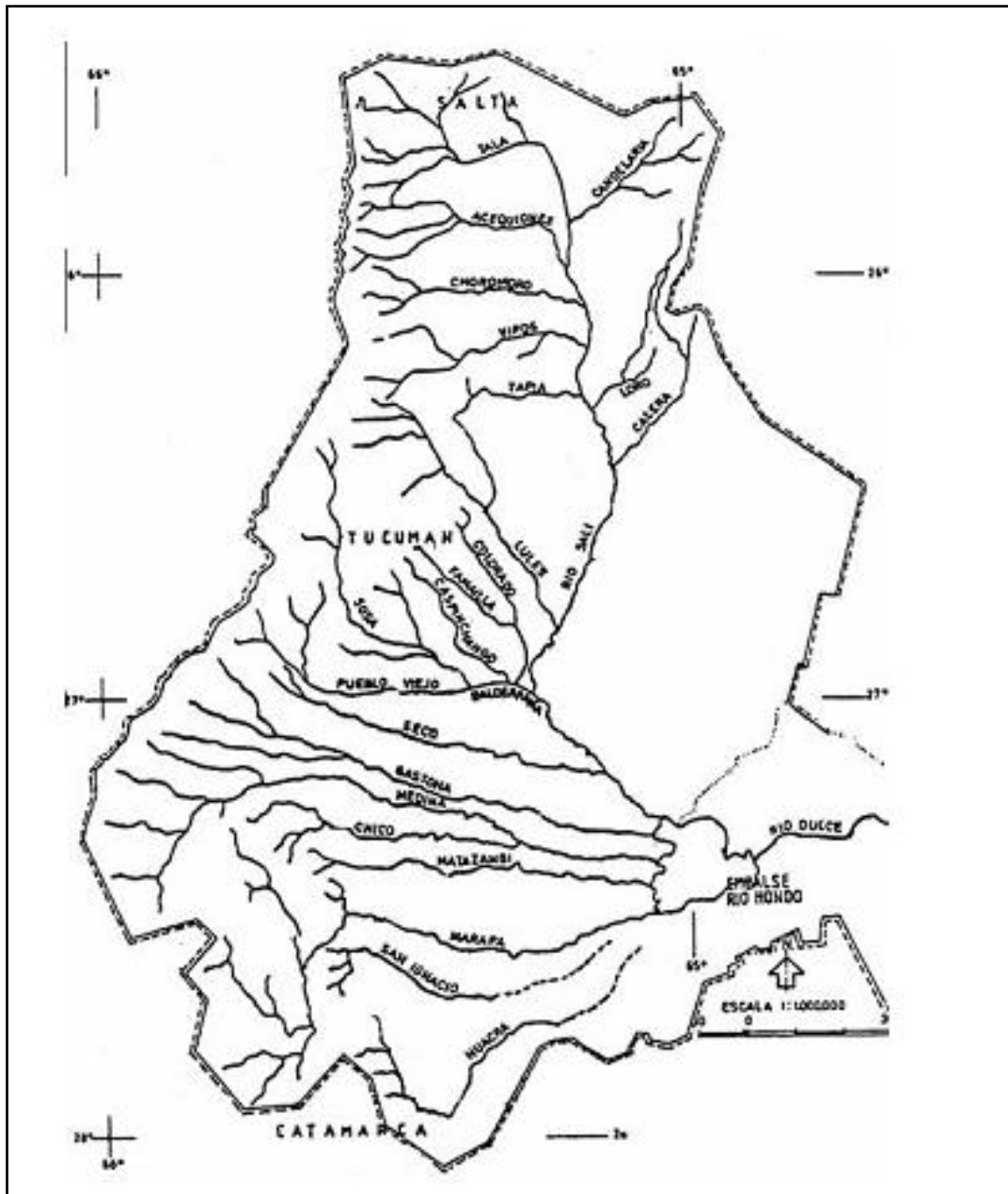
Fuente: SSRRHH, 2012.

### **1.6.1. Cuenca del río Dulce (Petri)**

La cuenca de aporte del río Dulce comprende dos regiones. La primera es la región Superior con aproximadamente 72.000 km<sup>2</sup> y abarca las Provincias de Tucumán, Salta y Catamarca. Aquí el Río recibe el nombre Salí y sus principales afluentes bajan por las sierras Calchaquíes y del Aconquija desembocando en el Salí por la margen derecha (**Figura 10**).

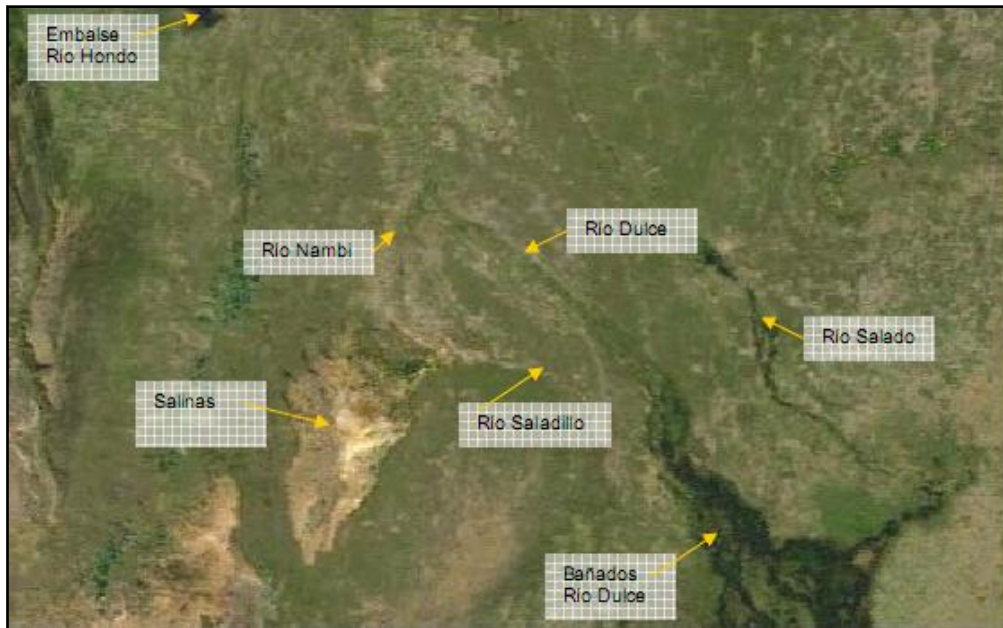
La región Inferior comprende un área de casi 22.000 km<sup>2</sup>, a partir de la entrada del río a la Provincia de Santiago del Estero a través del Embalse Río Hondo, el mismo recibe el nombre de río Dulce y discurre por una zona de llanura, sin recibir prácticamente ningún aporte.

La subcuenca del Salí hasta el Dique Río Hondo (**Figura 11**) está limitada: al Oeste (de Norte a Sur) por las sierras de Carahuasi; cumbres Calchaquíes, cumbres del Aconquija (Muñoz, Ánimas, El Nevado y Las Lajas), sierras de La Carreta, Humaya, Las Higueritas y del Potrerillo; al Norte: por la divisoria de aguas de los afluentes del río Tala y Lomas de San Esteban; al Este: por las cumbres de las sierras de La Candelaria, del Nogalito y de la Ramada y los cauces de los arroyos Muerto, Mista y Los Gómez; al Sur: por las lomadas que limitan hacia Catamarca al río Huacra o San Francisco y el curso seco de este último hasta el río Graneros o Marapa, el cual, con el Medina, forman el río Hondo, cuya desembocadura en el embalse Río Hondo determina su cambio de nombre por el de río Dulce, con el que penetra a la Provincia de Santiago del Estero.



**Figura 10.** Región superior de la cuenca de aporte del Río Dulce hasta el embalse Río Hondo.  
Fuente: CFI, 1983

El cauce del río mide aproximadamente 120 m de ancho en su curso superior, dentro de la Provincia de Tucumán, y corre bien encajonado. Al entrar en territorio santiagueño, a partir del Dique Río Hondo, el río discurre en forma meandrosa entre barrancas de 30 a 40 m, formando un pequeño valle de 1.000 a 1.500 m de ancho. A unos 40 km al Sur de la ciudad de Santiago del Estero, las barrancas van disminuyendo de altura y aumentando su ancho.



**Figura 11.** Región inferior de la cuenca del Río Dulce desde el embalse Río Hondo.  
Fuente: Informe final UNC - UNSE a SSRH (2007)

Desde ese punto de confluencia continua un único cauce y unos 10 km, aguas abajo, nuevamente se bifurca en dos brazos: el río Dulce (oriental) y el río Dulce Viejo (occidental) que se vuelven a encontrar a la altura de Los Telares. En el curso de esta nueva bifurcación, la rama oriental recibe el caudal del río Seco, a partir de donde se pueden activar cauces efímeros sobre otros tributarios: Rosario del Saladillo, Mailén y Tontola, uniéndose aguas abajo, originando el río Utis.

El cauce principal, a partir de aquella primera bifurcación (a unos 40 km al Sur de Santiago del Estero) se vuelve sumamente meandroso, activando alternadamente cauces efímeros, existiendo una variada red de drenaje con antiguos cauces, correspondientes a otras tantas etapas de evolución fluvial de este tramo del río, actualmente muy inestable.

### **1.6.2. Bañados del río Dulce**

Los Bañados del Río Dulce (Río Petri) se extienden en el noreste de la Provincia de Córdoba y sureste de la Provincia de Santiago del Estero, abarcando 3.909 km<sup>2</sup> aproximadamente (**Figura 12**). Forman el área de inundación del Río Dulce, tributario principal de la Laguna Mar Chiquita (Mar de Ansenusa) y del sistema de bañados que en conjunto ocupan la depresión.

La alta variabilidad en los caudales de su afluente principal, el Río Dulce (0 a más de 2.000 m<sup>3</sup>/s) determina la formación de lagos y zonas inundadas permanentes, estacionales e intermitentes de gran extensión durante el período de crecientes. Durante el estiaje muchos de estos humedales pierden contacto con el curso principal y aumentan su salinidad por evaporación.



**Figura 12.** Región de los Bañados del río Dulce.

### **1.6.3. Cuenca del río Primero (Suquia)**

El río Suquía posee una cuenca de aproximadamente 6.000 km<sup>2</sup> y adquiere su nombre a la salida del embalse San Roque. Su caudal medio es de aproximadamente 10 m<sup>3</sup>/s, medidos en un comienzo en la localidad de La Para y luego en río Primero (aproximadamente a 140 km de la Laguna Mar Chiquita) (**Figura 13**).

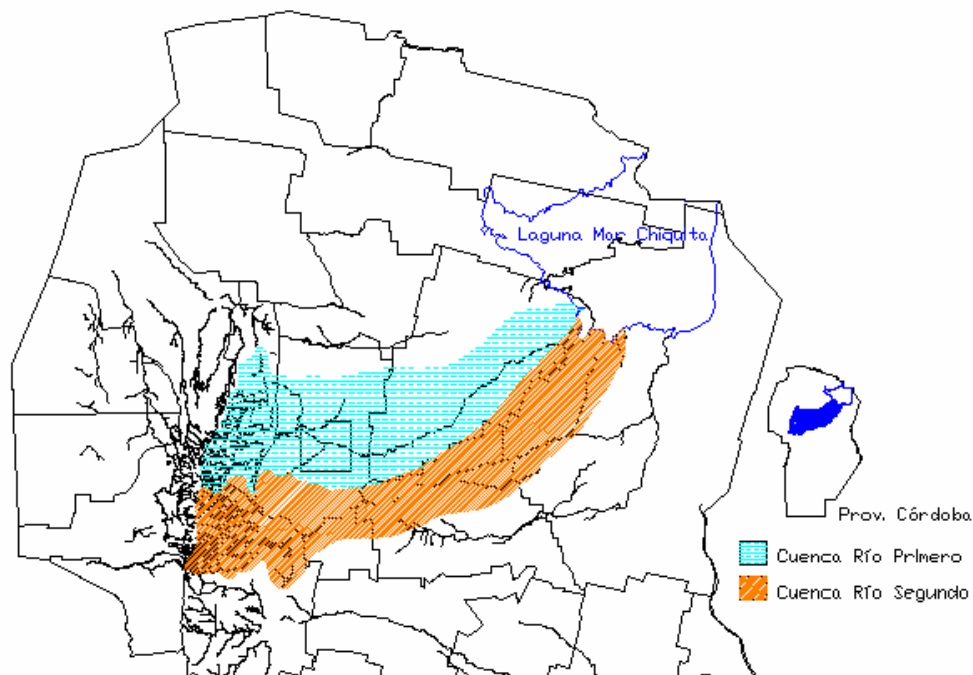
La cuenca superior del río se extiende entre los dos cordones montañosos llamados Sierra Grande y Sierra Chica, la misma tiene un largo de 70 km de Norte a Sur, y un ancho medio de 20 km, aproximadamente ocupando una superficie total de 1.650 km<sup>2</sup>.

#### 1.6.4. Cuenca del río Segundo (Xanaes)

El río Segundo o Xanaes nace en la falda oriental de las Sierras Grandes, al sur de la cuenca del río Suquía. Adquiere su nombre a partir de la unión de los ríos Los Molinos y Anizacate, y recibe tributarios menores como el arroyo San Agustín.

El río Los Molinos está formado, a su vez, por los ríos San Pedro, Espinillo, del Medio y Los Reartes, y antes de unirse al Anizacate recibe por la margen derecha al arroyo San Agustín, que viene desde el sur. El río Anizacate está formado por los ríos La Suela y San José o Santa Ana, y antes de juntarse con Los Molinos, recibe en su margen izquierda al arroyo Alta Gracia. Si bien su módulo es mayor que el del Suquía, también se infiltra antes de llegar la Laguna de Mar Chiquita, dividiéndose después de la localidad Arroyito (a 60 km de la Laguna) en el brazo Plujunta y el arroyo Los Guevara (**Figura 13**).

Su cuenca montañosa se extiende entre las cumbres de la Sierra Grande, al Oeste, y los distintos cordones de la Sierra Chica, al Este, ocupando una superficie de 1.580 km<sup>2</sup>.



**Figura 13.** Cuencas hidrográficas de los Ríos Suquía (Primero) y Xanaes (Segundo).

Fuente: Informe final UNC - UNSE a SSRH, 2007.

### 1.6.5. Laguna Mar Chiquita (Mar de Ansenuza)

Esta laguna salada se ubica en el extremo Noreste de la Provincia de Córdoba, entre los 30°20' y 31° de latitud Sur y entre los 62°40' y 63°10' de longitud Oeste. Comprende territorios de los Departamentos de Tulumba, Río Primero y San Justo, ocupando una depresión de aproximadamente 100 km en dirección Norte-Sur y 100 km en dirección Este-Oeste (**Figura 14**)

El espejo de agua varía entre 2.000 a 4.500 km<sup>2</sup> para los niveles medios, que se corresponden a cotas de 66 y 69 m s.n.m., respectivamente, pudiendo alcanzar un área de 6.500 km<sup>2</sup> para niveles altos (70 a 71,5 m s.n.m.)

Es el mayor cuerpo de agua de la República Argentina según su superficie, la cual varía a su vez considerablemente con los niveles por tratarse de una laguna poco profunda (10 m en promedio) y de una zona de llanura especialmente al Norte (con 2 a 3,5 m de profundidad), por lo que se presentan grandes variaciones de volumen, dependiendo fundamentalmente del aporte del río Dulce, en menor proporción de los demás ríos que en esta desembocan y del aporte de los escurrimientos de aguas pluviales en épocas de precipitaciones abundantes.

Está limitada lateralmente por dos escalones aproximadamente paralelos, uno al Oeste denominado Barranca del Saladillo y otro al Este conocido como Borde de los Altos. En el borde inferior con dirección Este-Oeste se encuentran las elevaciones de Alto de Chipión. La mayor profundidad se encuentra en el Sur, disminuyendo progresivamente hacia el Norte. La isla más importante es la del Médano de aproximadamente 2 km de longitud y 150 m de ancho ubicada a 15 km al Noroeste de Miramar.



**Figura 14.** Laguna Mar Chiquita, ubicación.



# Capítulo 2

## REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

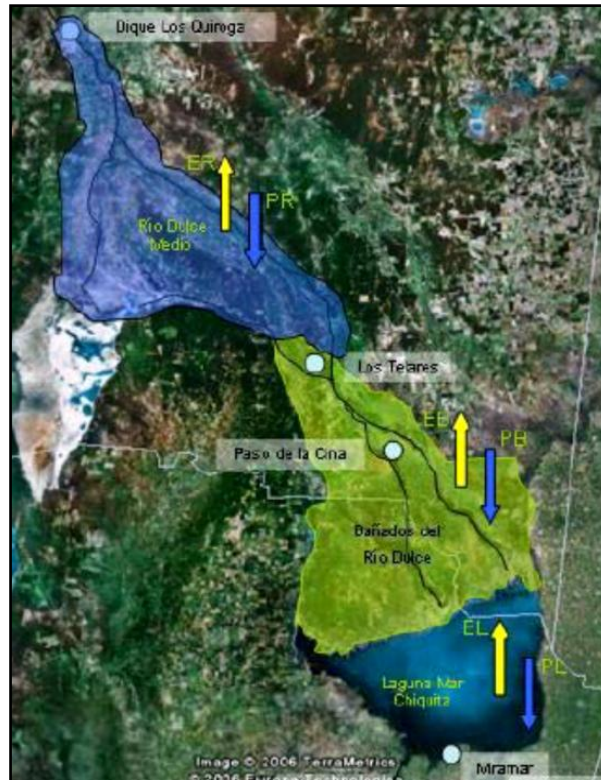
### 2.1. ANTECEDENTES DE NIVELES DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

Se realizó una revisión de las series de niveles de agua medidos en la costa sur de la Laguna Mar Chiquita, presentadas en Hillman (2003), en LH-UNC (2011), y niveles históricos estimados en Piovano *et al.* (2002), con lo que se determinó la existencia de series de niveles hasta el año 2011.

### 2.2. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON EL ESTUDIO DE LA DINAMICA DE LOS BAÑADOS DEL RIO DULCE

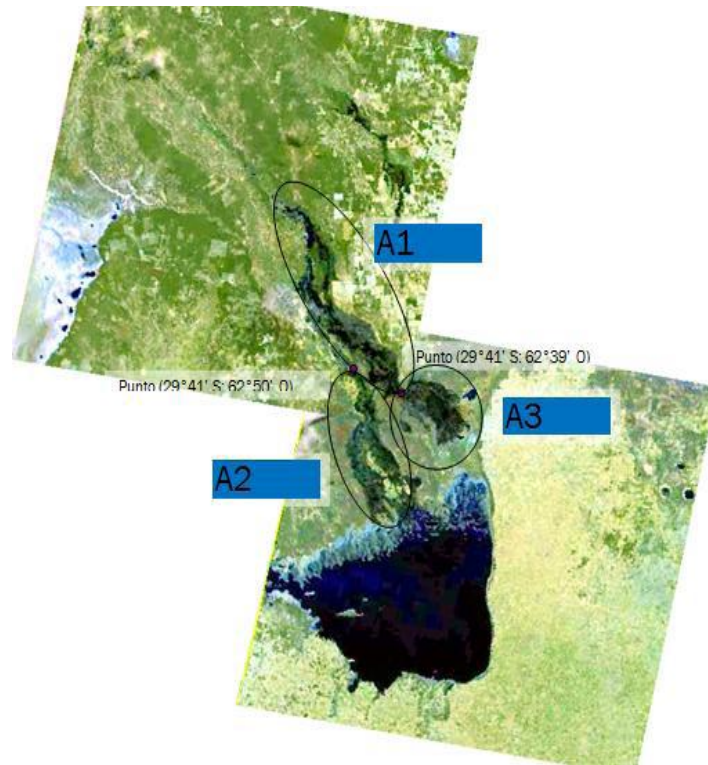
En Pagot (2003) se realiza el análisis y simulación hidrológica del sistema formado por los Bañados del río Dulce. En este contexto se midió el área de Bañados en el período 1997 - 2001. Los límites superior e inferior fijados para el sistema fueron: una línea horizontal que cruza el río Dulce en Los Telares como límite superior, y la desembocadura de los diversos brazos en que se divide el río Dulce como límite inferior (**Figura 15**).

En LH-UNC (2007) se presenta una actualización de las áreas medidas hasta 2005.



**Figura 15.** Subregiones definidas: 1) Río Dulce Medio (azul), 2) Bañados del Río Dulce (verde) y 3) Laguna Mar Chiquita.  
Fuente: Pagot, 2003.

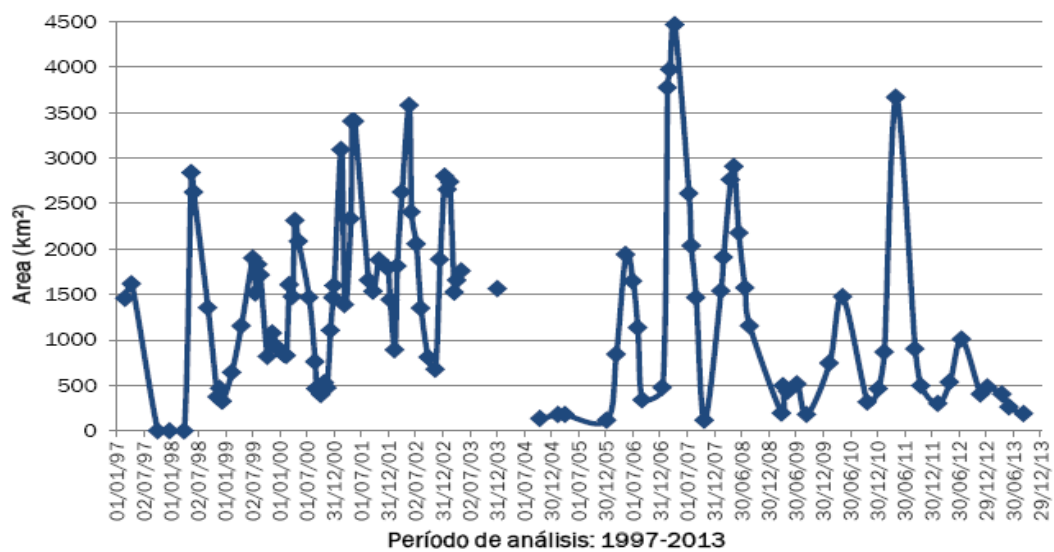
En el trabajo de Mery Julien (2010) se midieron las áreas durante el período 2006 - 2009. Se diferenciaron 3 zonas de Bañados: Bañado Norte (A1), Sur (A2) y Este (A3); separándolos por puntos de coordenadas conocidas, que surgieron de la identificación de puntos críticos del río Dulce (o secciones de desborde) con coordenadas conocidas (**Figura 16**).



**Figura 16.** División de los Bañados en 3 áreas.  
Fuente: Julien, 2010.

En Vargas (2014) se midieron áreas durante el período 2010 - 2014 con el mismo criterio utilizado en Julien (2010) .

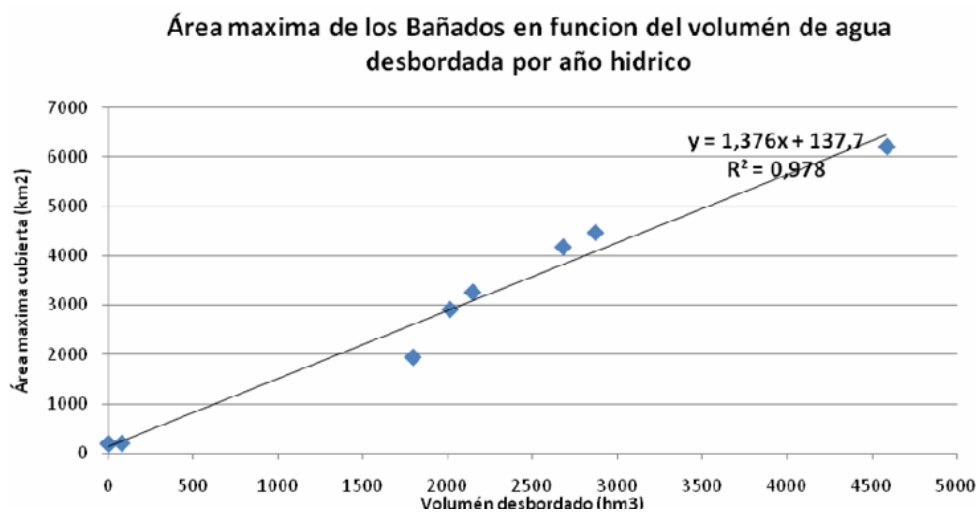
Se considera que la diferencia en la delimitación del sistema en los estudios anteriores no es relevante con respecto a la magnitud de la medida del área. Por lo tanto, se presenta la variación del área de Bañados en función del tiempo cubriendo el periodo 1997-2013 (**Figura 17**).



**Figura 17.** Áreas de Bañados medidas. Periodo: 1997-2013.  
Fuente: Vargas, 2014.

En Pagot (2003) se determinó que una de las variables más influyentes sobre las áreas de Bañados son: las descargas del río Dulce (medidas como caudales erogados por el embalse Río Hondo). La relación con esta variable se expresó a través del concepto de *caudal de desborde*.

En Julien (2010) se determinó la función que relaciona área de Bañados con volúmenes desbordados (Ec. 3), y se la relacionó con la activación de las distintas zonas de Bañados citadas anteriormente. En la **Figura 18** se presenta la relación numérica entre las áreas medidas y los volúmenes desbordados estimados.



**Figura 18.** Área máxima de los Bañados en función del volumen de agua desbordada por año hídrico.

Fuente: Julien, 2010

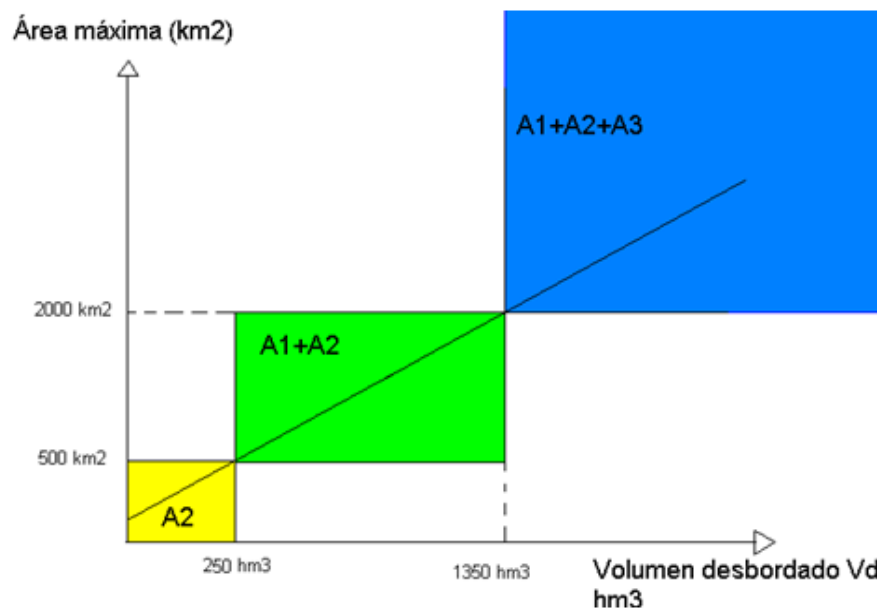
$$\text{Área Máxima (km}^2\text{)} = 1.38 * \text{Volúmen desbordado (hm}^3\text{)} + 137.7 \quad \text{(Ec. 3)}$$

El término independiente equivalente a 137,7 km<sup>2</sup> corresponde al área persistente de Bañados.

Se definieron los escenarios de formación de los Bañados sobre un año hídrico son **(Figura 19)**:

- Bañados chicos: Para una cantidad desbordada de 250 hm<sup>3</sup>, el área de los Bañados no superara los 500 km<sup>2</sup>.

- Bañados medios: Corresponde a los años donde la cantidad de agua desbordada es suficiente para formar los Bañado Norte y Sur, pero no para activar el Bañado Este. El volumen desbordado mínimo para activar este escenario es de 250 hm<sup>3</sup>.
- Bañados grandes: Se da en los años donde el volumen desbordado supera 1350 hm<sup>3</sup>, por lo que se activa también el Bañado Este. El área total de los Bañados crece hasta los 3000 km<sup>2</sup>.
- Bañado excepcional: Corresponde a los años donde el volumen desbordado es muy alto. El periodo de desborde sigue aún cuando el Bañado Este empieza a crecer, y dura como mínimo 2 a 3 meses seguidos. El área total de los Bañados puede llegar hasta 5000 km<sup>2</sup>.



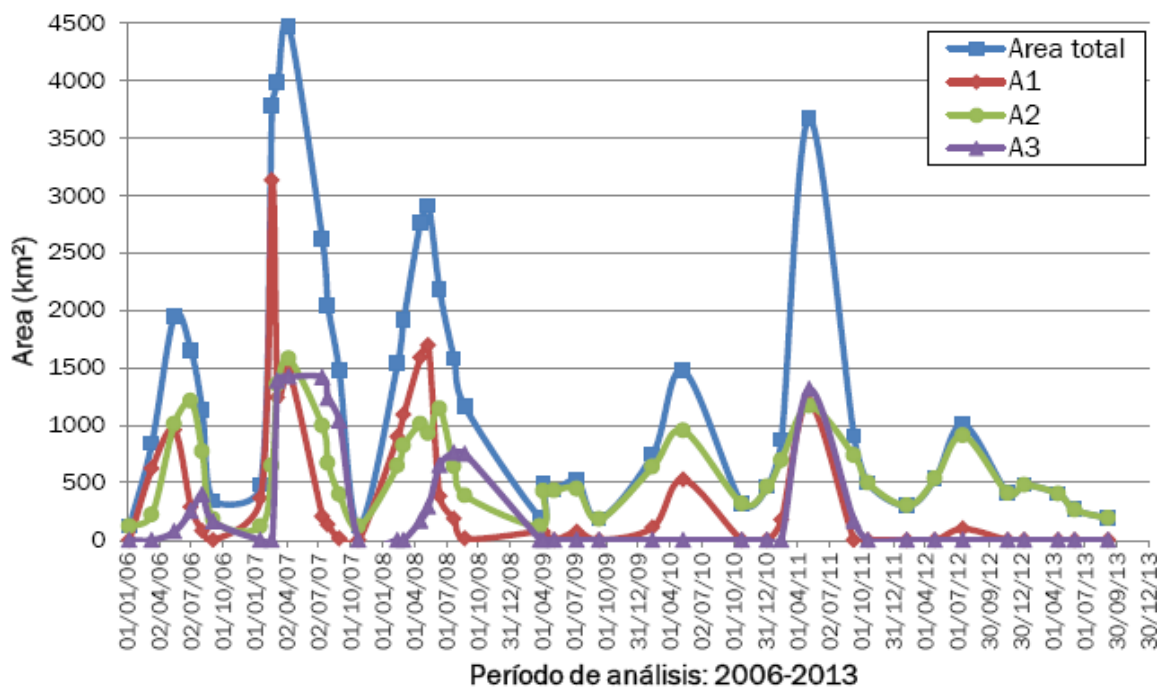
**Figura 19.** Escenarios posibles con valores de volumen desbordado y área de los Bañados del río Dulce. Fuente: Julien, 2010.

### 2.3. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

En Julien (2010) se analizaron imágenes satelitales de la serie LANDSAT (5 y 7), extraídas del Catálogo de Imágenes de la página web de la CONAE ([www.conae.gov.ar](http://www.conae.gov.ar)), correspondientes al período desde enero 2006 a marzo de 2009.

En Vargas (2014) se realizó una actualización del mencionado estudio hasta diciembre de 2013, en donde se analizaron 26 imágenes satelitales de las cuales 20 imágenes corresponden al Path/Row: 228-81, zona donde se presentan los Bañados Sur (A2) y Este (A3); y 6 imágenes corresponden al Path/Row: 229-80, zona donde se forma el Bañado Norte (A1).

En la **Figura 20** se presenta la actualización de las series de áreas de Bañados definidas en Julien (2010) con el periodo analizado en Vargas (2014).



**Figura 20.** Serie actualizada de áreas de Bañados: A1, A2, A3 y Área total. Período 2006 - 2013. Fuente: Vargas, 2014.

## **2.4. ANTECEDENTES DE CAUDALES EROGADOS POR EL RIO DULCE**

Se realizó la recopilación de datos de caudales del río Dulce existentes hasta la fecha, con lo que se obtuvieron series de caudales en las siguientes estaciones:

- Embalse de Río Hondo
- Estación de aforo La Escuela
- Estación de aforo El Sauce
- Dique derivador Los Quiroga
- Estación de aforo Los Telares
- Estación de aforo Paso de Oscares
- Estación de aforo Paso de la Cina

A continuación se detallan los datos existentes hasta marzo del año 2013:

En Dique de Río Hondo, se cuenta con series de caudales diarios derivados por la presa desde el año 1968 hasta 2009, obtenidos de la suma de los caudales erogados por turbinado, vertedero, válvula y descarga. También se tienen series medias mensuales entre los años citados anteriormente. Estos datos fueron facilitados por la Unidad Ejecutora de Riego del Río Dulce a través de la Universidad de Santiago del Estero (UNSE). Además contamos con series medias mensuales de caudales antes de la construcción de la presa, entre los años 1926 y 1967.

En Dique Los Quiroga, se tienen series de caudales diarios erogados desde el año 1975 hasta 1997, los cuales se encontraron en el Anexo de la tesis del Ing. Hillman. Dicha serie está compuesta por mediciones diarias de caudales realizadas en el dique. El periodo cubre desde el 1/02/1975 hasta 30/09/97. Fuente: CFI.

Los datos relevados constituyen los caudales ingresantes y derivados al sistema de riego. De esta forma se obtuvieron dos series de caudales, una de entrada y otra de salida (resta de caudales de entrada, menos los derivados) al dique. La serie diaria esta completa casi en su totalidad, con algunos intervalos sin datos (1989/1990).

Al ser esta estación la última, aguas abajo de río Hondo, que posee una serie lo suficientemente extensa y continua, es que se constituyo la misma como la base para estimar los caudales en el río Dulce en las proximidades de la laguna.

Ingresando a la base de datos hidrológica integrada de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, se pudo filtrar las distintas estaciones correspondientes a la cuenca Salí-Dulce, las cuales fueron ubicadas en Google Earth con sus correspondientes latitud y longitud. De las 45 estaciones ubicadas, solo dos están aguas abajo de la presa de Río Hondo: Estación Dulce – La Escuela y Estación Dulce – El Sauce (**Figura 21**). De ambas se pudo obtener series de caudales medios diarios máximos, caudales medios diarios mínimos desde la fecha 01/09/1926 hasta 01/09/1966 (El Sauce) y desde 01/09/54 hasta 01/09/57 (La Escuela) en lo que respecta a datos diarios y desde la fecha 01/09/1925 hasta 01/10/1967 (El Sauce) y desde 01/09/26 hasta 01/08/59 (La Escuela) correspondiente a datos mensuales.

De Hillman (2002) se obtuvieron datos de las estaciones de aforo de la La Escuela y El Sauce:

- La Escuela: Los datos constituyen una serie de caudales medios mensuales que cubren el periodo que va desde 09/1926 hasta 08/1982 (esta serie ha sido reconstruida a partir del año 1967; año de construcción del Embalse de río Hondo). Fuente: AyEE  
La serie perteneciente a esta estación de aforo debió ser analizada ante incoherencias que presentaron diversas fuentes, confundiéndose los valores con los de la serie de El Sauce.

Como resultado se llegó a la siguiente conclusión: En el período que cubre desde 09/1926 hasta 09/1959. Los caudales medios mensuales incluidos en la serie son resultados de mediciones realizadas en la estación de aforo La Escuela.

En el periodo 08/1959 - 11/1967 los caudales medios mensuales registrados en la serie fueron obtenidos mediante correlaciones con la serie de El sauce.

En el periodo 11/1967 - 08/1982 los valores resultan de correlacionar los caudales medios mensuales erogados por río Hondo y los aforados en el dique regulador Los Quiroga.

La estación de aforos de La Escuela, estaba emplazada en las proximidades de donde ahora se encuentra el embalse de río Hondo, por ello es que resulta lógico suponer que la serie de datos termine en 1959, coincidiendo esta fecha con los comienzos de la construcción del mencionado dique (Anexo Hillman, 2002).

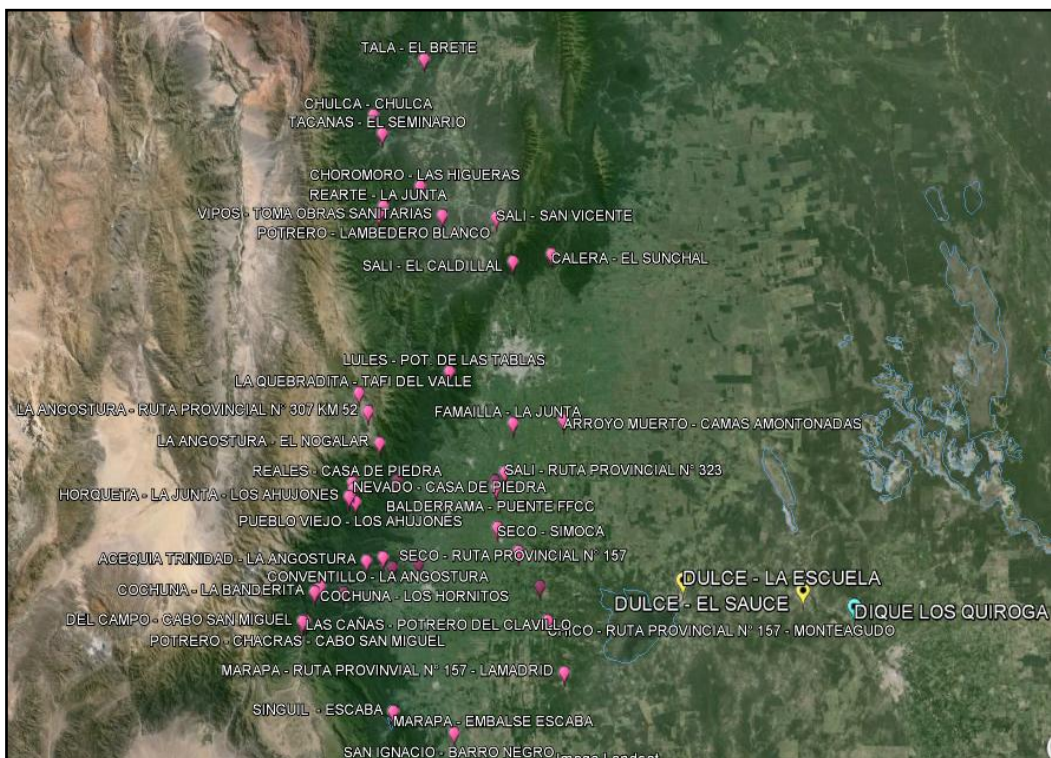
- El Sauce: Los datos constituyen una serie de caudales medios mensuales desde 09/1926 - 05/1980. Al igual que la serie correspondiente a La Escuela, se requirió un análisis similar a ésta debido a incoherencias que surgieron de comparar distintas fuentes.



Como resultado de este análisis, se llegó a la siguiente conclusión: En el período que cubre desde 09/1926 - 08/1954 los caudales medios mensuales incluidos en la serie son resultados de correlaciones con la serie correspondiente a La Escuela. En el periodo 08/1954 - 11/1967 los caudales medios mensuales registrados en la serie son los que se obtuvieron por aforos en la estación.

En el período 11/1967 - 08/1982 los valores obtenidos resultan de correlacionar los caudales medios mensuales erogados por río Hondo y los aforados en el dique regulador Los Quiroga.

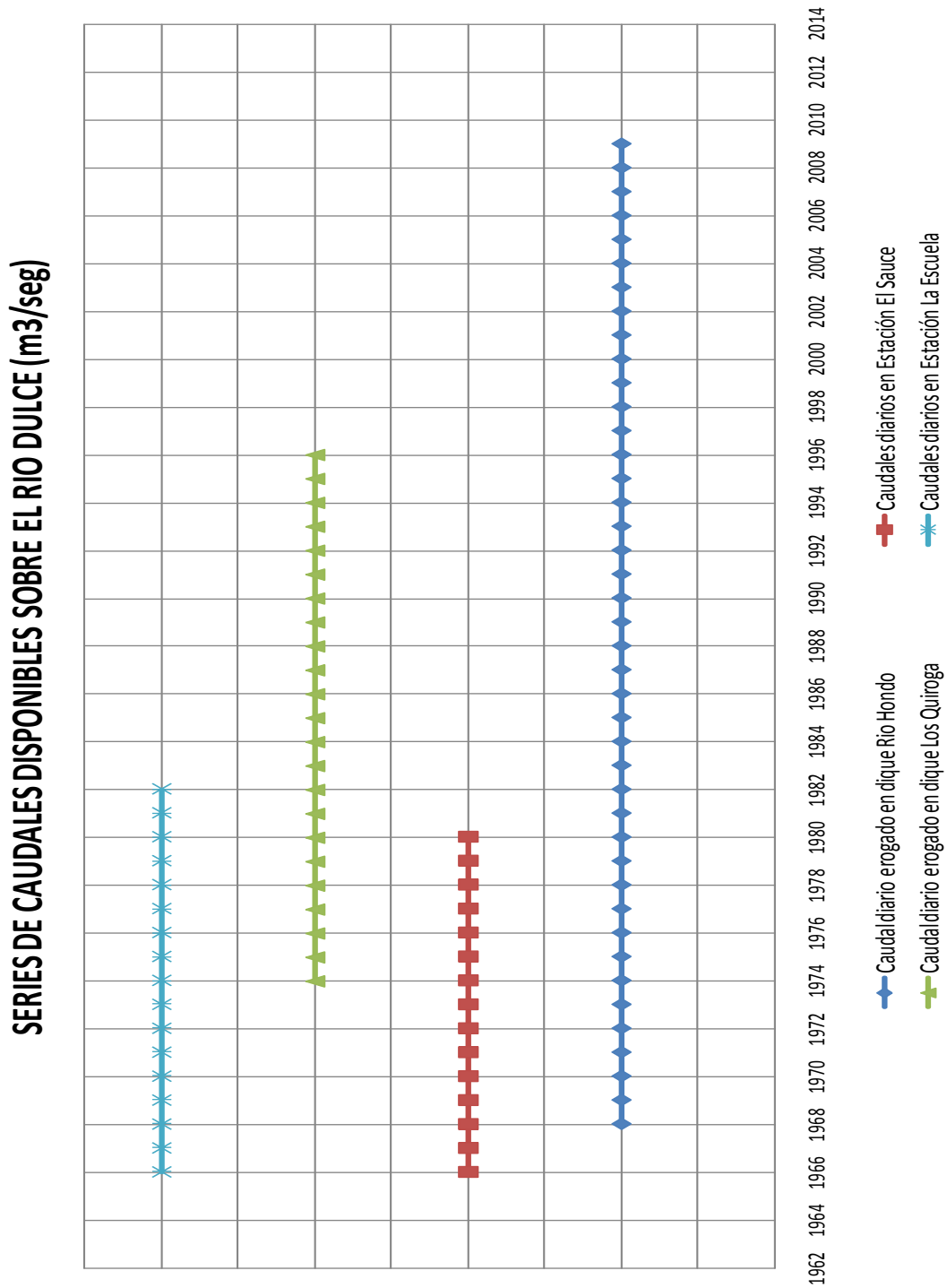
Existe otra serie de caudales medios mensuales en la estación de aforo El Sauce que cubre un periodo que va desde 09/1925 - 09/1996. La misma coincide con la anterior en el periodo común, aunque se desconoce cómo se obtuvieron los valores restantes ya que en la estación se dejó de aforar en 1967.



**Figura 21.** Ubicación de las distintas estaciones encontradas.

Se cuenta además con caudales diarios medidos en Los Telares, año 1982 (enero, febrero, marzo y abril), obtenidos de Pagot (2003). La serie fue provista por la D.I.P.A.S.

A continuación se muestra un gráfico resumen de las series de caudales recopiladas (Figura 22).



**Figura 22.** Resumen de series de caudales disponibles en diferentes puntos del río Dulce.

## **2.5. ANTECEDENTES RELACIONADOS CON LA EJECUCION DE CURVAS COTA - CAUDAL SOBRE EL RIO DULCE EN SECCIONES DE INTERES**

En el trabajo final de Navarro Ramos (2010), se realizaron tres campañas de monitoreo (durante diciembre de 2009; marzo y junio de 2010) en dos puntos distintos de la cuenca del Río Dulce, uno en Paso de Oscares y el otro en Paso de la Cina en los que se determinó la cantidad de agua.

### **2.5.1. Antecedentes de niveles y caudales aforados**

Los limnímetros situados en Paso de los Oscares y en Paso de la Cina, que registran automáticamente la variación de nivel permitieron disponer de los últimos registros que se tienen de series de niveles diarios, las mismas cubren el período desde octubre de 2006 a junio de 2010 en la primera sección de control y desde octubre de 2007 a junio de 2010 en la segunda sección.

En Pozzi (2006) y Navarro Ramos (2010) se realizaron campañas a dichas secciones en donde se realizaron aforos, lo mismo se presentan en la **Tabla 1** y **Tabla 2**.

<b>Paso de los Oscares</b>		<b>Paso de la Cina</b>	
<b>Fecha</b>	<b>Q aforado (m3/s)</b>	<b>Fecha</b>	<b>Q aforado (m3/s)</b>
08/11/2002	72.8	08/11/2002	108
20/06/2002	54	01/09/2003	28
24/02/2006	32	24/03/2004	41
29/07/2006	23	11/08/2004	25

**Tabla 1.** Resumen de aforos realizados.  
Fuente: Pozzi, 2006.

Paso de los Oscares		Paso de la Cina	
Fecha	Q aforado (m3/s)	Fecha	Q aforado (m3/s)
08/12/2009	16.90	08/12/2009	21.20
18/03/2010	86.00	18/03/2010	40.70
23/06/2010	63.00	23/06/2010	42.80

**Tabla 2.** Resumen de aforos realizados  
Fuente: Navarro Ramos, 2010

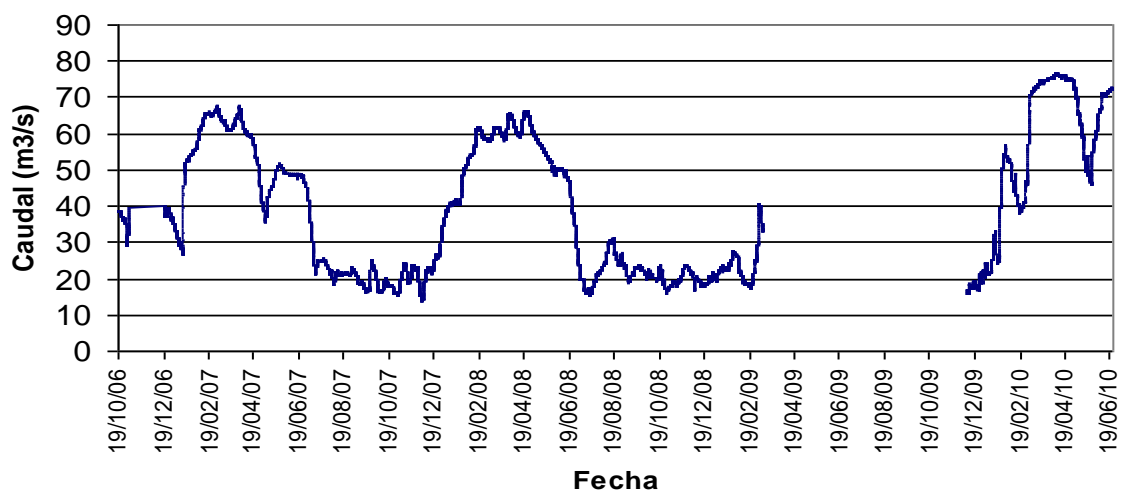
### 2.5.2. Antecedentes de las Curvas Cota - Caudal e hidrogramas

A partir de los aforos realizados en Navarro Ramos (2010), se ajustó una curva de tipo potencial. La cantidad de puntos fue escasa, ya que no se pudieron utilizar los aforos realizados anteriormente en Pozzi (2006) debido al uso de diferentes metodologías.

Con todo lo anterior, se obtuvo una expresión que vinculó los niveles registrados por los limnímetros con los caudales de la sección de control, con las que se pudo reconstruir los hidrogramas de cada sección en cuestión.

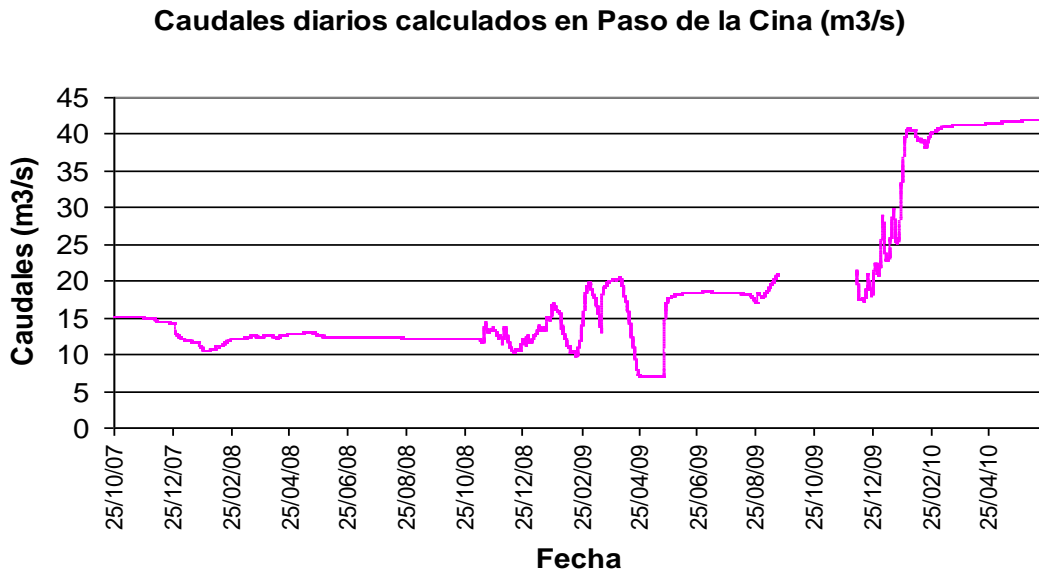
A partir de la utilización de la ecuación obtenida del ajuste de la curva H-Q en Paso de los Oscares, se obtuvo la serie de caudales que se presenta en la **Figura 23**:

**Caudales diarios calculados de Paso de Oscares (m3/s)**



**Figura 23.** Caudales diarios calculados en Paso de los Oscares (m<sup>3</sup>/s)  
Fuente: Navarro Ramos, 2010.

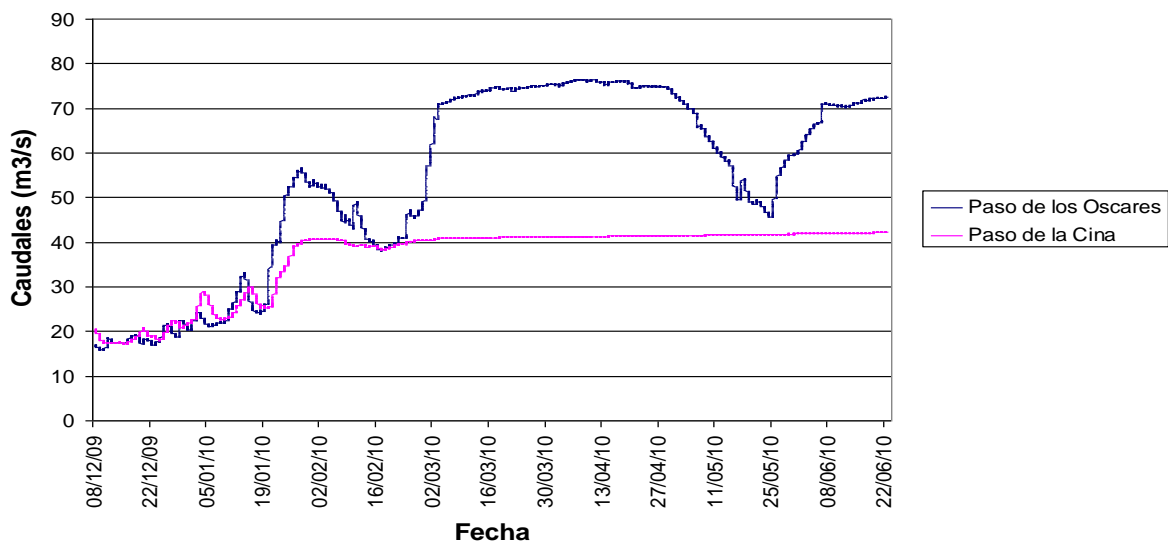
A partir de la utilización de la ecuación obtenida con la curva H-Q, los caudales correspondientes a Paso de la Cina se presentan en la **Figura 24**:



**Figura 24.** Caudales diarios obtenidos en Paso de la Cina (m<sup>3</sup>/s)  
Fuente: Navarro Ramos, 2010.

Los caudales que se obtuvieron según las mediciones no resultaron lógicos, con lo cual se intentó realizar una corrección teniendo en cuenta los caudales registrados en Paso de los Oscares para el periodo que comprende del 25 de octubre de 2007 al 6 de marzo de 2009.

La corrección de los datos no fue posible, por lo tanto se decidió tomar como datos de caudal diario correctos los datos tomados en el periodo que comprende desde el 8 de diciembre de 2009 al 23 de junio de 2010 (**Figura 25**):



**Figura 25.** Datos de caudales diarios correctos de Paso de los Oscares y Paso de la Cina  
Fuente: Navarro Ramos, 2010.

# Capítulo 3

## ACTUALIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS EXISTENTE

---

### 3.1. ACTUALIZACIÓN DE LA SERIE DE NIVELES DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

#### 3.1.1. Niveles diarios de la Laguna Mar Chiquita.

Durante el período 2001 - 2014, se contó con mediciones diarias de niveles de agua de la Laguna realizadas sobre escalas limnimétricas en Miramar (**Figura 26**), en la sede de la Reserva “Bañados del río Dulce y Mar de Ansenúza” por el Guardaparque Pablo Michelutti.

Se actualizó la Base de Datos del Laboratorio de Hidráulica (de la FCEFyN, UNC), correspondiente a las variables de niveles diarios y mensuales, tomando como base aquellas series presentadas en Hillman (2003), Pozzi (2006), Cereceda (2009), LH-UNC (2012) y con actualización propia desde el año 2011. Trabajo realizado en conjunto con la Ing. Constanza Vargas.

Las mediciones de nivel se registran sobre un conjunto de 6 (seis) escalas limnimétricas, ubicadas sobre la costa sur de la Laguna Mar Chiquita, detrás del Destacamento de la Reserva Natural en Miramar.

Los valores asociados a los ceros de cada escala resultaron los presentados en la **Tabla 3**, donde además se indica la ubicación de cada una asociada al sistema de referencia Gauss-Kruger Posgar 94.



**Figura 26.** Ubicación de Miramar.

ESCALA	Gauss Kruger (Zona 4)		Cota IGM (m.s.n.m.)
	N (m)	E (m)	
<b>C1</b>	6579635,51	4530097,89	70,03
<b>C2</b>	6579614,01	4530115,09	71,26
<b>C3</b>	6579646,20	4530049,79	69,05
<b>C4</b>	6579662,47	4529974,79	68,65
<b>C5</b>	6579696,41	4529939,77	69,36
<b>C6</b>	6579758,87	4529726,01	67,88

**Tabla 3.** Relevamiento topográfico de las escalas en la Laguna Mar Chiquita.  
Fuente: LH-UNC, 2012.

La **Figura 27** corresponde a una imagen satelital de la zona de la Reserva adquirida durante el año 2011. Se indican las ubicaciones en planta de las seis escalas limnimétricas colocadas frente a la Reserva provincial de Miramar. Actualmente los niveles se miden sobre la

escala C6, aunque debido al descenso del nivel se hace necesaria la pronta ubicación de una nueva escala, como se muestra en la **Figura 28**, cuya base ya se encuentra fuera del agua.



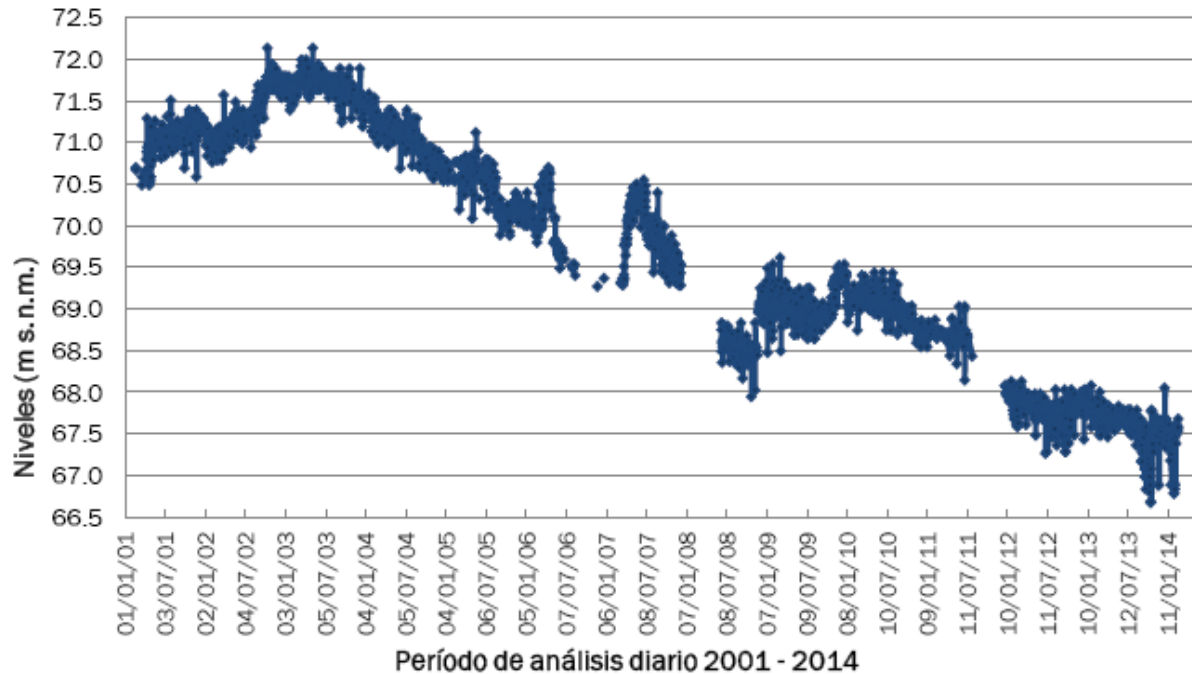
**Figura 27.** Ubicación en planta de las escalas limnimétricas colocadas frente al Destacamento de la Reserva de la Laguna Mar Chiquita.  
Fuente: Google Earth del año 2011.



**Figura 28.** Escala C6. Marzo de 2014.



En la **Figura 29** se presenta la serie actualizada de niveles diarios para el período 2001-2014.

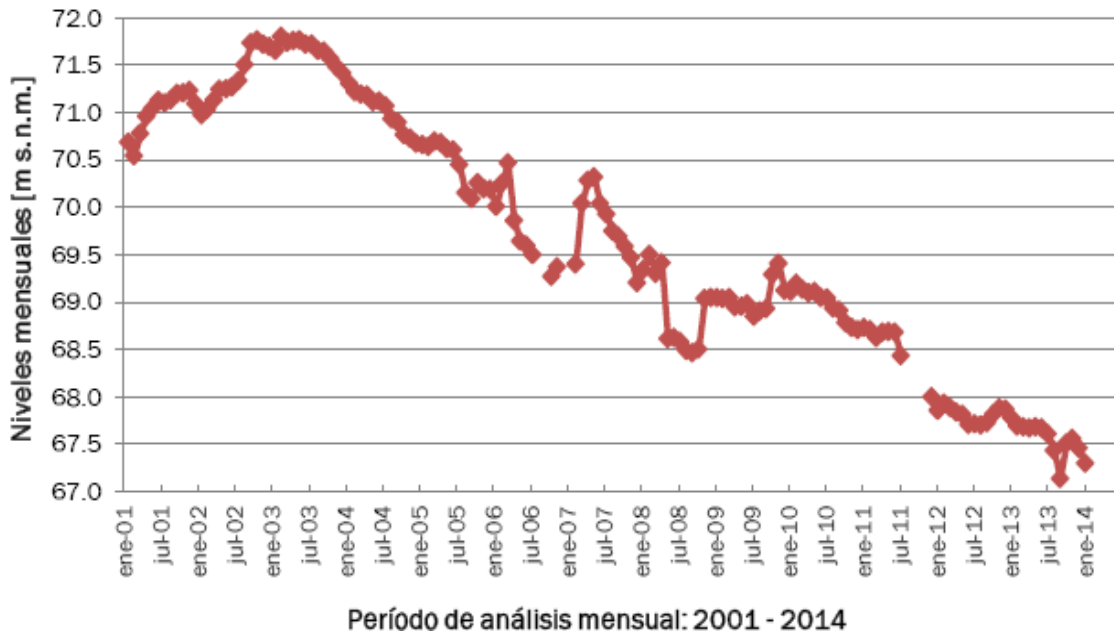


**Figura 29.** Niveles diarios LMCH. Período 2001-2014.  
Fuente: Vargas, 2014.

El nivel de agua se ve influenciado por la presencia de viento con direcciones predominantes norte y sur principalmente. En estos casos se genera un incremento o disminución del nivel en la costa sur de la Laguna donde se realizan las mediciones. Por esta razón se promediaron los niveles que presentaron diferencias significativas ( $\pm 0,2$  m) entre días consecutivos, según estimaciones presentadas en Pozzi (2006) y LH-UNC (2012).

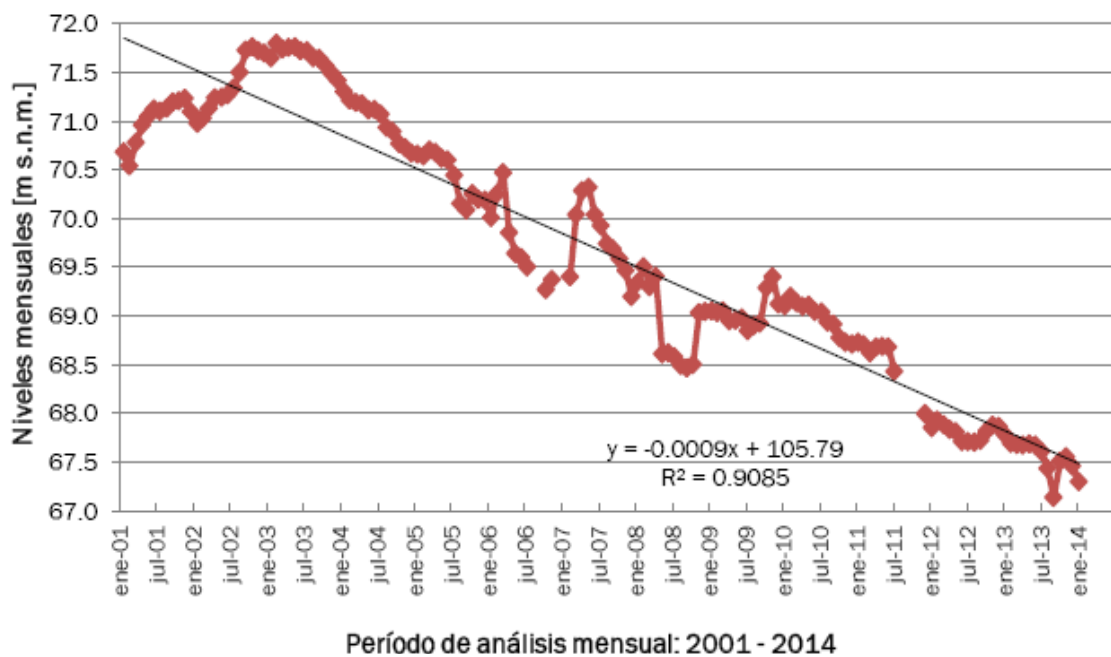
### 3.1.2. Niveles mensuales de la laguna Mar Chiquita

La serie de niveles mensuales para el período de estudio se presenta en la **Figura 30**.



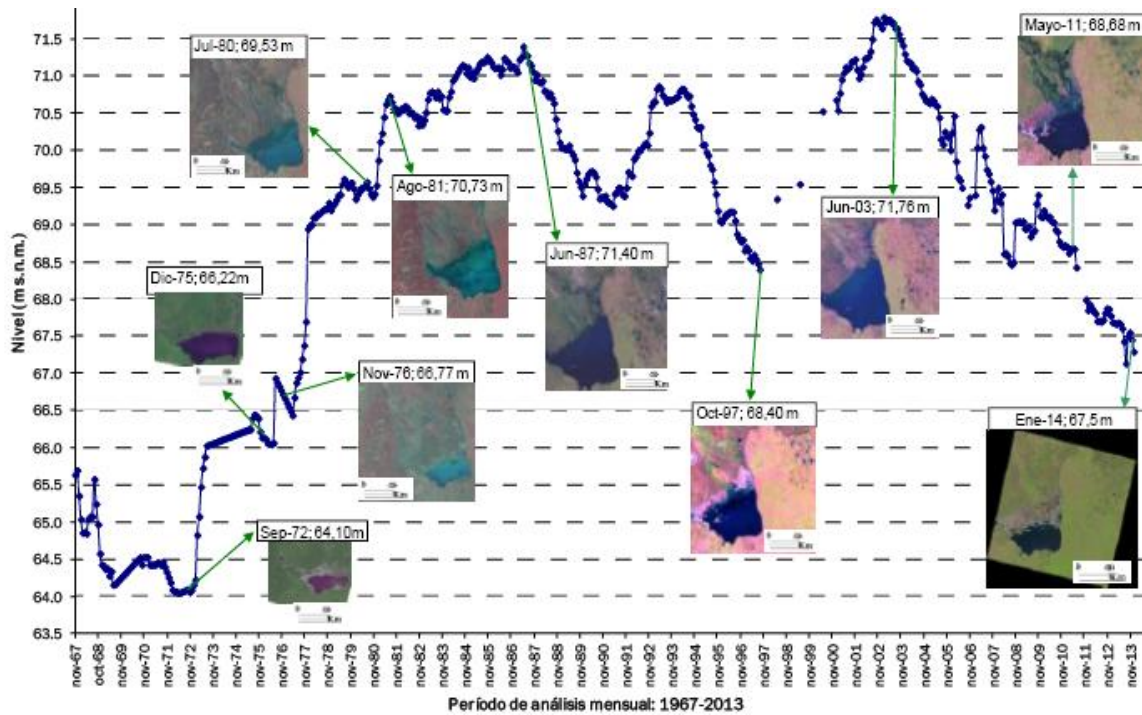
**Figura 30.** Niveles mensuales LMCH. Período 2001-2014.  
Fuente: Vargas, 2014.

Se observa que durante el año 2003 se alcanzan los máximos niveles de agua de la Laguna, y a partir de allí comienzan a descender. La curva de descenso presenta una marcada variación durante el intervalo comprendido entre los años 2006 y 2008. Como vemos en la **Figura 31**, la pendiente de la curva que desciende es sostenida hasta la actualidad.



**Figura 31.** Niveles mensuales LMCH con línea de tendencia. Período 2001-2014.  
Fuente: Vargas, 2014.

Con estos datos fue actualizada la serie definitiva de niveles mensuales del período 1967-2014 (Vargas, 2014), mostrada en la **Figura 32**.



**Figura 32.** Niveles mensuales LMCH. Período 1967-2014.  
Fuente: Vargas, 2014.

En la figura precedente, se observa el marcado ascenso de niveles de agua a partir de la década '70, alcanzando los mayores niveles a mediados de la década de los '80 y luego también durante el año 2003. Se destacan los tres ciclos definidos desde la década del 80, con picos entre los años 1982, 1993 y 2003. El periodo de descensos luego de cada ciclo, presenta similar pendiente descendiendo medio metro por año en promedio.

En la actualidad, los niveles son similares a los que presentaba la Laguna a fines del año 1977, contando con un nivel decreciente desde el año 2003 (Vargas, 2014).

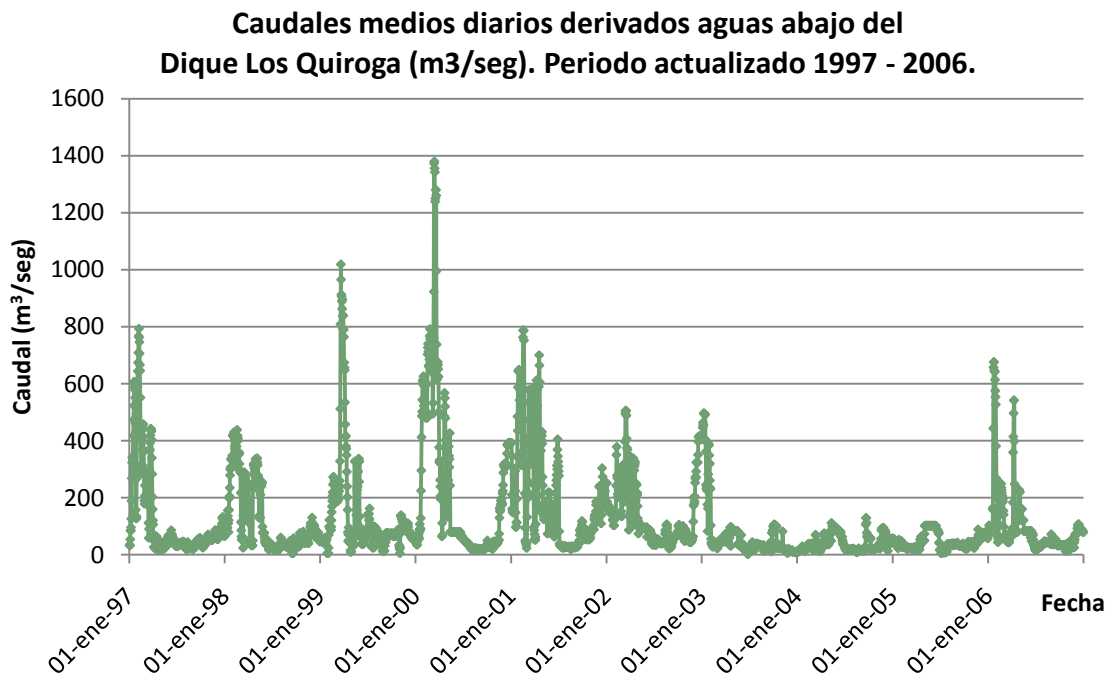
### 3.2. ACTUALIZACIÓN DE LA SERIE DE CAUDALES DEL RIO DULCE

#### 3.2.1. Actualización de la serie de caudales del río Dulce erogados aguas abajo de la presa de Río Hondo.

Se intento por diferentes medios actualizar la serie de caudales erogados aguas abajo la presa de Rio Hondo, pero esto no fue posible, ya que no pudieron ser conseguidos dichos valores. Por lo tanto como se dijo anteriormente, dicha serie concluye en el año 2009.

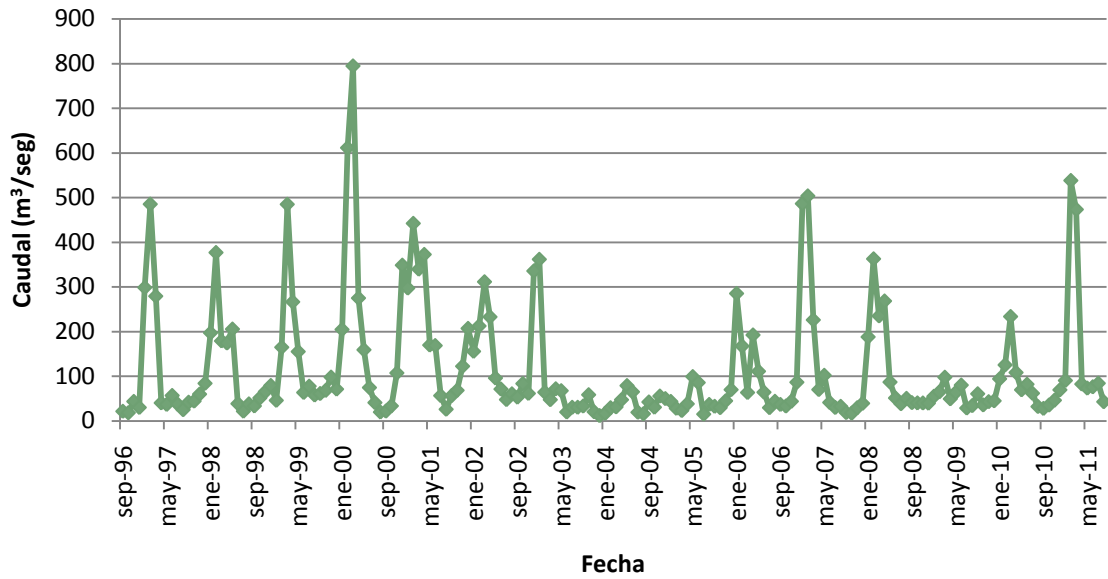
#### 3.2.2. Actualización de la serie de caudales del río Dulce erogados aguas abajo del dique Los Quiroga.

Se actualizó la serie de caudales diarios erogados aguas abajo del Dique Los Quiroga hasta el año 2006 (**Figura 33**) y la serie de caudales mensuales hasta el año 2011 (**Figura 34**). Información obtenida a través de la Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.



**Figura 33.** Caudales medios diarios derivados aguas abajo del Dique Los Quiroga (m<sup>3</sup>/seg). Periodo actualizado 1997-2006.

**Caudales medios mensuales derivados aguas abajo del Dique Los Quiroga (m<sup>3</sup>/seg). Periodo actualizado 1997 - 2011.**



**Figura 34.** Caudales medios mensuales derivados aguas abajo del Dique Los Quiroga (m<sup>3</sup>/seg). Periodo actualizado 1997-2011.

En dichas series puede observarse que los caudales picos ocurren en los meses de enero y febrero de cada año. Se pueden distinguir años hidrológicos ricos y años hidrológicos muy pobres como por ejemplo los años 2004, 2005 y 2009 sin la presencia de notables crecidas.

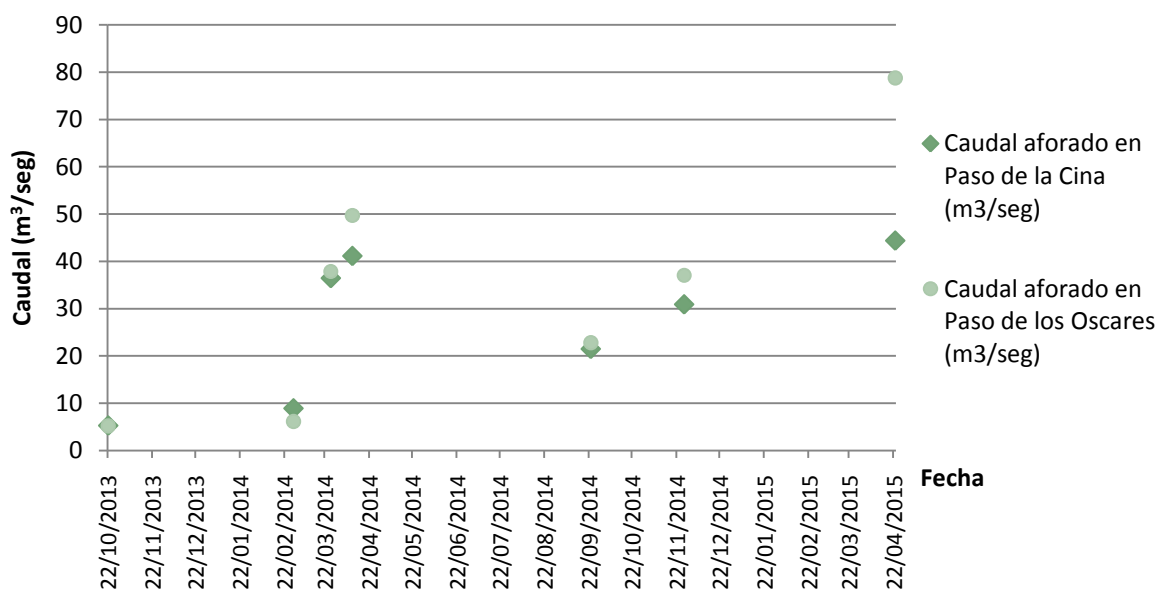
### 3.3. ACTUALIZACIÓN DE LA SERIE DE AFOROS REALIZADOS EN PASO DE LA CINA Y PASO DE LOS OSCARES

Se actualizaron los aforos realizados en Paso de la Cina y Paso de los Oscares. Cinco de los nuevos aforos fueron obtenidos a través de la S.R.H. y los dos restantes se obtuvieron de campañas realizadas por el Laboratorio de Hidráulica en los años 2013 y 2015. Estos últimos aforos fueron conseguidos mediante el uso del instrumento de medición ADCP, por lo que se establece que tienen mayor precisión. A continuación, en la **Tabla 4** se resume dicha información.

Fuente	Método de medición utilizado	Fecha del aforo	Caudal aforado en Paso de la Cina (m <sup>3</sup> /seg)	Caudal aforado en Paso de los Oscares (m <sup>3</sup> /seg)
Subsecretaria de Recursos Hídricos	Molinete	28/02/2014	8,88	6,12
		26/03/2014	36,41	37,81
		10/04/2014	41,09	49,66
		23/09/2014	21,45	22,74
		27/11/2014	30,86	37,01
Laboratorio de Hidráulica - UNC	ADCP	22/10/2013	5,25	5,15
		23/04/2015	44,33	78,75

**Tabla 4.** Aforos actualizados en las secciones de Paso de los Oscares y Paso de la Cina.

A continuación en la **Figura 35** se grafican las series de aforos en el tiempo:

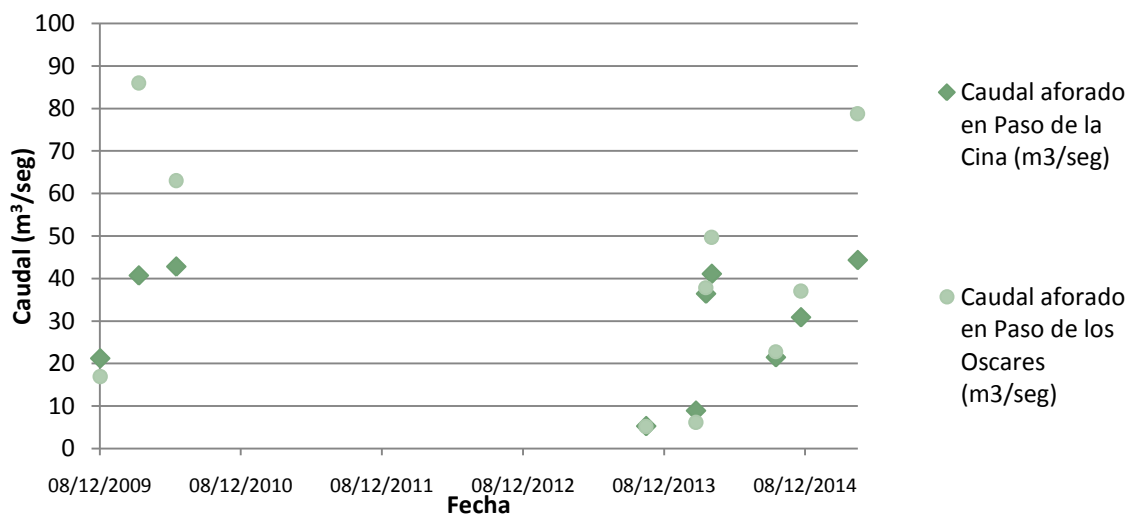


**Figura 35.** Aforos actualizados en las secciones de Paso de los Oscares y Paso de la Cina.

Luego de observar dicho gráfico, se puede concluir que para caudales bajos, menores a  $45 \text{ m}^3/\text{seg}$  aproximadamente, el caudal se mantiene prácticamente constante desde Paso de los Oscares hasta Paso de la Cina, ya que todo el caudal escurre dentro del cauce. Por otro lado, cuando se sobrepasa el valor citado anteriormente, comienza a aparecer una cierta diferencia, siendo el caudal en Paso de los Oscares mayor al de Paso de la Cina, esto sucede porque la capacidad de conducción del cauce al sur es menor que al norte, por lo tanto el caudal desborda entre dichos puntos con la consecuente formación de los bañados.

En los aforos realizados el día 23 de abril del 2015 (la descripción de dicha campaña puede ser revisada en el apartado 4.2.2), se puede apreciar una diferencia entre los caudales de ambas estaciones de  $30 \text{ m}^3/\text{seg}$  aproximadamente. El mismo se debe al caudal que fue desbordado formando bañados (en la campaña podía verse una gran magnitud de bañados), esto se debe a la disminución de la capacidad de conducción presentada en Paso de la Cina y a la posibilidad de la existencia de extracciones con diversos fines, de las cuales no se tiene conocimiento.

Graficando nuevamente la serie de aforos con los de Navarro Ramos (2010) incluidos (**Figura 36**), se puede concluir que en Paso de la Cina se mantiene siempre como caudal máximo un valor no mayor los  $45 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Por lo tanto el mismo puede ser adoptado como la capacidad máxima de conducción que tiene el cauce del río Dulce en esa sección. Además puede establecerse como capacidad máxima de conducción en Paso de los Oscares un caudal aproximado de  $75 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Estas suposiciones están basadas en la observación de la historia de aforos que se conoce.



**Figura 36.** Aforos en Paso de los Oscares y Paso de la Cina.

### **3.4. ACTUALIZACIÓN DE LA SERIE DE DATOS LIMNIMÉTRICOS DE PASO DE LA CINA Y PASO DE LOS OSCARES.**

Se obtuvieron series de niveles horarias en las estaciones de medición de Paso de la Cina y Paso de los Oscares.

Dos de las series corresponden a Paso de la Cina, ya que en esta sección se cuenta con dos limnímetros instalados. Se tiene una serie de niveles provenientes del limnómetro Thalimedes entre las fechas 01-06-2012 al 15-10-2014 y otra serie del limnómetro nuevo entre las fechas 28-08-2014 al 23-04-2015. Como se puede observar, se produce una superposición de datos entre las fechas 28-08-2014 al 15-10-2014.

En lo que respecta a Paso de los Oscares, se obtuvo una serie de niveles correspondiente al periodo entre las fechas 28-08-2014 al 15-10-2014.

El tratamiento de dichas series se realizó en el **apartado 4.4** del **Capítulo 4**.



## Capítulo 4

# ANÁLISIS DE LA DINÁMICA HÍDRICA DE LOS BAÑADOS Y CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA H-Q PARA EL RÍO DULCE

---

### 4.1. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE DESBORDE

En el presente apartado, se realiza un estudio a partir de la interpretación de imágenes satelitales y series de caudales diarios erogados en el Dique de Río Hondo, logrando de esta manera una aproximación del funcionamiento de la hidrología superficial de los Bañados del río Dulce.

Las investigaciones realizadas fueron hechas sobre un período de 4 años, desde 2006 hasta 2009. La elección de dicho período se basa en las siguientes razones:

- Constituye una confirmación del trabajo realizado por Mery Julien en el año 2010.
- Constituye un periodo representativo de diferentes estados del bañado.

Para describir el comportamiento de los Bañados, en Julien 2010 se realizó la división de la región en tres zonas distintas (**Figura 16**):

- La zona 1 y su área A1 de bañado asociado, se encuentra al norte de la región. Se ubica al norte del punto de coordenadas (29°41' S; 62°50' O) y al oeste del punto de coordenadas (29°41' S; 62°39' O). Esta zona es llamada Bañado Norte.
- La zona 2 y su área A2 de bañado asociado, corresponde a la zona de bañado al sur del punto de coordenadas (29°41' S; 62°50' O). Esta zona es llamada Bañado Sur.
- La zona 3 y su área A3 de bañado asociado, es la zona de bañado al este del punto de coordenadas (29°41' S; 62°39' O). Esta zona es llamada Bañado Este.

Se denomina *caudal de desborde*, al excedente de la capacidad de conducción del cauce principal, y es aquel a partir del cual los Bañados comienzan a crecer. En Julien (2010) el valor de dicho caudal, fue determinado a partir de imágenes satelitales que captaban el momento en el cual el Bañado Norte comenzaba a formarse. Por lo tanto, se utilizaron imágenes antes y después del inicio del desborde, determinándose en la serie de caudales

diarios del río Dulce, el caudal erogado por la presa de Río Hondo y el dique Los Quiroga la semana anterior a dicho evento. Se concluyó, luego de la interpretación visual de dichas imágenes, que el bañado comenzaba a formarse con un caudal aproximado de 100 m<sup>3</sup>/seg erogados en la presa Río Hondo, lo que equivale a 70 m<sup>3</sup>/seg erogado en dique Los Quiroga.

También fueron determinados de forma aproximada y con ayuda satelital, los puntos de desborde al norte y al sur, definiéndose como tales al norte de la localidad de Paso de los Oscares y entre Paso de los Oscares y Paso de la Cina respectivamente (**Figura 37**).



**Figura 37.** Ubicación Paso de los Oscares y Paso de la Cina.

A continuación en la **Figura 38**, se realiza una ilustración de la evolución de los Bañados en el período de estudio, a partir de imágenes satelitales correspondientes a las fechas en las que fueron medidas las áreas de dichos Bañados en Julien 2010.

**2006**

08/01/2006



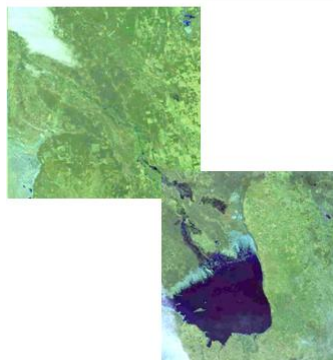
13/03/2006



16/05/2006



03/07/2006



04/08/2006



**2007**

18/01/2007



20/02/2007



08/03/2007

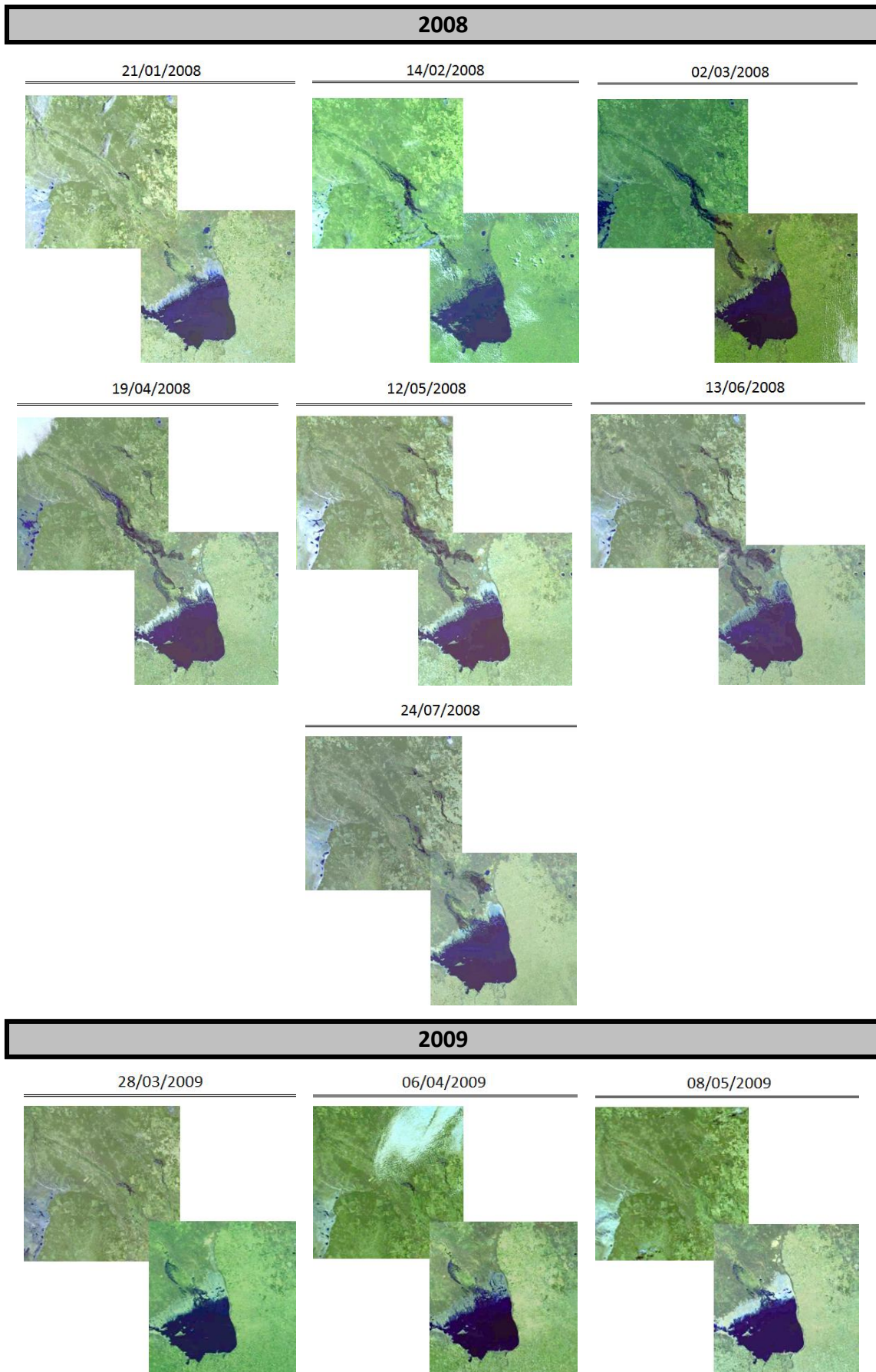


09/04/2007



14/07/2007





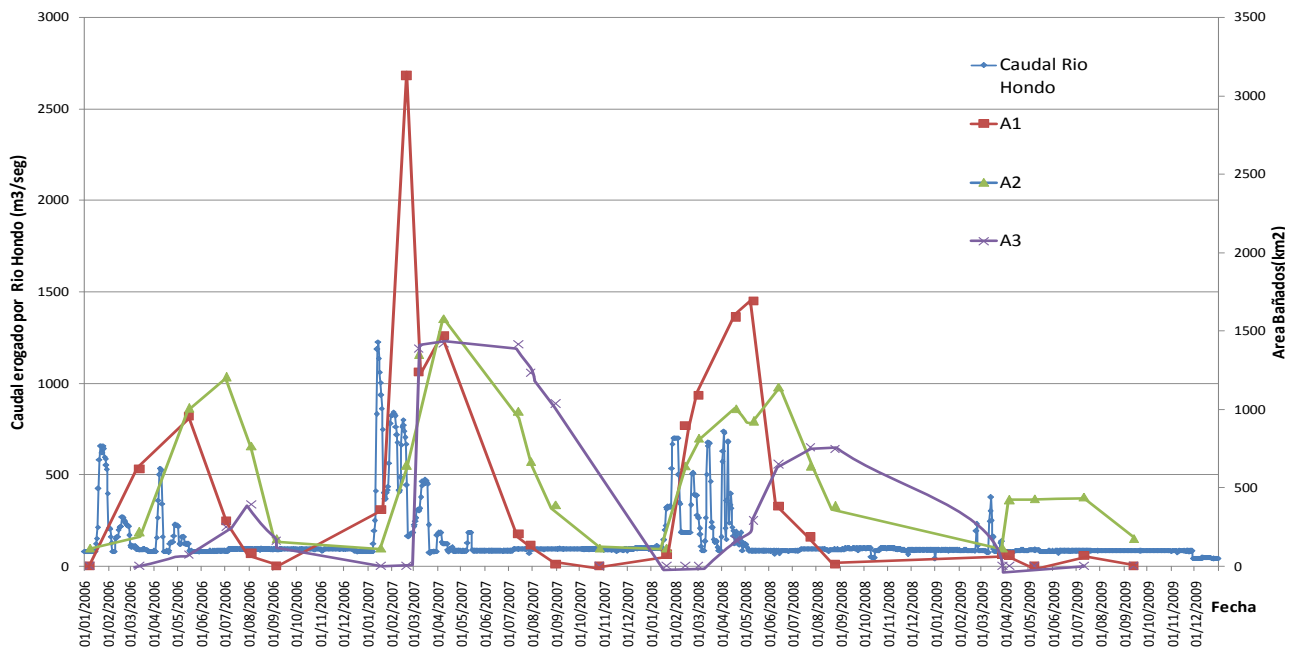
**Figura 38.** Evolución de los Bañados en el período de estudio 2006-2009.

Las áreas de bañados medidas en Julien 2010 se presentan a continuación en la **Tabla 5**:

Fecha de referencia	Area Total km2	Area 1 km2	Area 2 km2	Area 3 km2
08/01/2006	117	0	117	0
13/03/2006	840	621	219	0
16/05/2006	1939	956	1009	72
03/07/2006	1646	287	1208	249
04/08/2006	1133	81	770	393
05/09/2006	339	0	178	161
18/01/2007	478	361	117	0
20/02/2007	3772	3127	645	0
08/03/2007	3974	1237	1350	1387
09/04/2007	4464	1468	1578	1418
14/07/2007	2609	204	991	1414
30/07/2007	2034	133	670	1232
31/08/2007	1465	12	394	1037
26/10/2007	117	0	117	0
21/01/2008	193,00	76	117	0
14/02/2008	1537,00	895	642	0
02/03/2008	1908,00	1088	820	0
19/04/2008	2760,00	1588	1006	166
12/05/2008	2907,00	1691	925	291
13/06/2008	2173	382	1142	649
24/07/2008	1573	186	639	758
25/08/2008	1155	12	385	748
28/03/2009	193	76	117	0
06/04/2009	494,7	71,0	423,7	0,0
08/05/2009	430,7	0,0	430,7	0,0
11/07/2009	513,7	68,9	444,8	0,0
13/09/2009	179,8	0,0	179,8	0,0

**Tabla 5.** Áreas de bañados en el periodo de estudio 2006-2009.  
Fuente: Julien, 2010

Se llevan a un gráfico la serie diaria de caudales erogados por la presa Río Hondo y las áreas de bañados calculadas (**Figura 39**):



**Figura 39.** Caudales diarios erogados aguas abajo de la presa de Río Hondo y áreas de Bañados Norte, Sur y Este.

Luego de una primera observación de las **Figuras 38 y 39**, se detallan las siguientes hipótesis:

- El periodo de 4 años analizados (2006-2009) constituye una buena representación de los diferentes estados de los Bañados. Se identificaron: 2006 bañado chico, 2007 bañado grande, 2008 bañado medio, 2009 bañado casi inexistente.
- Para todos los años, el primer bañado en activarse es el Bañado Norte, respondiendo rápidamente a los picos de los caudales erogados por la presa Rio Hondo y a su vez también es el primero en desaparecer, hasta hacerlo por completo.
- El caudal que sigue fluyendo por el cauce, luego de desbordar al norte, vuelve a hacerlo en el sur aunque con menor caudal, formando lo que llamamos el Bañado Sur, siendo éste el segundo en activarse, estando en desfasaje con el Bañado Norte un cierto tiempo correspondiente al tiempo que tarda la onda de crecida en llegar a dicha sección. Este caudal desbordado depende de la capacidad de conducción del cauce en la parte sur. Observando las figuras, se tiene que el Bañado Sur nunca desaparece por completo, sino que presenta un área persistente en el tiempo.
- El ultimo bañado en activarse es el Bañado Este, su tamaño depende del volumen y de la velocidad de las inundaciones en la zona Norte, puede verse a simple vista que el agua del Bañado Norte escurre hacia el Bañado Este activándolo. Si el Bañado Norte se activa rápidamente y en cantidad apreciable, la zona Este se activa con poco retardo. Puede verse en las figuras que el Bañado Este se activa cuando el Bañado Norte está en recesión, lo que contempla lo dicho anteriormente que el agua del primero escurre hacia el segundo. También se observa que cuando el bañado es grande, la zona Este es la última en desaparecer, pudiendo ser uno de los motivos la baja pendiente del sector.

A continuación se definen y computan los *volúmenes desbordados* entre distintas fechas anteriores a las fechas de referencia, tomando como éstas las correspondientes a las fechas de las imágenes satelitales en las que se tiene información del valor de las áreas de dichos bañados.

El *caudal desbordado* surge como la diferencia entre caudal diario erogado por la presa Río Hondo y el *caudal de desborde* (Ec. 4):

$$Q_{desbordado} = Q_{total} - Q_{de\ desborde} \quad \text{(Ec. 4)}$$

El volumen desbordado entre dos fechas se obtiene como (Ec. 5):

$$V_{desbordado} = \frac{24 \cdot 3600 \cdot \sum_1^{d_p} (Q_i - Q_{de\ desborde})}{1000000} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$$V_{desbordado} = \text{Volumen desbordado en } \frac{\text{hm}^3}{\text{periodo}}$$

$$Q_i = \text{Caudal diario al día } i \text{ del período de desborde } \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

$$Q_{de\ desborde} = \text{Valor del caudal donde empiezan los desbordes } \left( 100 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}} \right)$$

$$d_p = \text{Duración del período de desborde}$$

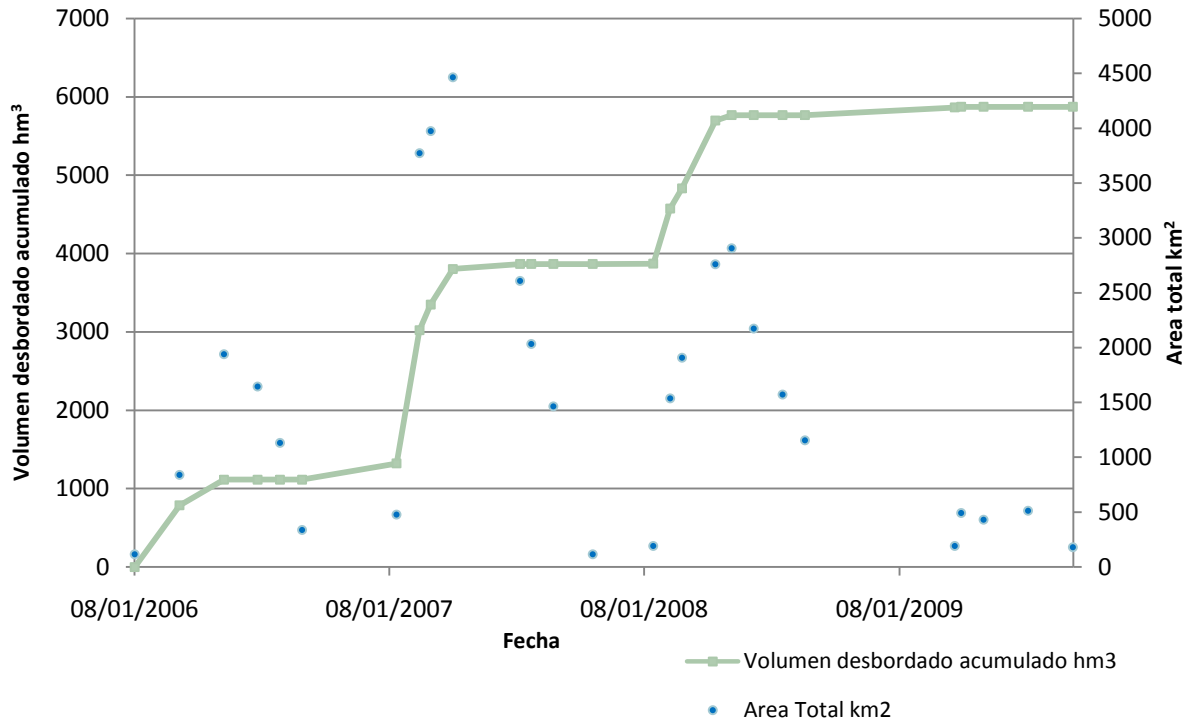
En la **Tabla 6** se presentan los volúmenes desbordados entre dos fechas anteriores a las fechas de referencia, los volúmenes desbordados acumulados y las áreas de los diferentes bañados.

Fecha de referencia	Volumen desbordado entre dos fechas hm3	Volumen desbordado acumulado hm3	Area Total km2	Area 1 km2	Area 2 km2	Area 3 km2
08/01/2006	0,00	0,00	117	0	117	0
13/03/2006	786,27	786,27	840	621	219	0
16/05/2006	328,20	1114,47	1939	956	1009	72
03/07/2006	0,00	1114,47	1646	287	1208	249
04/08/2006	0,00	1114,47	1133	81	770	393
05/09/2006	0,00	1114,47	339	0	178	161
18/01/2007	207,36	1321,83	478	361	117	0
20/02/2007	1699,24	3021,07	3772	3127	645	0
08/03/2007	329,86	3350,93	3974	1237	1350	1387
09/04/2007	453,33	3804,26	4464	1468	1578	1418
14/07/2007	62,93	3867,19	2609	204	991	1414
30/07/2007	0,00	3867,19	2034	133	670	1232
31/08/2007	0,00	3867,19	1465	12	394	1037
26/10/2007	0,00	3867,19	117	0	117	0
21/01/2008	3,65	3870,84	193,00	76	117	0
14/02/2008	701,30	4572,14	1537,00	895	642	0
02/03/2008	258,73	4830,87	1908,00	1088	820	0
19/04/2008	864,52	5695,40	2760,00	1588	1006	166
12/05/2008	70,01	5765,40	2907,00	1691	925	291
13/06/2008	0,00	5765,40	2173	382	1142	649
24/07/2008	0,00	5765,40	1573	186	639	758
25/08/2008	0,00	5765,40	1155	12	385	748
28/03/2009	98,65	5864,05	193	76	117	0
06/04/2009	8,82	5872,88	494,7	71,0	423,7	0,0
08/05/2009	0,00	5872,88	430,7	0,0	430,7	0,0
11/07/2009	0,00	5872,88	513,7	68,9	444,8	0,0
13/09/2009	0,00	5872,88	179,8	0,0	179,8	0,0

**Tabla 6.** Volumen desbordado entre dos fechas, volumen desbordado acumulado, área total de bañados, área de bañados A1, A2 y A3

En la **Figura 40**, se presenta la serie de volúmenes desbordados acumulados donde se aprecian características cíclicas que presenta el sistema en estudio.

En los meses de enero-febrero a abril-mayo la curva tiene pendiente positiva pronunciada, o sea que acumula agua en el bañado, mientras que durante los meses de junio-julio a diciembre-enero, presenta una pendiente menor o nula, correspondiendo a caudales de desborde pequeños o generalmente nulos.



**Figura 40.** Volumen desbordado acumulado

Planteando una relación entre volúmenes desbordados acumulados y áreas totales de bañados, se observa que cuando la curva de volúmenes acumulados es marcadamente positiva, los valores de área aumentan, mientras que cuando la curva de volúmenes tiene poca pendiente o es constante, la serie de bañados disminuye (indicándose con flechas en **Figura 41**), produciendo lo que se denomina *recesión de los bañados*.



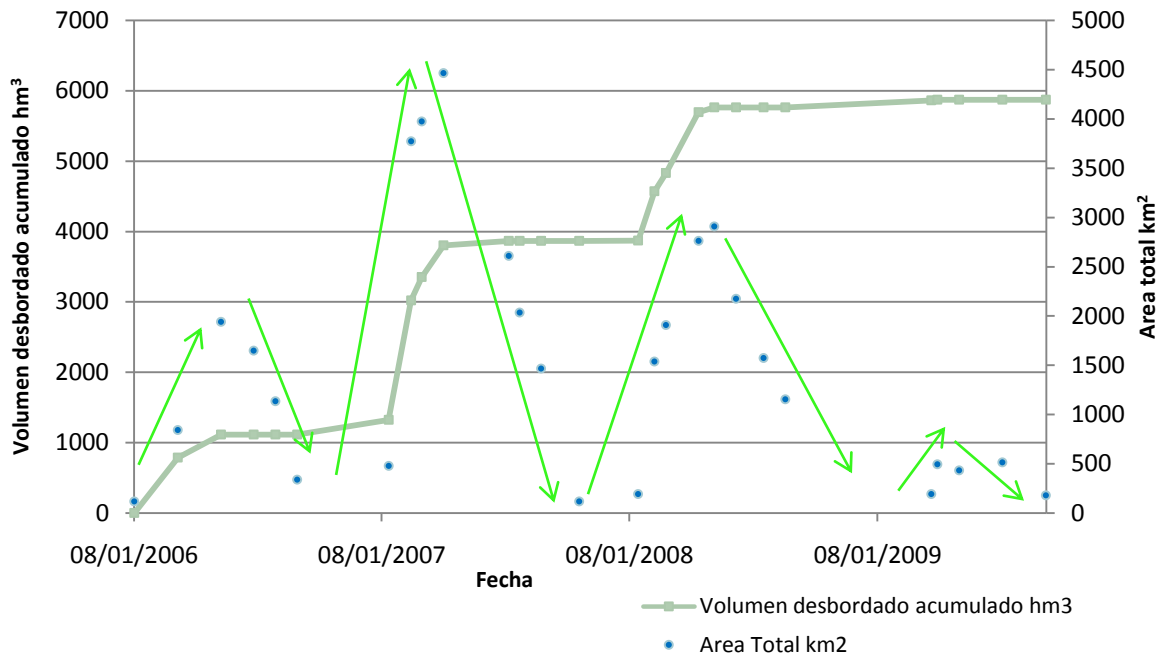


Figura 41. Volumen desbordado acumulado y áreas totales de bañados

A continuación se analiza cada bañado por separado.

En primer lugar se llevan a un gráfico el volumen desbordado entre dos fechas y las áreas del Bañado Norte (Figura 42). En base a esto se puede decir que la formación del Bañado Norte responde directamente a los pulsos de caudales erogados por la presa Rio Hondo, con un desfase en el tiempo que proviene del retardo de la onda de crecida hasta llegar a la sección de desborde.

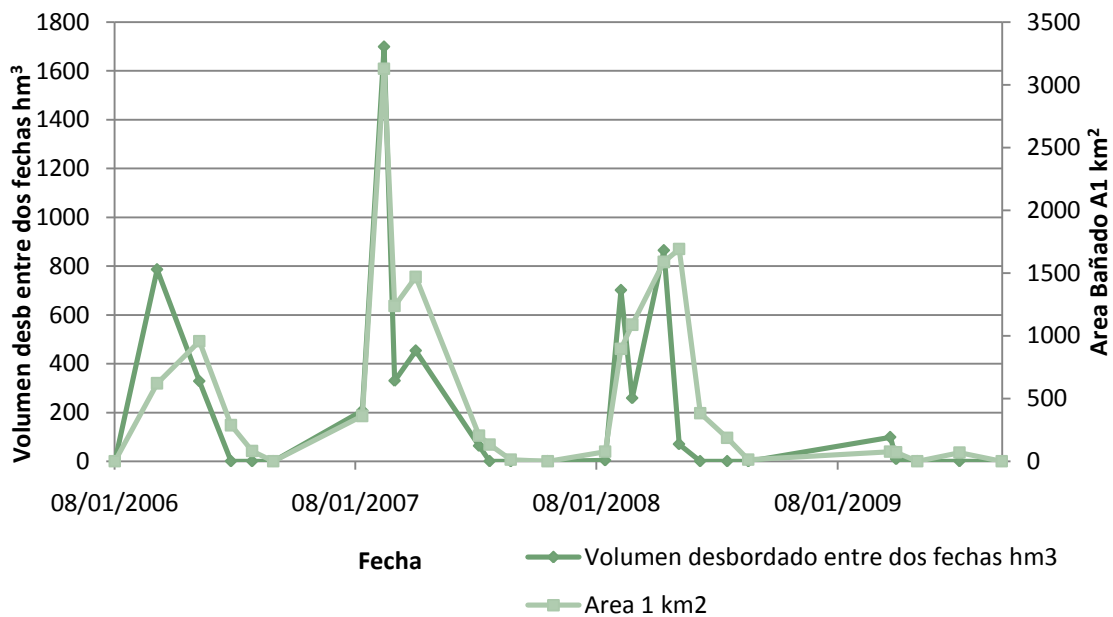
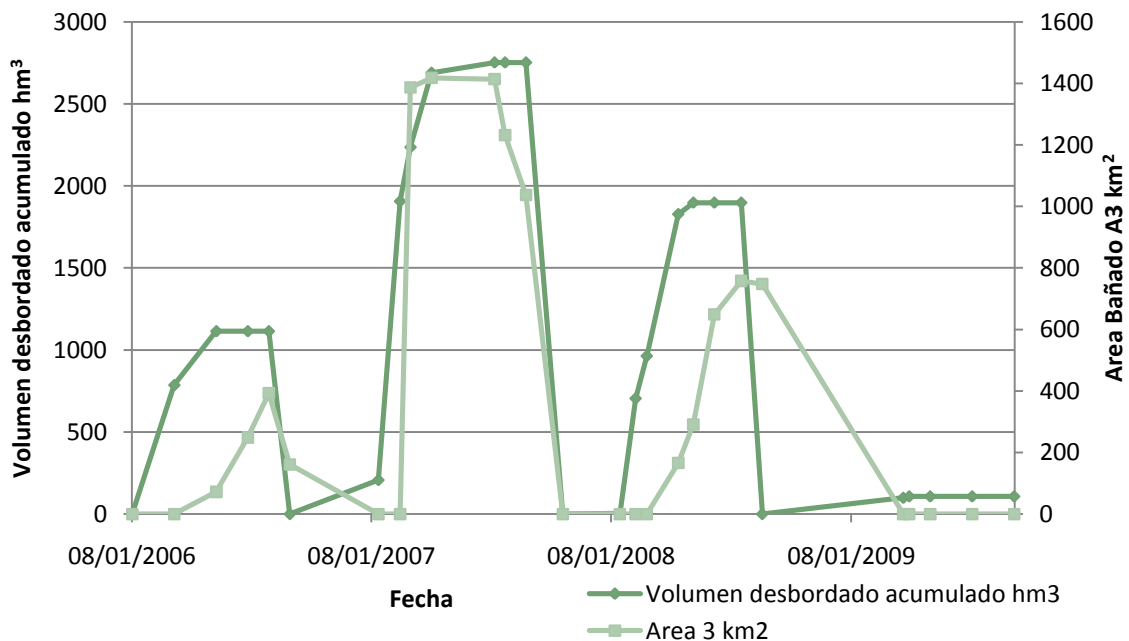


Figura 42. Volúmenes desbordados entre dos fechas y áreas del Bañado Norte

Puede verse que en el año 2006 la formación del bañado es más lenta, el motivo podría ser que este año se presenta luego de dos años de sequía, por lo tanto la capacidad de infiltración del suelo es mayor que en los años posteriores.

Con lo dicho anteriormente podemos concluir que el bañado norte se activa directamente con el caudal desbordado entre dos fechas. El bañado crece rápidamente si hay desbordes y se reduce rápidamente si los desbordes no son suficientes para mantener el área cubierta.

Luego se grafica el volumen desbordado acumulado para ser comparado con las áreas del Bañado Este. A partir de la observación de la **Figura 43** se puede decir que el Bañado Este responde a la cantidad de agua desbordada acumulada. Puede razonarse que es necesario un mínimo de caudal acumulado para que dicho bañado pueda activarse, dependiendo de esta manera del tamaño del desborde y su velocidad. En el año 2009 por ejemplo, el mismo no llegó a concretarse. Por otro lado en el año 2007, puede verse que el Bañado Este se activa enseguida luego de ser desbordado gran volumen acumulado en un corto lapso de tiempo.



**Figura 43.** Volumen desbordado acumulado y áreas del Bañado Este

Con respecto al Bañado Sur, el mismo responde al volumen desbordado acumulado. Puede considerarse que es activado por caudales que provienen de la diferencia de la

capacidad de conducción al norte (Paso de los Oscares) menos la capacidad de conducción al sur (Paso de la Cina).

El área de dicho bañado no varía tanto como los Bañados Norte y Este ni tampoco desaparece por completo.

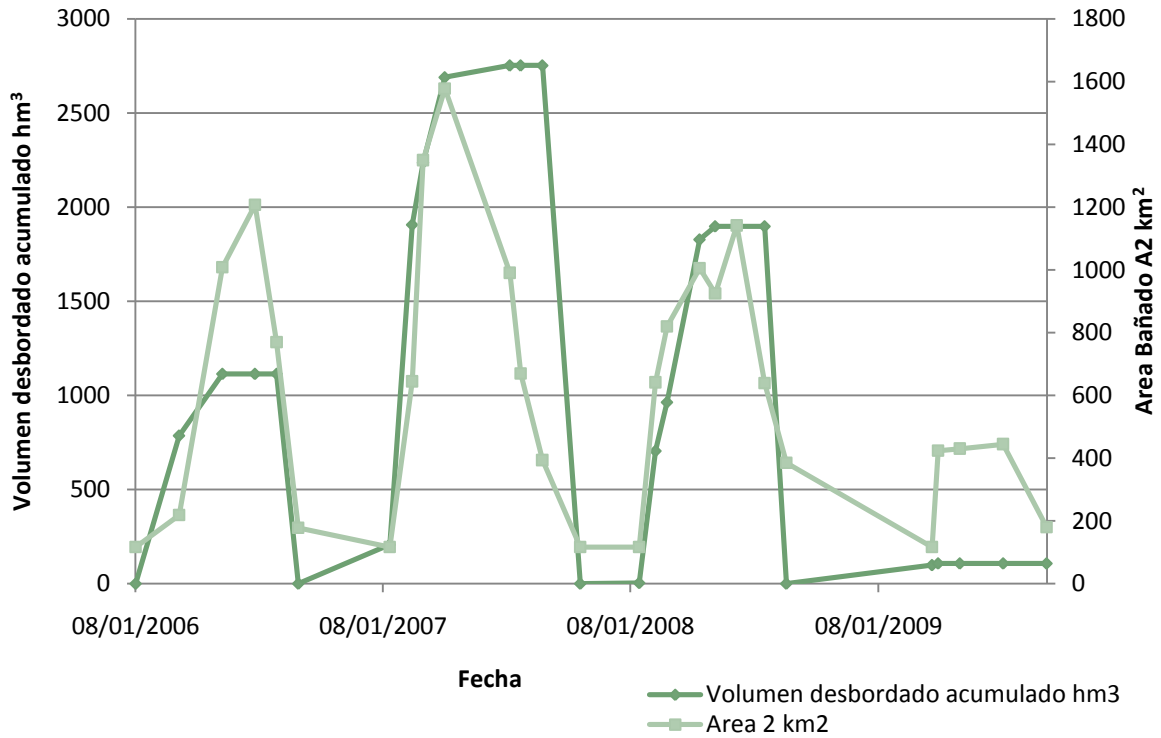


Figura 44. Volumen desbordado acumulado y áreas de Bañado Sur

Por último puede concluirse que en el presente trabajo se obtuvieron resultados similares a los obtenidos en Julien (2010), por lo que debería seguir usándose la misma metodología para los años posteriores al período en estudio, lo cual no pudo ser realizado en el presente informe por la imposibilidad de la actualización de las series de caudales diarios del río Dulce.

En la **Figura 45** que se presenta a continuación, se realiza un resumen a través de un gráfico con caudales diarios erogados aguas abajo la presa de Rio Hondo, caudal de desborde, volumen desbordado entre dos fechas, áreas totales de Bañados e imágenes satelitales de ciertas fechas.

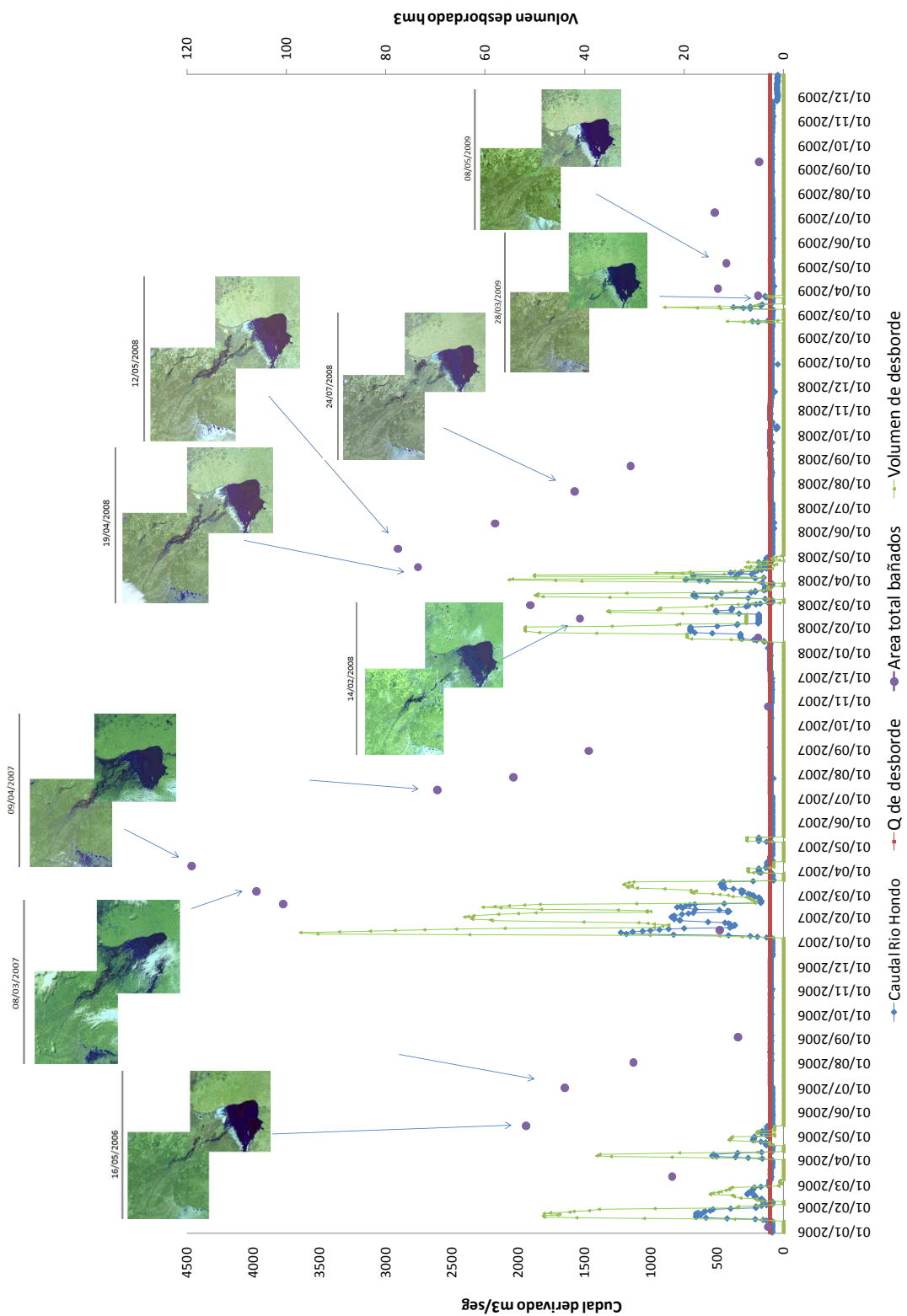


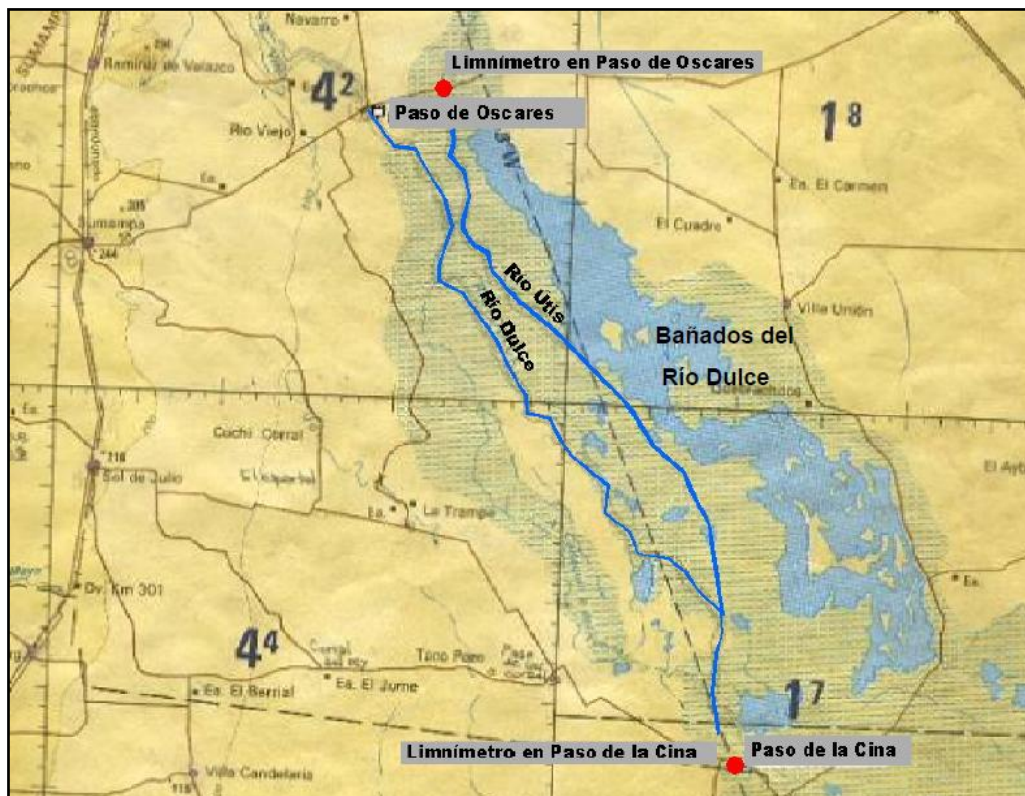
Figura 45. Caudal diario erogado por Rio Hondo, caudal de desborde, volumen desbordado entre dos fechas y áreas totales de Bañados.

## **4.2. MONITOREO DE LAS SECCIONES DE INTERES, PASO DE LA CINA Y PASO DE LOS OSCARES**

### **4.2.1. Características del instrumental de medición**

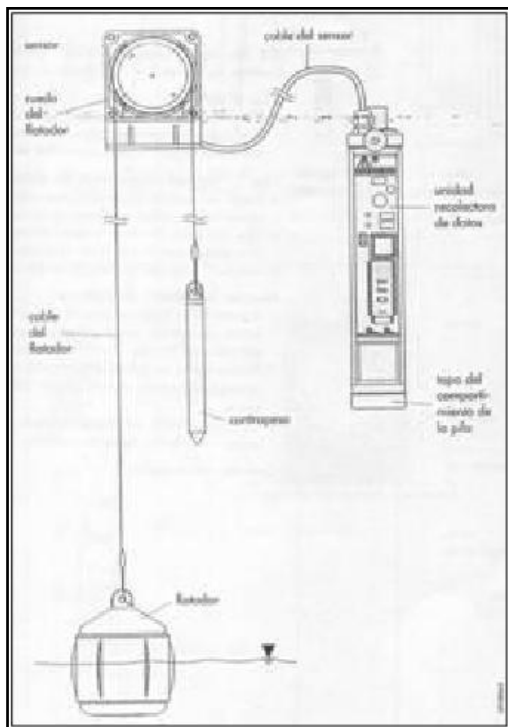
#### **4.2.1.1. Estaciones limnimétricas**

En noviembre del año 2001 fue instalada en Paso de la Cina una estación limnimétrica, la cual fue materializada sobre una estructura portante, compuesta de un caño galvanizado de 10 cm (4") de diámetro, con la correspondiente protección y accesorios necesarios para garantizar su estabilidad y perdurabilidad en la posición final **Figuras 49 y 50**. En noviembre del año 2003 se realizó la misma actividad en Paso de los Oscares, con similares características a las descritas anteriormente. A continuación se presenta una imagen con sus respectivas ubicaciones (**Figura 46**).



**Figura 46.** Ubicaciones seleccionadas para la instalación de las estaciones limnimétricas.  
Fuente: Plencovich, 2011.

Las principales propiedades de los aparatos instalados son: codificador angular para la medida de niveles de agua marca OTT modelo Thalimedes. Están provistos de una unidad de adquisición de datos con capacidad para almacenar hasta 30.000 datos programables y una autonomía de 15 meses. Incluye una interface infrarroja para el levantamiento de los registros a un ordenador portátil. Este aparato es automático y permite medir continuamente tanto niveles superficiales como fluctuación del nivel freático dependiendo su uso como limnómetro o freatógrafo. Un sistema de cable de flotador con contrapeso transmite el cambio de nivel del agua a la rueda del flotador del sensor. La rotación resultante se transforma en una señal eléctrica que se transmite a la unidad recolectora de datos a través del cable del sensor, almacenándose allí como valor medido (**Figuras 47 y 48**). Los intervalos de memorización se pueden elegir conforme a las exigencias hidrológicas. Una pantalla permite observar el nivel actual, la fecha, la hora y el estado de la pila (monocelular de 1.5 V). En el año 2010, la estación limnimétrica de Paso de los Oscares fue retirada por motivos varios.



**Figura 47.** Esquema del limnómetro



**Figura 48.** Limnómetro



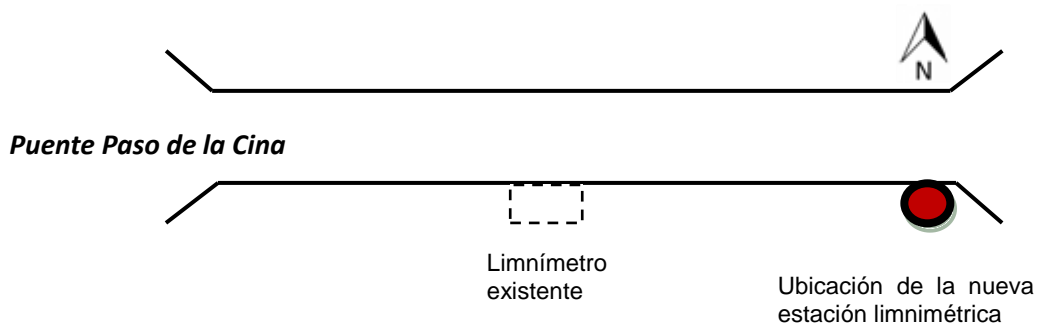
**Figura 49.** Estación limnimétrica de Paso de la Cina



**Figura 50.** Estación limnimétrica de Paso de los Oscars

El día 22 de Octubre del 2013, personal de la SRH y del CETA, recorrieron el curso fluvial del río Dulce con el fin de determinar las secciones más convenientes para la instalación de dos nuevas estaciones limnimétricas. En base al relevamiento realizado, volvieron a ser seleccionadas las secciones del río Dulce ubicadas en las localidades de Paso de la Cina y Paso de los Oscars.

En el caso de Paso de la Cina se consideró que la localización más conveniente para la instalación de la nueva estación limnimétrica era en la estructura del puente emplazado en el lugar, sobre la margen ESTE, tal como se esquematiza en la **Figura 51**.



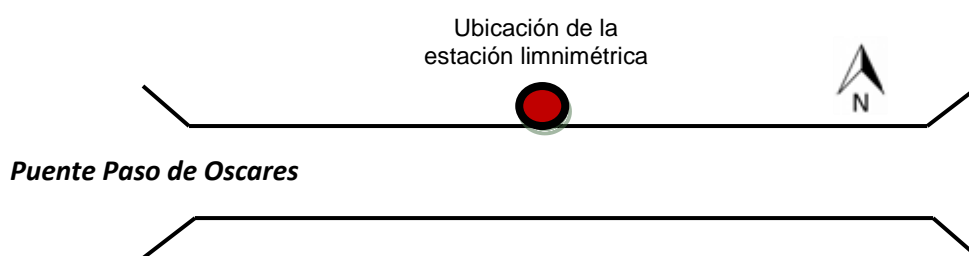
**Figura 51:** Esquema del lugar de emplazamiento de la nueva estación limnimétrica en la localidad de Paso de la Cina. Fuente: Informe de Instalación de dos estaciones hidrométricas para Comisión Técnica de Cuenca del Río Dulce

En este caso, optaron por instalar el instrumental de medición sobre una estructura metálica, diseñada y realizada para tal fin por personal de la FCEFyN. La misma fue empotrada en el estribo del puente sobre la margen ESTE (**Figura 52**).



**Figura 52.** Estructura instalada en Paso de la Cina sobre la margen este de la sección.

En el caso de Paso de Oscares se consideró que la localización más conveniente para la instalación de la estación limnimétrica, era sobre la estructura propiamente dicha del puente emplazado en el lugar, sobre el lateral NORTE del mismo, tal como se esquematiza en la **Figura 53**.



**Figura 53:** Esquema del lugar de emplazamiento de la nueva estación limnimétrica en la Localidad de Paso de los Oscares. Fuente: Informe de Instalación de dos estaciones hidrométricas para Comisión Técnica de Cuenca del Río Dulce

La estructura metálica (**Figura 54**) que contiene el instrumental de medición diseñada y realizada para este caso, fue abulonada sobre un panel de Hormigón Armado que constituye la viga del puente.





**Figura 54.** Estructura instalada en Paso de los Oscares.

Los limnímetros utilizados son del tipo de boya y contrapeso modelo WaterLog H-334. Los mismos se encuentran disponibles ya que fueron adquiridos por la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Córdoba.

Los componentes principales de las nuevas estaciones limnimétricas son: el Data-Logger IRIS 120 para el registro de los datos del sensor y el sensor propiamente dicho.

El recolector de datos IRIS 120 (iQuestRemoteInformationSource) (**Figura 55**) es un dispositivo diseñado para el almacenamiento de información digital. Cuenta con una serie de entradas analógicas y digitales a través de las cuales puede conectarse una variedad de sensores que le proveen la información a almacenar.



**Figura 55.** Recolector de Datos IRIS 120

El acceso al dispositivo, tanto para la configuración como para la obtención de datos, se realiza mediante la interfaz serie (RS-232).

El R.D. cuenta con un software embebido que provee un menú con una serie de opciones a través de las cuales se permite: configurar la fecha, hora y nombre del dispositivo, modificar la frecuencia con que muestrean las entradas, configurar el disparo de las alarmas, obtener una cantidad determinada de datos almacenados, entre otras funcionalidades.

Dependiendo de la selección realizada en el menú, se accederá a un submenú o bien a la información solicitada, es decir, tanto para la configuración como para la obtención de información, el dispositivo electrónico (modem, servidor, etc.) o usuario físico que interactúe con el R.D., debe establecer un diálogo de ida y vuelta en el que se envían solicitudes y se obtienen respuestas por parte del R.D.



**Figura 56.** RTU. Gabinete de los sensores Waterlog H-334

Con respecto al sensor de nivel, se encuentra situado a una altura fija y trabaja en conjunto con una boya flotante que, mediante una cinta que pasa por el disco del sensor, lo hace girar a medida que la boya cambia de altura (**Figura 57**).

El S.L. transmite la información al R.D. por variación de corriente según el estándar 4-20mA. Los valores de corriente varían entre 4 y 20 mA, y representan los niveles mínimo y máximo de altura de la boya.

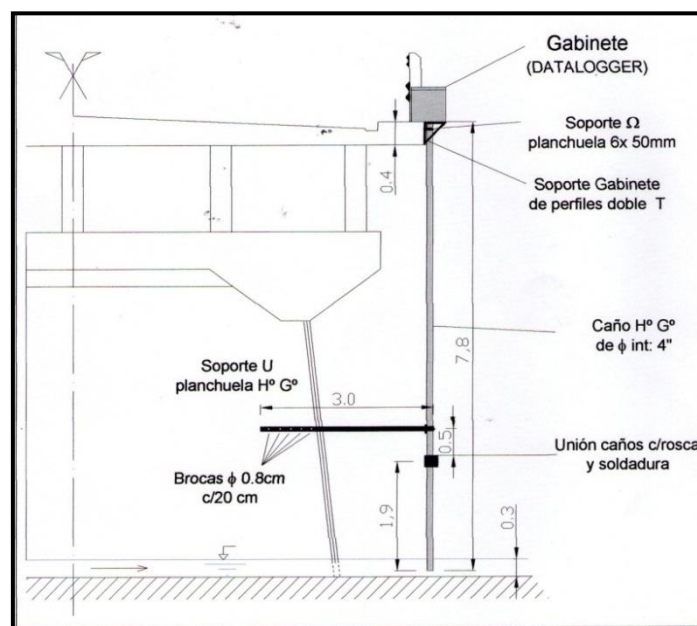
La utilización de este estándar radica en que la transmisión de corriente por un medio físico no se ve afectada por el ruido generado por fuentes externas.

Debido a que los sensores analógicos del R.D. trabajan con niveles de tensión, resulta necesario traducir el valor de corriente suministrado por el S.L. a un valor de tensión admitido por el R.D (**Figura 56**).



**Figura 57.** Sensor de nivel Waterlog H-334.

En la **Figura 58** se presenta un esquema del dispositivo experimental completo que conforma la estación limnimétrica.



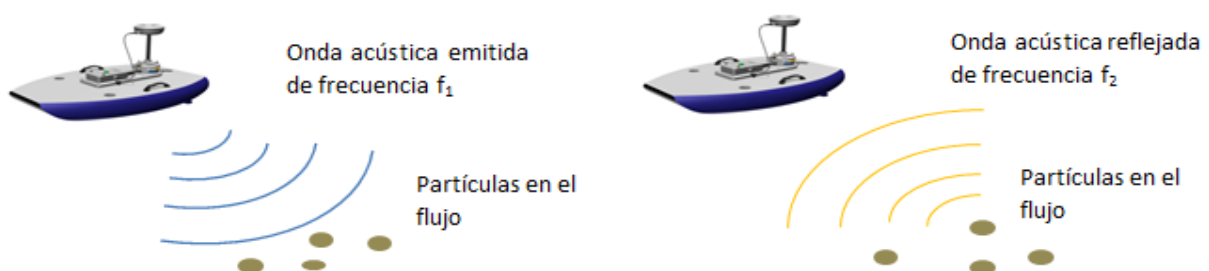
**Figura 58.** Esquema de la estación limnimétrica.

#### 4.2.1.2. Medición del caudal

El instrumental utilizado para las mediciones de caudales superficiales escurridos en las distintas secciones seleccionadas en el sistema fluvial analizado es el Perfilador de Corriente Acústico Doppler (ADCP) “RiverSurveyour S5” (número de serie S501387) fabricado por la compañía YSI/Sontek®. El ADCP provee información batimétrica (profundidades) de la sección y de las velocidades del flujo en tres direcciones ortogonales, lo que permite definir el caudal con un error general menor al 5%.

Los Perfiladores de Corriente Acústico Doppler utilizan el efecto Doppler para determinar las velocidades relativas entre partículas en suspensión en el flujo y el instrumento. En la **Figura 59** se muestra el esquema de funcionamiento del ADCP. El instrumento emite una onda acústica a una determinada frecuencia ( $f_1$ ), la cual es luego reflejada por partículas en suspensión en el flujo (sedimentos, plancton, algas, etc.). La onda acústica reflejada es detectada por el instrumento y la misma posee una frecuencia ( $f_2$ ) diferente con la que fue emitida. Mediante la determinación de la diferencia de frecuencias entre la onda emitida y reflejada el dispositivo calcula, utilizando el efecto Doppler, la velocidad relativa al instrumento de las partículas en suspensión la cual bajo ciertas hipótesis puede ser asumida igual a la velocidad del flujo (baja inercia de las partículas).

En todos los casos se utilizó como sistema de referencia para determinar la posición del bote el método BottomTrack. El tiempo mínimo recomendado por el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) para una cuantificación precisa del caudal es de 12 minutos durante los cuales hay que realizar un número par de transectas o cruces (al menos dos).



**Figura 59.** Esquema de funcionamiento del ADCP

El instrumento se puede configurar y operar desde una computadora personal portátil o bien con un teléfono celular, ambos dispositivos capaces de registrar los datos medidos. La configuración de registro del ADCP RiverSurveyour S5 y la visualización de los resultados

obtenidos se realiza con el programa computacional RiverSurveyor Live. Específicamente se utilizó el software RiverSurveyor Live v.3.60 y firmware RiverSurveyor v3.0.0, de acuerdo a las recomendaciones sugeridas por YSI/Sontek. Una de las principales características de firmware RiverSurveyor v1.0.0 esta versión es la incorporación del algoritmo “SmartPulse” el cual, en base a la profundidad, velocidad y niveles de turbulencia del flujo, adapta el esquema de pulso acústico para esas condiciones con el fin de proveer la máxima resolución de datos de velocidad, con tamaños de celda tan pequeños como 2 cm. La selección del esquema óptimo se realiza automáticamente.

El dispositivo de medición no posee movilidad propia, motivo por el cual es necesario colocar el ADCP en una balsa o bote capaz de transportarlo a través de la sección sobre la que se realizará la medición. El bote utilizado en esta campaña de aforo se muestra en la **Figura 60**. En esa figura se muestran además dispositivos complementarios instalados en el bote durante los aforos como por ejemplo el módulo de procesamiento y comunicación (utilizando el sistema bluetooth) y un Geoposicionador satelital (GPS) con su respectiva antena.

Las características técnicas del Perfilador de Corriente Acústico Doppler utilizado se presentan en la **Tabla 7**.

<b>Medición de velocidad</b>	Rango de mediciones	0,06 a 5 m
	Velocidades	+/- 20 m/s
	Precisión	Hasta +/- 0,25% de la velocidad medida
	Resolución	0,001 m/s
	N° de celdas	Hasta 128
	Tamaño de celda	0,02 a 0,5 m
<b>Configuración del transductor</b>	Cinco (5) transductores	4 rayos de 3,0 MHz inclinados a 25° Rayo vertical de 1,0 MHz
<b>Profundidad</b>	Rango de mediciones	0,20 a 15 m
	Precisión	1%
	Resolución	0,001 m
<b>Medición de flujos</b>	Rango con Bottom-track (seguimiento de fondo)	0,30 a 5 m
	Rango con RTK GPS	0,30 a 15 m
	Cálculos	Internos

**Tabla 7.** Características técnicas del instrumento utilizado



Figura 60. ADCP y demás dispositivos montados en la plataforma móvil de medición

#### 4.2.2. Campaña realizada al río Dulce en secciones de interés

El día 23 de Abril del año 2015 se llevo a cabo una campaña para la realización de aforos, mantenimiento y descarga de datos de las estaciones ubicadas en Paso de la Cina y Paso de los Oscares, y la instalación del limnómetro que había sido retirado anteriormente en Paso de la Cina. En la **Tabla 8** se describen las tareas realizadas en cada punto y sus respectivas ubicaciones.

Sección	Latitud	Longitud	Tarea Realizada
Paso de la Cina	29°47'40.87" S	62°48'21.71" O	Instalación. Mantenimiento y descarga de datos. Aforo.
Paso de los Oscares	29°15'16.89" S	63°11'43.05" O	Mantenimiento y descarga de datos. Aforo.

Tabla 8. Ubicación y tareas realizadas en las estaciones de medición Paso de la Cina y Paso de los Oscares.

#### **4.2.2.1. Estación Paso de la Cina**

En primer lugar se instaló nuevamente el limnómetro en la estructura portante ya existente de la estación ubicada en el CENTRO de la sección de Paso de la Cina (**Figuras 61, 62 y 63**), el mismo había sido retirado en la campaña anterior, realizada el día 16 de octubre del año 2014, por imposibilidad de extracción de datos. La lectura arrojada por el limnómetro luego de ser instalado fue de 2,742 m.



**Figura 61.** Ubicación estructura en el centro de la sección.

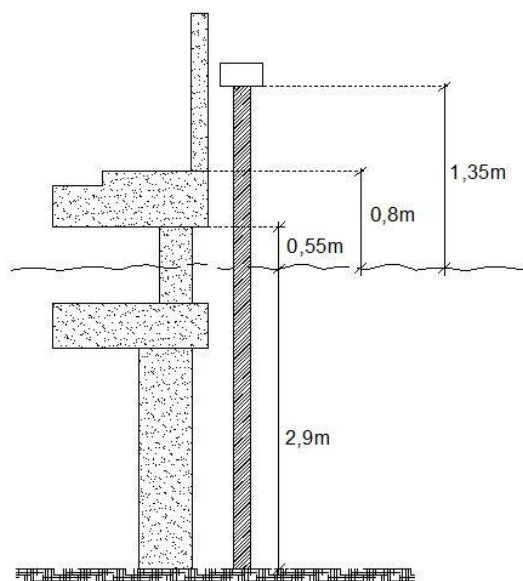


**Figura 62.** Estructura soporte del instrumental.



**Figura 63.** Instalación limnómetro.

En esta estación fueron medidas ciertas cotas esenciales para luego poder referenciar a un punto la serie de datos de niveles obtenida del correspondiente limnómetro. Las cotas son: distancia del pelo de agua a la base del aparato de medición, distancia desde la base del aparato de medición al fondo del cauce y distancia del pelo de agua al fondo del cauce. Esta última medición fue tomada con regla y ADCP, las cuales dieron diferentes pero se toma como correcta la medición dada por el ADCP por su mayor precisión. En el siguiente esquema pueden verse las diferentes cotas (**Figura 64**):



**Figura 64.** Esquema acotado en estación limnimétrica ubicada en el centro de la sección de Paso de la Cina



Luego se procedió a realizar la descarga de datos y el mantenimiento correspondiente de la estación ubicada sobre el mismo puente carretero pero al ESTE de la sección (**Figuras 65, 66, 67 y 68**).



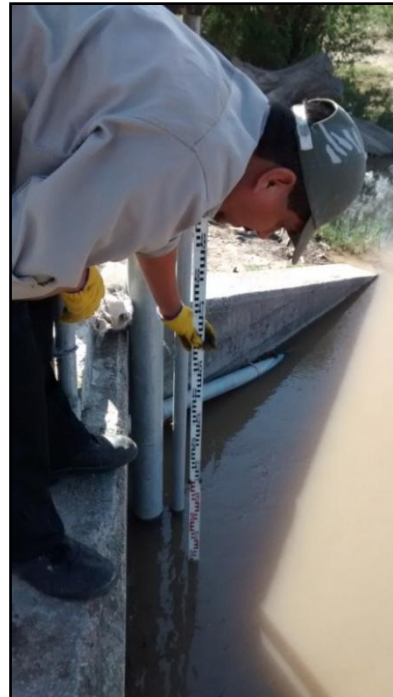
**Figura 65.** Ubicación estructura al este de la sección.



**Figura 66.** Estructura soporte del instrumental.

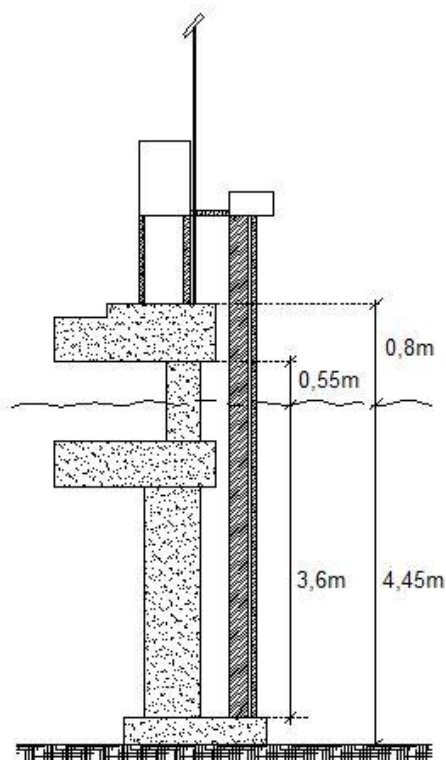


**Figura 67.** Descarga de datos.



**Figura 68.** Medición del pelo de agua PC.

En este punto también fueron relevadas diferentes cotas, las cuales se detallan en el siguiente croquis (**Figura 69**):



**Figura 69.** Esquema acotado en estación limnimétrica ubicada al este de la sección de Paso de la Cina

Por último se realizó el aforo de la sección (**Figura 70**), el mismo se llevo a cabo desde el puente, ya que, como puede verse en las imágenes, el acceso a las márgenes del rio era limitado por la cantidad de agua y vegetación que hacían muy difícil y peligroso su acceso.



**Figura 70.** Aforo sección Paso de la Cina

Se realizaron 8 cruces del instrumento ADCP, las cuales fueron promediadas. La velocidad del flujo era muy escasa, lo que podía llevar a errores debido a que el desplazamiento del instrumento debía ser a una velocidad menor a la del flujo, lo que se hacía difícilmente practicable.

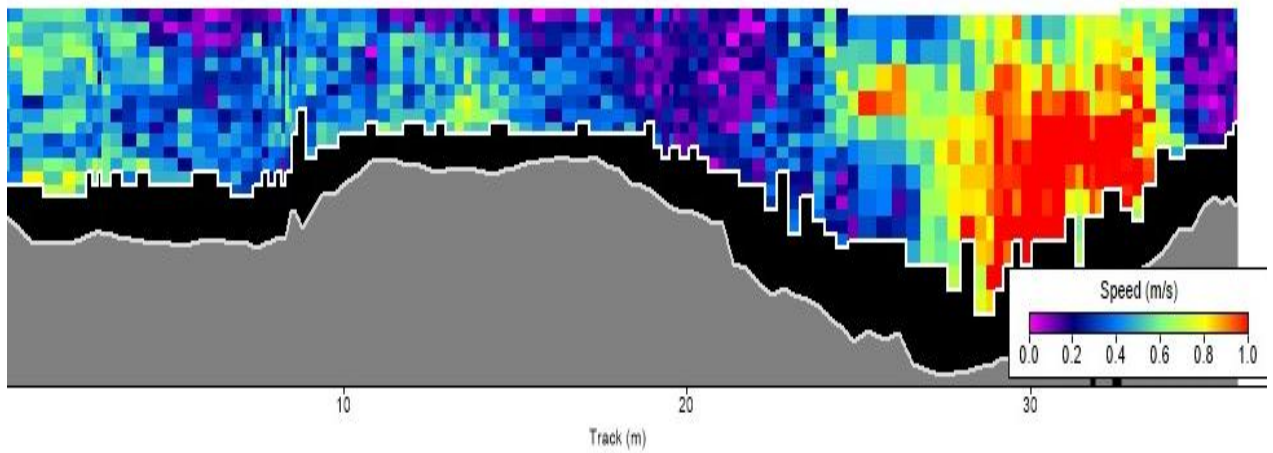
Pueden verse a continuación los resultados más relevantes arrojados por el ADCP

**Tabla 9:**

Sección Transversal	Margen de Inicio	Ancho (m)	Area (m2)	Velocidad Barca (m/s)	Velocidad promedio (m/s)	Q Total (m3/s)
1	Derecha	37,958	121,805	0,191	0,339	41,281
2	Izquierda	31,429	102,574	0,185	0,384	39,377
3	Derecha	30,756	114,317	0,27	0,392	44,862
4	Izquierda	32,454	119,84	0,263	0,395	47,365
5	Derecha	34,177	120,77	0,179	0,364	43,904
6	Izquierda	34,927	125,533	0,223	0,373	46,773
7	Derecha	34,569	117,257	0,26	0,361	42,36
8	Izquierda	34,409	122,837	0,218	0,397	48,737
<b>Promedios</b>		<b>33,835</b>	<b>118,117</b>	<b>0,224</b>	<b>0,376</b>	<b>44,332</b>

**Tabla 9.** Resultados arrojados por el instrumento de medición en Paso de la Cina

La **Figura 71** muestra el campo de velocidades medido con ADCP y promediado mediante el programa computacional VMT (Velocity Mapping Toolbox), y el perfil de fondo de la sección aforada en el puente de la estación de Paso de la Cina.



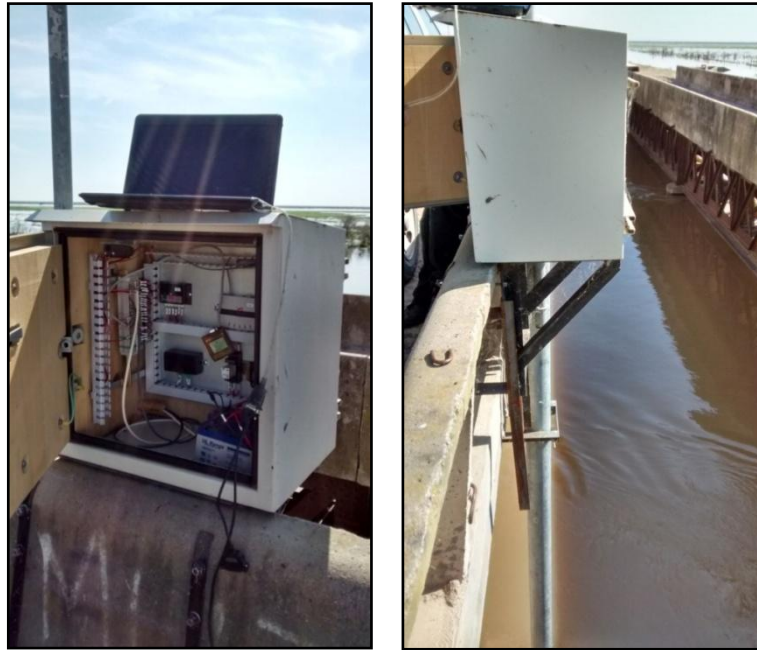
**Figura 71.** Sección transversal en Paso de la Cina

Las mayores velocidades se registraron en la margen izquierda de la sección, con un valor máximo local de 1,825 m/s. La profundidad media es de 3,68 m, y la máxima profundidad local registrada es de 6,12 m, cercana a la margen izquierda.

#### **4.2.2.2. Paso de los Oscares**

Por último, nos dirigimos a la segunda estación, Paso de los Oscares. En la misma se realizó el mantenimiento y descarga de datos (**Figuras 72 y 73**), además se aforo la sección al igual que en la sección anterior.

Cabe comentar que en esta sección se aforó el río Utis (brazo del río Dulce) y en el trayecto hacia dicha sección pudo verse el cauce original del río Dulce con una apreciable cantidad de caudal fluyendo, el cual no pudo ser medido.

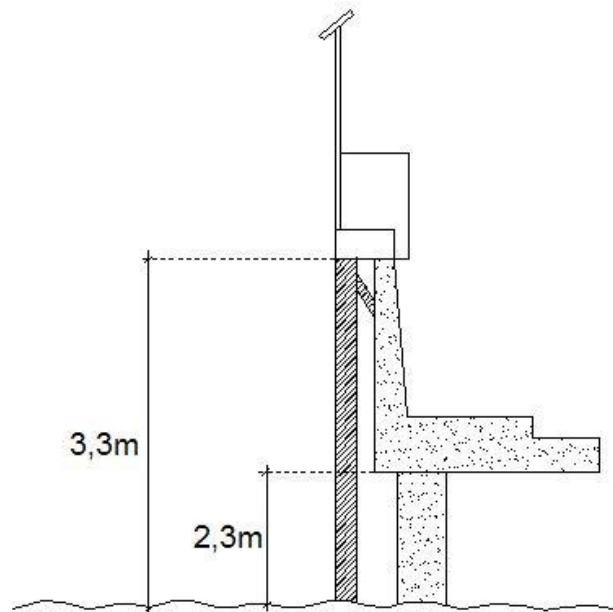


**Figura 72.** Estructura soporte del instrumental Paso de los Oscars.



**Figura 73.** Descarga de datos.

También fueron relevadas cotas como: distancia del pelo de agua a la base del instrumento y distancia del pelo de agua a la base del tablero del puente. A continuación se presenta el respectivo croquis (**Figura 74**):



**Figura 74.** Esquema acotado en estación limnimétrica ubicada en la sección de Paso de los Oscares

El aforo del caudal en la sección de Paso de los Oscares (**Figura 75**) se hizo en las mismas condiciones que en la sección de Paso de la Cina.



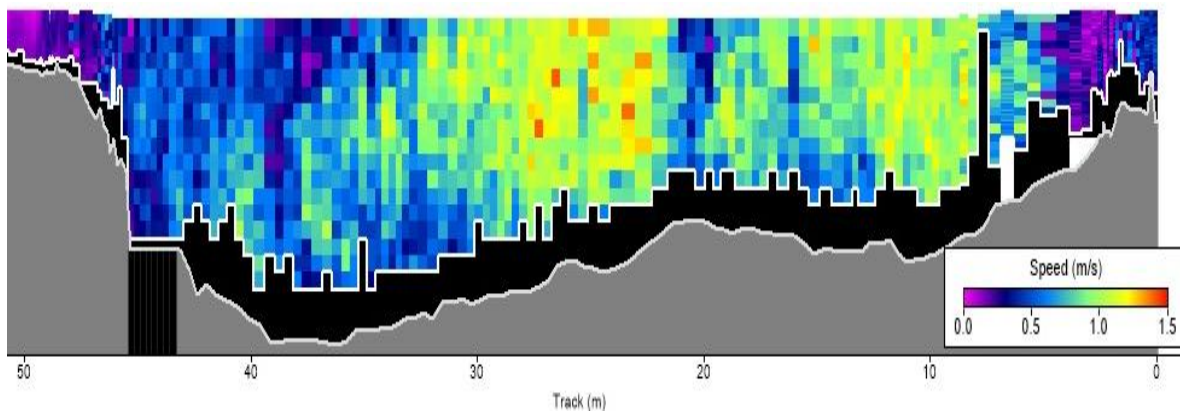
**Figura 75.** Aforo sección Paso de los Oscares

Los resultados se muestran en la **Tabla 10**:

Sección Transversal	Margen de Inicio	Ancho (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Velocidad Barca (m/s)	Velocidad promedio (m/s)	Q Total (m <sup>3</sup> /s)
1	Izquierda	48,003	116,913	0,279	0,706	82,498
2	Derecha	46,987	115,131	0,255	0,675	77,666
3	Izquierda	48,395	113,344	0,268	0,706	79,969
4	Derecha	44,878	118,966	0,282	0,658	78,237
5	Izquierda	46,649	119,565	0,241	0,652	77,969
6	Derecha	47,613	118,639	0,29	0,641	76,043
7	Izquierda	48,745	117,934	0,261	0,669	78,86
8	Derecha	46,301	117,356	0,3	0,671	78,76
<b>Promedios</b>		<b>47,197</b>	<b>117,231</b>	<b>0,272</b>	<b>0,672</b>	<b>78,75</b>

**Tabla 10.** Resultados arrojados por el instrumento de medición en Paso de los Oscars

La **Figura 76** muestra el campo de velocidades medido con ADCP y promediado mediante el programa computacional VMT (Velocity Mapping Toolbox), y el perfil de fondo de la sección aforada en el puente de la estación de Paso de la Cina.



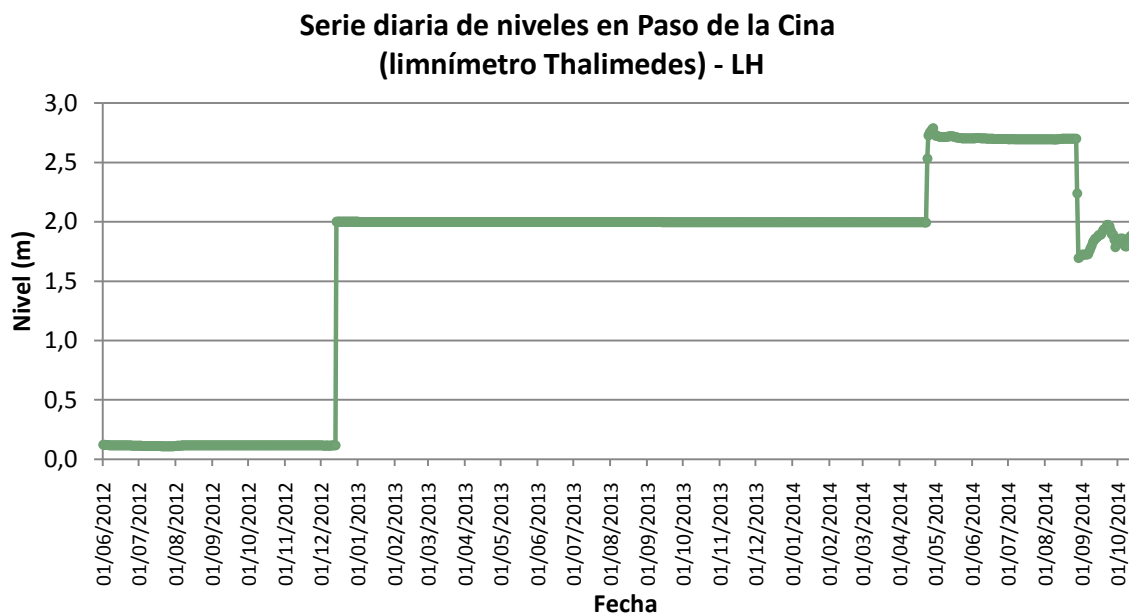
**Figura 76.** Sección transversal en Paso de los Oscars

Las mayores velocidades se registraron en el centro de la sección, con un valor máximo local de 1,491 m/s. La profundidad media es de 2,32 m, y la máxima profundidad local registrada es de 4,23 m, cercana a la margen derecha.

### 4.3. TRATAMIENTO DE DATOS LIMNIMÉTRICOS

#### 4.3.1. Serie de niveles Paso de la Cina

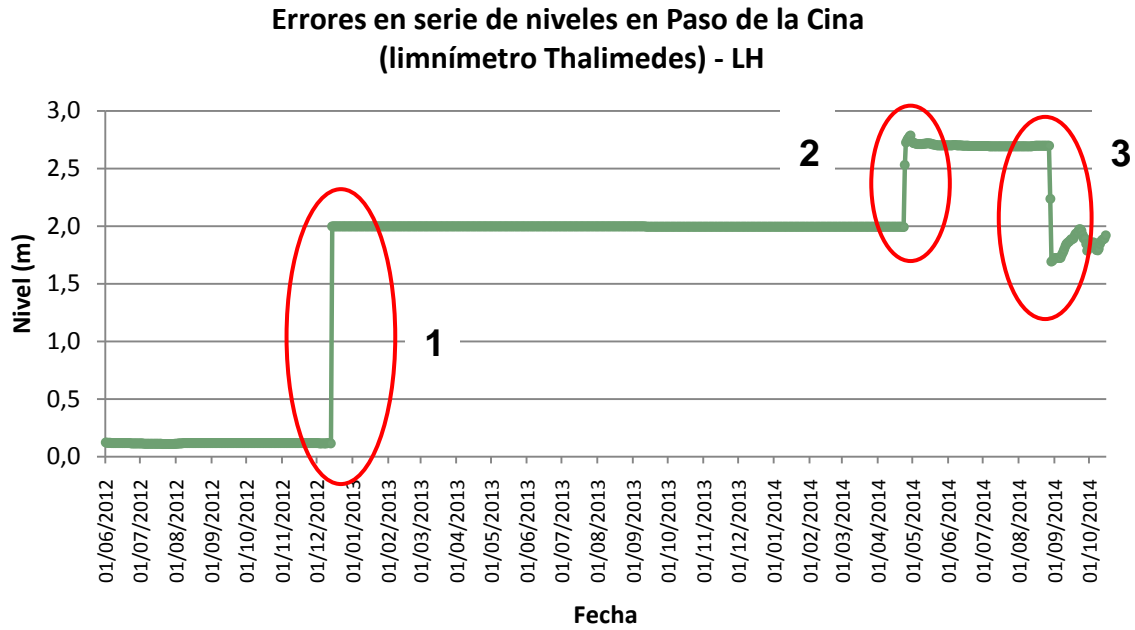
La serie de niveles proveniente del limnómetro Thalimedes ubicado en Paso de la Cina, muestra errores en la medición, presentándose largos periodos en los que la variación de nivel es nula o muy pequeña (**Figura 77**). Dicho error se presenta generalmente cuando la boya es obstruida con material del cauce. Ya que esta parte de la serie no explica la variación de nivel en un río, se descartan los datos hasta el día 28 de agosto del año 2014, en donde puede suponerse que el limnómetro comienza a medir correctamente.



**Figura 77.** Serie de niveles del limnómetro Thalimedes en Paso de la Cina

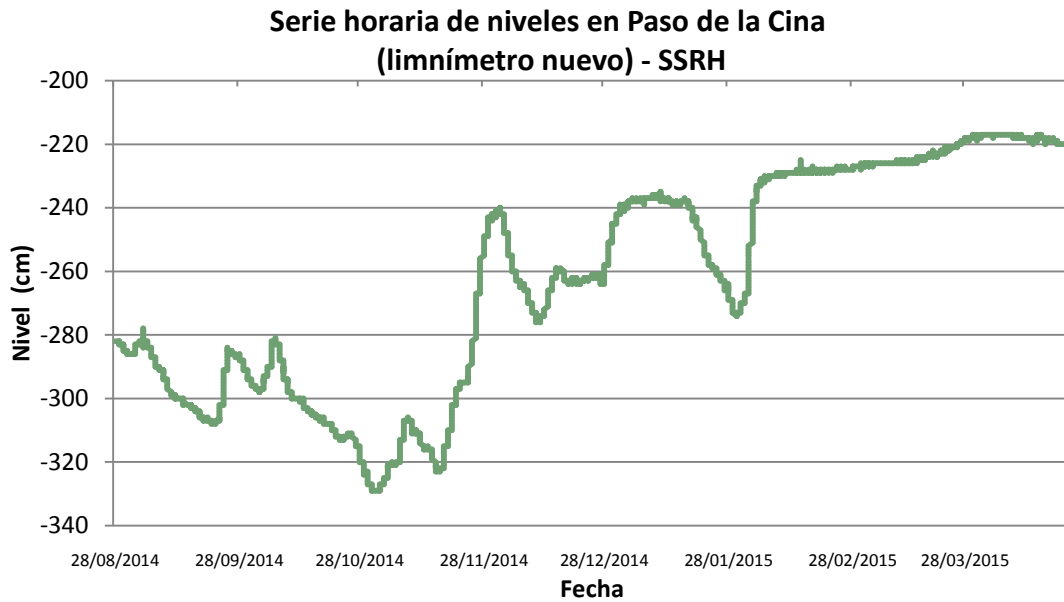
Se presentan cambios bruscos de nivel, los cuales se observan en la **Figura 78** referenciados con los números 1, 2 y 3. Los saltos 2 y 3, coinciden con campañas realizadas los días 24 de abril y 28 de agosto del año 2014 respectivamente, con el consecuente manipuleo del equipo de medición en donde se modifica su nivel de referencia. Luego del salto número 2, la serie parece tener una variación aceptable pero solo por un corto lapso de tiempo, luego vuelve a ser aproximadamente constante. En lo que respecta al salto número 3, luego de este el limnómetro se mantiene midiendo correctamente. El salto número 1 no pudo relacionarse a un evento en particular, pero seguramente tiene su origen en una desobstrucción brusca de la boya o en una campaña realizada.





**Figura 78.** Errores en la serie de niveles del limnómetro Thalimedes en Paso de la Cina

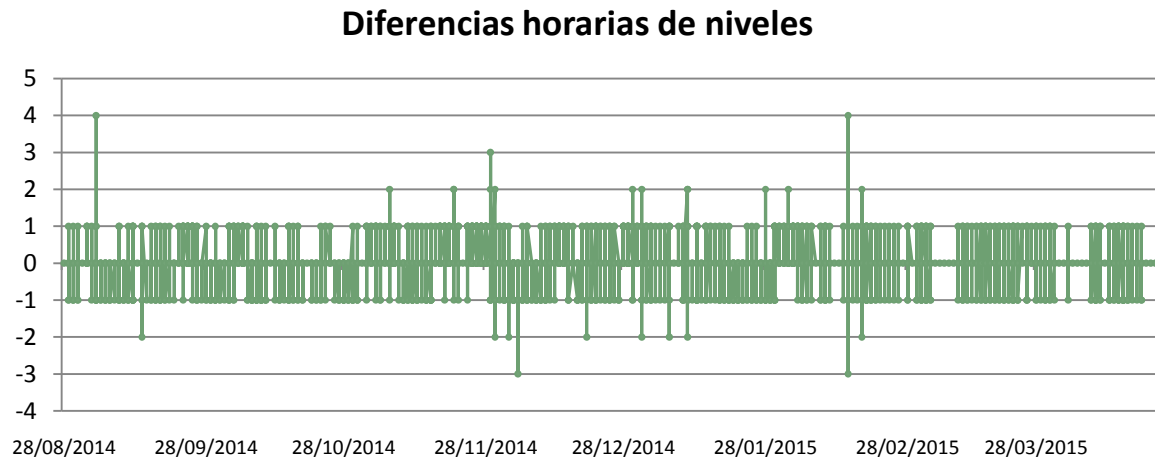
La serie obtenida de la nueva estación limnimétrica ubicada al Este de la sección de Paso de la Cina, muestra una variación aceptable.



**Figura 79.** Serie de niveles del limnómetro nuevo en Paso de la Cina

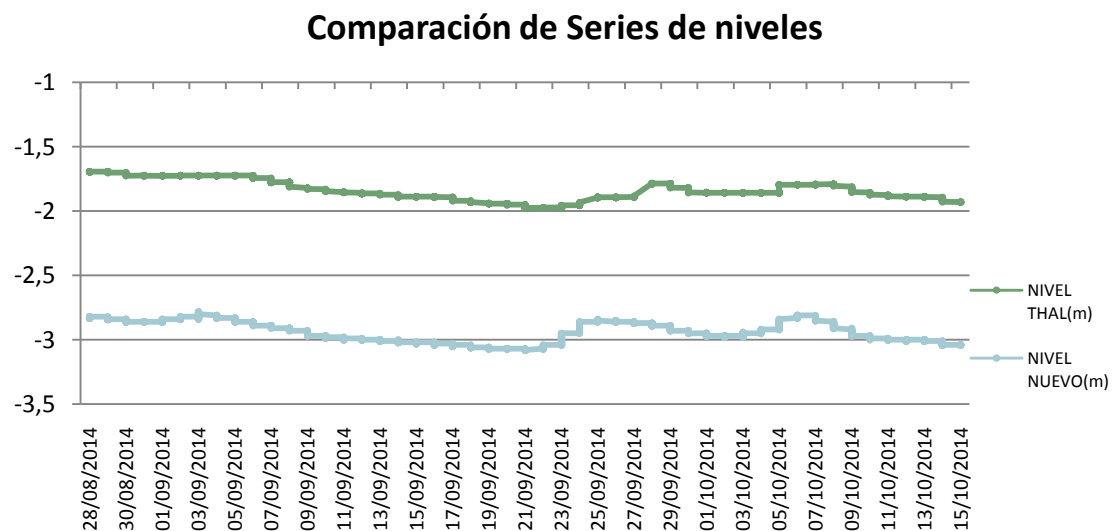
En la respectiva estación, tuvo que tenerse en cuenta que la boya y el contrapeso estaban invertidos, con la consecuente inversión en la medición. Por lo tanto la serie tuvo que tomarse de forma negativa.

Por último, para definir a la serie como válida, se graficaron las diferencias horarias para poder observar que las mismas estén en el orden de pocos centímetros (**Figura 80**). Resultaron así diferencias menores a los cuatro centímetros en la mayoría de los casos, lo cual tiene coherencia.



**Figura 80.** Diferencias horarias de la serie de niveles del limnómetro nuevo

Por otro lado fueron graficadas ambas series comparándolas sobre el periodo de superposición, en donde se observa que ambas presentan una tendencia similar (**Figura 81**).



**Figura 81.** Comparación de series de los diferentes limnómetros de Paso de la Cina

Se decidió trabajar sobre la serie del limnómetro nuevo instalado en Paso de la Cina sobre la margen Este de la sección, debido a los problemas presentados en el otro limnómetro.

Para poder referenciar esta serie de niveles a una cota de referencia, se tomo como tal una altura de 4 metros, a la cual se le restó 0,80 metros que es la distancia desde el pelo de agua al borde superior del tablero del puente, el mismo fue seleccionado por ser un punto fijo inamovible. Entonces para poder transformar la serie de niveles en una serie de cotas de referencia, se tomo como “cota 0” la medición del limnómetro el día de la última campaña realizada (-220 cm) y se calculó la diferencia de toda la serie respecto de este valor. Luego esta diferencia relativa fue sumada, con su respectivo signo, a la cota de referencia tomada **Tabla 11:**

$$4 \text{ m} - 0,80 \text{ m} = 3,2 \text{ m}$$

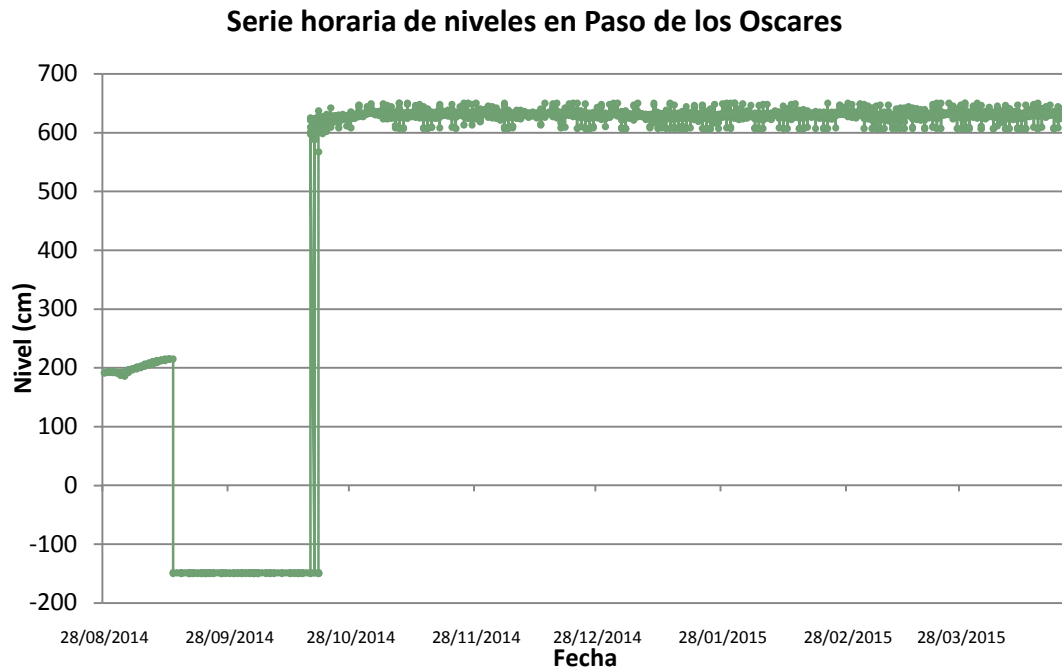
DATOS INICIALES		
FECHA CAMPAÑA	23/04/2015	
LUGAR	Paso de la Cina	
APARATO	SSRH	
COTA TABLERO PROPUESTA	4	m
NIVEL TABLERO - PELO LIBRE	0,8	m
COTA DE REFERENCIA (4 - 0,8)	3,2	m

**Tabla 11.** Datos iniciales para el cálculo de la serie de cotas

El objetivo de la ejecución de esta nueva serie de cotas referenciadas, es poder unir todas las demás series de niveles obtenidas anteriormente y las que se obtengan en el futuro, de cualquiera de los dos limnómetros pertenecientes a esta estación. Para lograr lo establecido anteriormente, **debe tenerse presente que cuando se realice una campaña y se mueva el limnómetro por cualquier causa, con el consecuente movimiento del “cero del aparato”, se torne indispensable la medición de la distancia desde el pelo de agua al borde superior del tablero del puente.** Cabe aclarar que prescindimos de la medición desde el pelo de agua hasta el fondo del cauce por ser este variable. Para hacer más fácil esta labor y para que cualquier persona, aunque no tenga conocimiento sobre el tema planteado, se asegure de tomar esta distancia y a su vez lo haga correctamente, se diseño una planilla con un croquis que solo se debe completar, la misma se presenta en el ANEXO del presente informe.

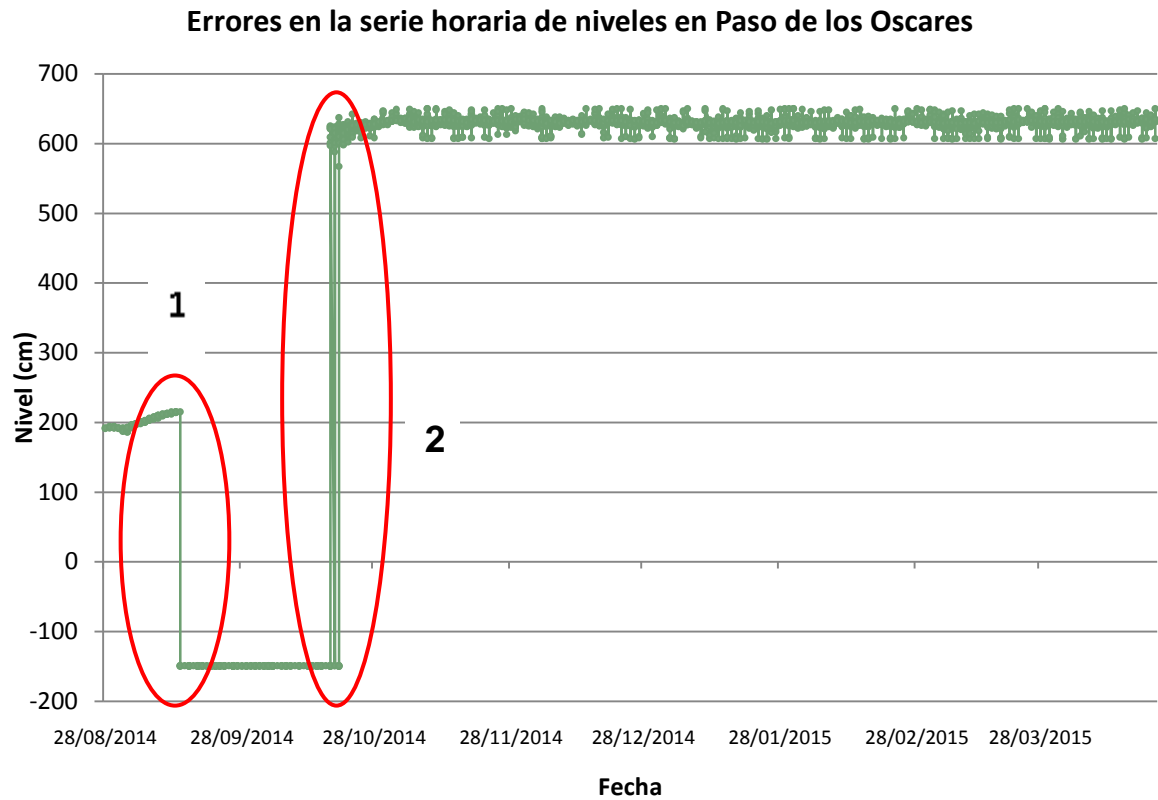
#### **4.3.2. Serie de niveles Paso de los Oscares**

La serie de niveles correspondiente a la estación de la Paso de los Oscares se muestra graficada a continuación (**Figura 82**):



En la serie puede verse que el aparato midió bien hasta el día 13 de septiembre del año 2014. Luego se quemó el fusible, motivo del salto brusco resaltado en la siguiente imagen con el número 1 (**Figura 83**). Este fue reemplazado en la campaña del día 16 de octubre del mismo año motivo del salto número 2. Dichas discontinuidades se producen por el cambio del nivel de referencia del aparato.

A pesar del acondicionamiento del instrumento, éste siguió midiendo de manera errónea ya que puede verse en la **Figura 82** que los niveles se mantuvieron constantes y con pequeños saltos horarios, esto pudo deberse a que perdió el contrapeso y la boya quedó colgando, escenario encontrado en la campaña del día 23 de abril del año 2015, por lo cual estos datos no pueden ser considerados como buenos.



**Figura 83.** Errores en la serie de niveles de Paso de los Oscars

En esta estación, sucede lo mismo que se explicó anteriormente para la estación de Paso de la Cina sobre la cota de referencia. Pero en este caso se propone medir en cada campaña la distancia desde el pelo de agua hasta la base del aparato.

#### 4.4. CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA COTA - CAUDAL

En el presente apartado, se construye una curva cota-caudal para la sección de Paso de la Cina (Figura 84). Dicha curva se realiza para esta sección ya que para la misma se cuenta con una serie de niveles actual y en buen estado.

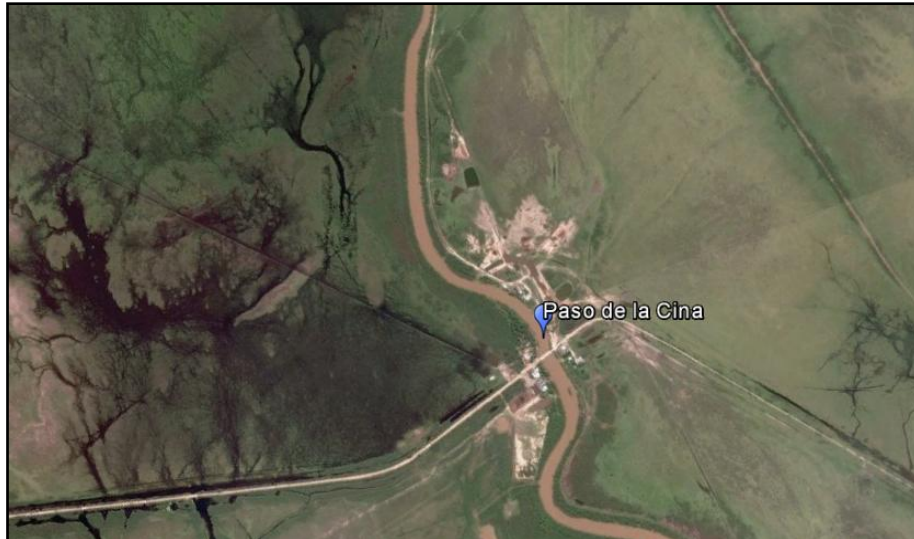


Figura 84. Ubicación de la sección en estudio.

A continuación (Figura 85) se presenta la grafica de la serie de niveles y caudales puntuales escurridos para distintas fechas en la sección de Paso de la Cina, sobre el rio Dulce.

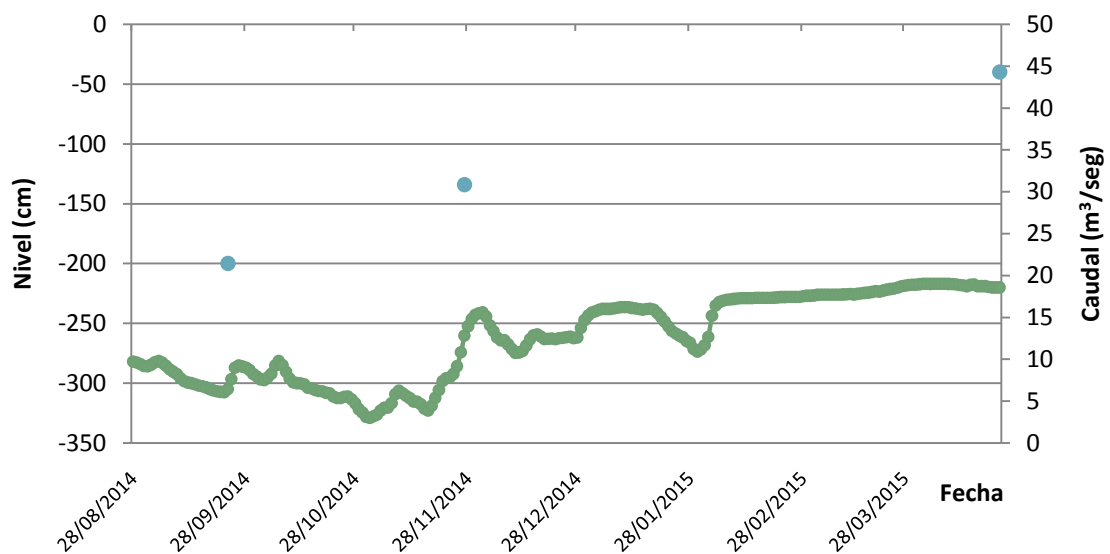
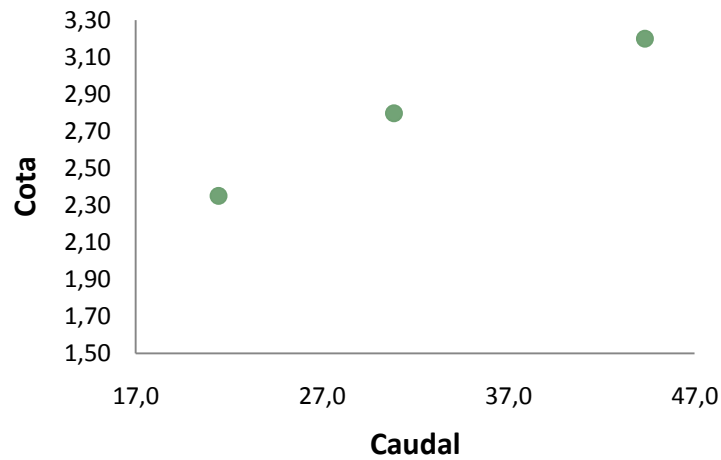


Figura 85. Serie de niveles y caudales aforados en Paso de la Cina

En la **Figura 86** se grafican los valores obtenidos en la serie de cotas de referencia explicada en el capítulo anterior, en función del caudal escurrido:



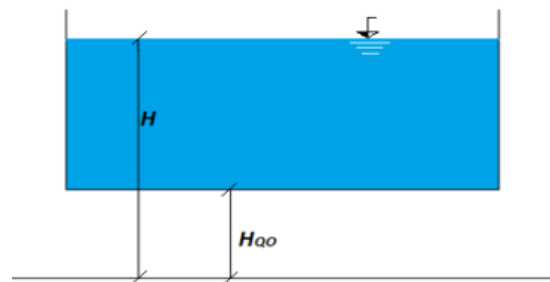
**Figura 86.** Cotas vs Caudal en Paso de la Cina.

**Ajustes estadísticos de relaciones empíricas entre los valores de cota - caudal escurrido:**

Se procedió a desarrollar interpolaciones mediante el ajuste estadístico de los valores a través de ecuaciones matemáticas (con fundamento hidráulico) del tipo (Ec. 6):

$$Q = \alpha (H - HQ0)^\beta = \alpha \Delta H^\beta \quad (\text{Ec. 6})$$

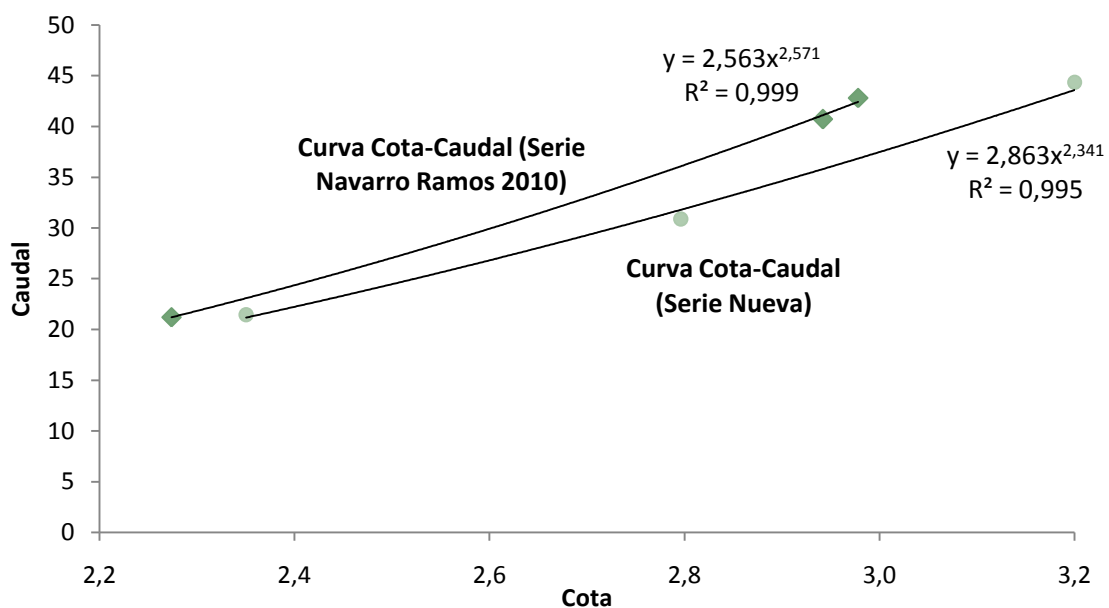
Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes de calibración, H es el nivel o altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia y HQ0 es un parámetro que representa la altura de superficie libre cuando no hay escurrimiento (caudal nulo) (**Figura 87**). El parámetro HQ0 es hipotético y no puede ser medido in situ en cursos fluviales (donde la batimetría del lecho es irregular), pero si puede ser relevado en estructuras de control como vertederos.



**Figura 87.** Esquema de un canal rectangular donde se representa al nivel de superficie libre registrado respecto a un nivel de referencia arbitrario (H) y el nivel caudal nulo (HQ0)

En el presente capítulo, se tomo la serie de niveles y los caudales utilizados en Navarro Ramos (2010), se llevo la serie de niveles al mismo sistema de referencia tomado en este trabajo, transformándola en serie de cotas, así de esta manera poder hacer una comparación de los resultados obtenidos y luego unirlos y obtener una única curva con mayor cantidad de puntos.

En la **Figura 88** se muestran las curvas cota-caudal construidas con los datos adquiridos en este trabajo y con los datos utilizados en Navarro Ramos 2010, en donde se puede observar que ambas presentan la misma tendencia.



**Figura 88.** Curvas cota-caudal (serie nueva y serie Navarro Ramos 2010)

En la **Tabla 12** se presentan los parámetros de la ecuación (Ec. 4) ajustados estadísticamente en una primera aproximación para las curvas cota-caudal de ambas series de la misma sección, considerando que HQ0 es nulo (se asume así que el nivel de referencia coincide con el nivel de caudal cero), utilizando únicamente como variable independiente el valor de las cotas.

	$\alpha$	$\beta$
<b>Curva nueva</b>	2,863	2,341
<b>Curva Navarro Ramos</b>	2,564	2,271

**Tabla 12.** Parámetros de la Ec 4 para una primera aproximación.



Se realiza una comparación entre ambas curvas de caudales aforados y caudales calculados **Tabla 13**:

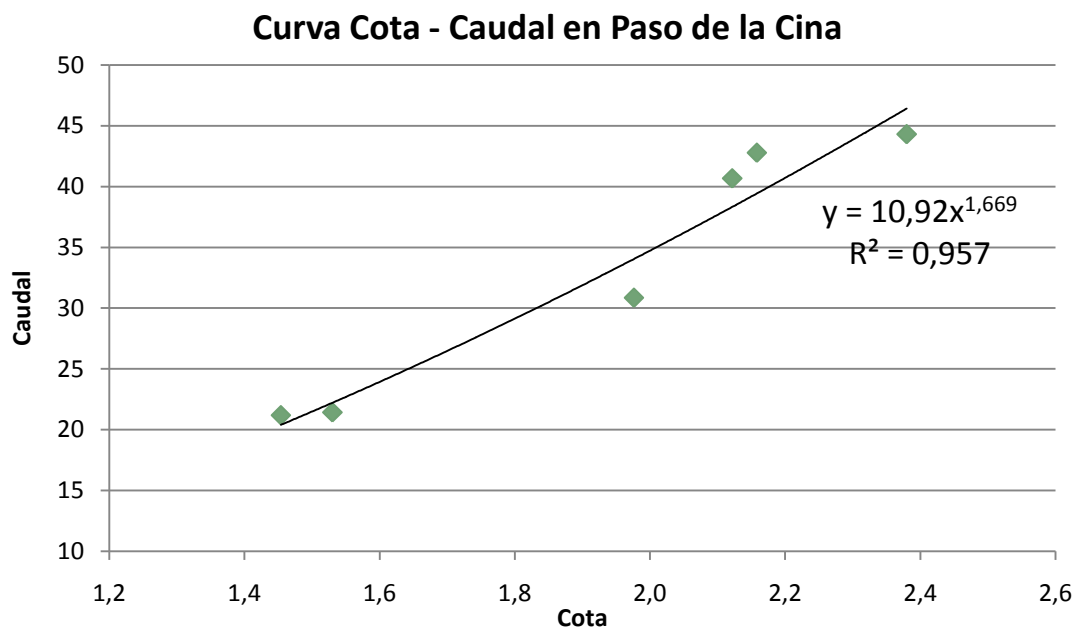
FECHA	Cota	Q (m3/seg)	Q Curva Nueva	ξ %	Q Curva Navarro Ramos	ξ %
07/12/2009	2,27	21,20	19,58	-7,60	21,18	-0,08
18/03/2010	2,94	40,70	35,80	-12,04	41,08	0,93
23/06/2010	2,98	42,80	36,84	-13,92	42,39	-0,96
23/09/2014	2,35	21,45	21,17	-1,30	23,06	7,55
27/11/2014	2,79	30,86	31,78	2,99	36,05	16,80
23/04/2015	3,20	44,33	43,59	-1,67	50,99	15,03

**Tabla 13.** Comparación entre caudales aforados y caudales calculados con cada cueva cota-caudal para Paso de la Cina.

Puede verse que el uso de la “curva nueva” arroja valores con menor error relativo que la curva calculada en Navarro Ramos 2010, esto se debe a que para el ajuste de la primera fueron utilizados caudales bajos, medios y altos, en cambio para la segunda no se contaba con valores intermedios, aunque se cubrió un espectro importante de variaciones de caudal.

El máximo error relativo generado por las curvas utilizadas por separado es del 16,8 %, se espera que con el ajuste realizado utilizando la totalidad de los puntos, este valor se reduzca.

En una segunda aproximación, finalmente seleccionada en este informe, se realizó una curva cota-caudal con toda la información disponible. Luego se procedió a determinar el parámetro HQO de forma tal que represente un comportamiento hidráulico adecuado, con exponentes del orden de 5/3 para los caudales relevados en la sección del cauce del sistema fluvial analizado. La **Figura 89** muestra los resultados de este ajuste para la sección en cuestión.



**Figura 89.** Curva Cota - Caudal para la sección de Paso de la Cina

En la **Tabla 14** se muestran los parámetros de la (Ec. 4) ajustados estadísticamente:

	$\alpha$	$\beta$	Hq0
<b>Curva cota-caudal</b>	10,92	1,669	0,82

**Tabla 14.** Parámetros de la Ec. 4 para una segunda aproximación.

Luego se realiza la comparación de caudales aforados con los caudales calculados

**Tabla 15:**

FECHA	H	Q	H-HQ0	Q (Curva H-Q)	$\xi$ %
<b>07/12/2009</b>	2,27	21,20	1,45	<b>20,32</b>	<b>-4,13</b>
<b>18/03/2010</b>	2,94	40,70	2,12	<b>38,07</b>	<b>-6,46</b>
<b>23/06/2010</b>	2,98	42,80	2,16	<b>39,16</b>	<b>-8,51</b>
<b>23/09/2014</b>	2,35	21,45	1,53	<b>22,13</b>	<b>3,19</b>
<b>27/11/2014</b>	2,79	30,86	1,98	<b>33,83</b>	<b>9,62</b>
<b>23/04/2015</b>	3,20	44,33	2,38	<b>46,06</b>	<b>3,91</b>

**Tabla 15.** Comparación entre caudales aforados y caudales calculados con la curva cota-caudal para Paso de la Cina.

Como era de esperarse el máximo error relativo máximo disminuyó a 9,6 %. Los errores mostrados son valores aceptables ya que la curva fue ajustada solo con 6 puntos, los cuales tienen errores propios provenientes de diferentes causas como son:

- ❖ La sección de aforos debe ser sensible. Esto quiere decir que para una variación de caudal, aunque sea leve, experimente una variación de nivel de agua. Una sección es más sensible que otra si para la misma variación de caudal experimenta una mayor variación de nivel de agua. Esto no siempre ocurre, ya que para valores de caudales mayores a 40 m<sup>3</sup>/seg aproximadamente, la sección de Paso de la Cina comienza a comportarse como sección llena debido a que el pelo de agua sobrepasa la base del puente.
  
- ❖ Cinco de los seis aforos, fueron obtenidos mediante el empleo de molinetes hidrométricos. Por lo que se deben tener en cuenta una serie de errores sistemáticos que se cometen en la determinación de la velocidad media por el uso de esta metodología, por ejemplo:
  - Que el flujo sea inestable, es decir el nivel de agua cambie apreciablemente durante la medición.
  - Que el material en suspensión interfiera en el molinete, distorsionando el valor de velocidad.
  - Que la dirección del flujo no sea paralela a la hélice del molinete.
  - Que sea utilizado un molinete para medir velocidades que se encuentren fuera de su rango de calibración (en algunos casos se mide con molinetes que poseen dos curvas de calibración, y esta condición no se tiene en cuenta al momento de medir).
  - Que los equipos usados para la medición (tales como barras de vadeo o cables de suspensión) sean diferentes a los usados durante la calibración del molinete, en cuyo caso se introducen errores sistemáticos.
  - Que sea significativa la perturbación de la superficie libre del agua por acción del viento, o cualquier otra causa, cuando se va a medir la velocidad superficial.
  - Que el molinete no sea sostenido de manera estable en el lugar correcto durante la medición.

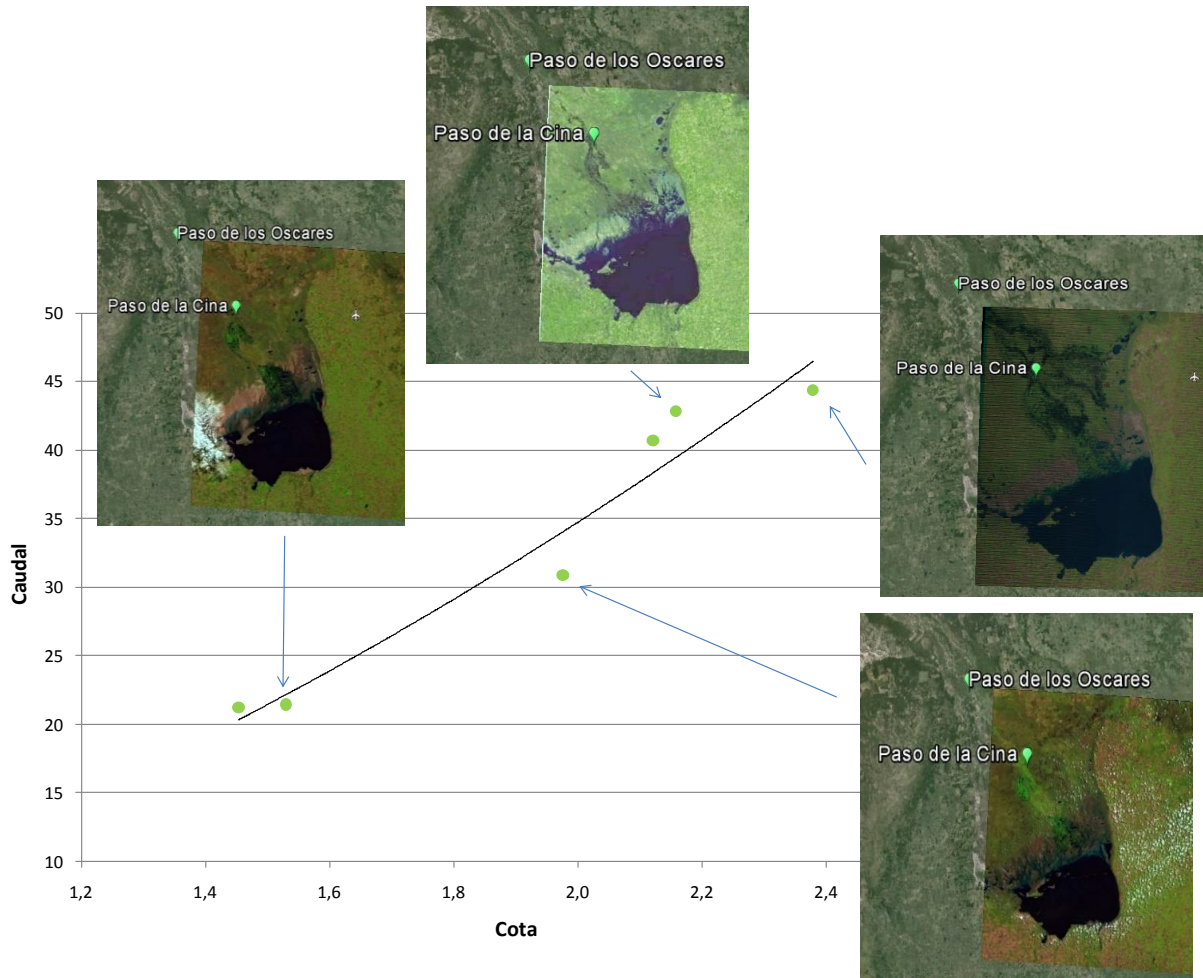
Por otra parte, según sea el grado de precisión que se quiera obtener en el aforo, se tomarán mayor o menor número de puntos de medida en la sección. Cuando se pretende obtener una alta precisión, se elegirán mayor número de verticales en la sección y se calculará la velocidad media en cada vertical.

- ❖ Otro de los errores cometidos con el uso del molinete, es el que este supone una variación de velocidad vertical de forma parabólica, la que se modifica cuando la sección comienza a trabajar a sección llena, por lo tanto dicha medición no está contemplando este suceso.
- ❖ En lo posible la sección no debe estar sujeta a desbordes; debe ser más bien estrecha y de geometría continua para evitar cambios bruscos en la ley H-Q. Hecho que se presenta luego de un cierto caudal de desborde, inundando la planicie a su alrededor.
- ❖ Aguas arriba del emplazamiento de la sección de aforo, el canal debe ser recto y poseer una sección transversal razonablemente uniforme, en una longitud aproximadamente igual a diez veces su anchura media. Si existe una curva muy cerca de dicha sección, la altura del agua a los dos lados del canal es diferente. Pueden, sin embargo, efectuarse medidas aceptablemente exactas, si el tramo recto del canal tiene una longitud de unas dos veces su anchura. Esto también se debe tener presente en la sección, ya que aguas arriba puede verse una curva muy próxima.
- ❖ Los niveles durante la medición deben leerse en una mira (limnómetro), lo que conlleva a errores de apreciación.

A continuación se detallan una serie de consideraciones generales, que se deben tener en cuenta al utilizar los interpoladores con fundamento hidráulico (curvas H-Q), obtenidas a través de los ajustes estadísticos de los valores de cota- caudal escurrido. Las mismas son:

- Las curvas cota-caudal calibradas (al ser interpoladores) deben ser utilizadas únicamente para representar condiciones de flujo que se encuentren en el rango de niveles registrados. Extrapolarlas a condiciones que no se encuentren en ese rango puede conducir a errores importantes.
- La validez de las curvas cota-caudal, en cauces fluviales, dependerá de cuan estable sea la sección en el tiempo. Esta problemática no está presente en estructuras de control.

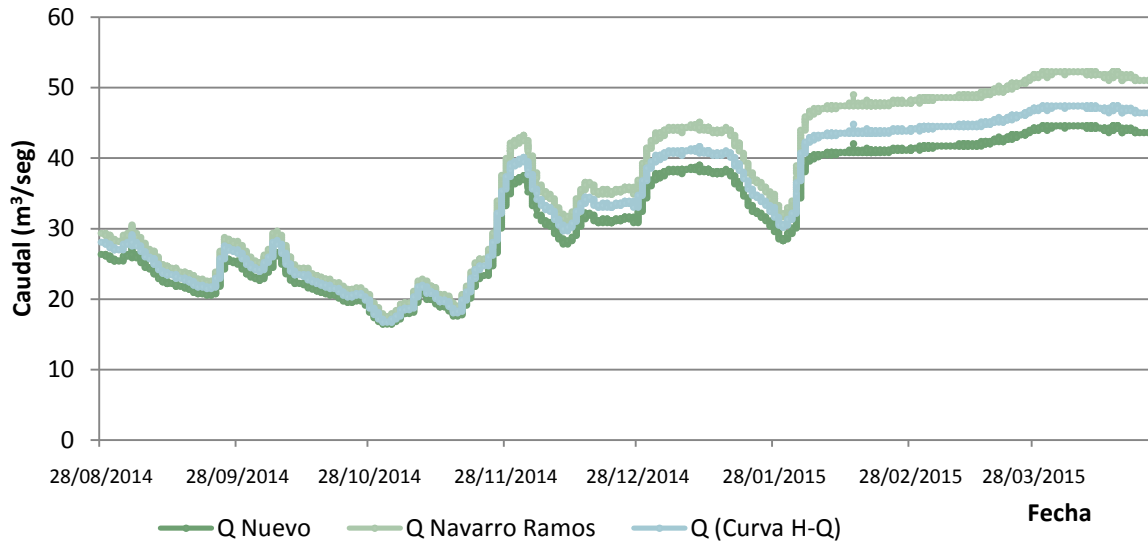
En la **Figura 90** se ilustra la curva cota - caudal con imágenes satelitales de las fechas de algunos aforos:



**Figura 90.** Curva cota-caudal ilustrada con imágenes satelitales de las fechas de algunos aforos.

**Reconstrucción del hidrograma en Paso de la Cina:**

A partir de los registros de niveles obtenidos en la sección de Paso de la Cina sobre el río Dulce y mediante las tres curvas cota-caudal ajustadas anteriormente, se procedió a determinar los respectivos hidrogramas, los cuales se muestran en la **Figura 91**.



**Figura 91.** Hidrogramas en Paso de la Cina.

En la **Figura 92** se presenta el hidrograma definitivo de la sección de Paso de la Cina, en donde fueron agregados los caudales obtenidos a partir de la serie de niveles utilizada en Navarro Ramos 2010. Se presenta un gran período desde 2011 a 2013 sin información, debido a que la serie de niveles de ese período presento valores erróneos.

**Caudal diario en Paso de la Cina (m³/seg)**



**Figura 92.** Caudales diarios en Paso de la Cina

#### **4.5. CALCULO DEL CAUDAL UTILIZANDO LA FÓRMULA DE MANNING**

La obtención del caudal se puede realizar por varios métodos. Uno de los más conocidos es la ecuación de Manning, la cual se basa en parámetros geométricos del canal que se va a estudiar, la pendiente hidráulica y el coeficiente de rugosidad “n”, siendo los primeros parámetros fáciles de conocer ya que son medidos directamente en el sitio de estudio.

Al aplicar dicha ecuación, la mayor dificultad está en la determinación del coeficiente de rugosidad n ya que es muy variable, depende de una gran cantidad de factores y no existe un método exacto para la selección de su valor.

Los factores que afectan al coeficiente de rugosidad de Manning son:

- 1) Rugosidad de la superficie: Se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forma el perímetro mojado y que producen un efecto retardador sobre el flujo. En general, los granos finos resultan en un valor relativamente bajo de n y los granos gruesos dan lugar a un valor alto de n.
- 2) Vegetación: Puede ser considerada como una clase de rugosidad superficial. Este efecto depende principalmente de la altura, densidad, distribución y tipo de vegetación, y es muy importante en el diseño de canales pequeños de drenaje, ya que por lo común éstos no reciben mantenimiento regular.
- 3) Irregularidad del canal: Se refiere a las variaciones en las secciones transversales de los canales, su forma y su perímetro mojado a lo largo de su eje longitudinal. En canales naturales, tales irregularidades por lo general son producidas por la presencia de barras de arena, ondas de arena, cresta y depresiones y fosos y montículos en el lecho del canal. En general, un cambio gradual y uniforme en la sección transversal o en su tamaño y forma no produce efectos apreciables en el valor de n, pero cambios abruptos o alteraciones de secciones pequeñas y grandes requieren el uso de un valor grande de n.
- 4) Alineamiento del canal: Curvas suaves con radios grandes producirán valores de n relativamente bajos, en tanto que curvas bruscas con meandros severos incrementarán el n.
- 5) Sedimentación y erosión: Para el caso de la sedimentación dependerá del tipo de material depositado, donde quizá se pase de un canal muy irregular a uno relativamente uniforme donde se disminuirá n y para la socavación se tendría el efecto contrario.
- 6) Obstrucción: La presencia de obstrucciones tales como troncos de árbol, pilas de puentes, desechos de flujos, atascamientos, pueden tener un impacto significativo sobre el valor de n. El grado de los efectos de tales obstrucciones depende del número y tamaño de ellas.

7) Tamaño y forma del canal: No existe evidencia definitiva acerca del tamaño y la forma del canal como factores importantes que afecten el valor del coeficiente de rugosidad  $n$ . Un incremento en el radio hidráulico puede aumentar o disminuir el  $n$ , según la condición del canal.

8) Nivel y caudal: En la mayor parte de las corrientes el valor de  $n$  disminuye con el aumento en el nivel y en el caudal. Cuando el agua es poco profunda, las irregularidades del fondo del canal quedan expuestas y sus efectos se vuelven pronunciados. Sin embargo, el valor de  $n$  puede ser grande en niveles altos si las bancas están cubiertas por pastos o son rugosas.

9) Cambio estacional: Debido al crecimiento estacional de planta acuáticas, hierbas, malezas, sauces y arboles en el canal o en la banca, el valor de  $n$  puede aumentar en la estación de crecimiento y disminuir en la estación inactiva; además este factor puede producir cambios en otros factores.

10) Material en suspensión y carga de lecho: El material en suspensión y la carga de lecho, ya sea en movimiento o no, consumirá energía y causa una pérdida de altura e incrementa la rugosidad aparente del canal.

A continuación se presentan algunas metodologías para la selección de los valores del coeficiente de rugosidad:

#### Métodos visuales:

- Tablas de coeficiente de rugosidad de Manning.

Debido a la importancia de la selección del valor del coeficiente de rugosidad y la complejidad de su determinación, se han desarrollado tablas con valores típicos de  $n$  para distintos tipos de corrientes naturales. Las mismas pueden ser encontradas en “Ven Te Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*”.

- Ilustraciones de canales con diferentes rugosidades.

En “Ven Te Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*”, se muestran fotografías para un cierto número de canales comunes, acompañadas por una breve descripción de las condiciones del canal y de los valores de  $n$  correspondientes.

#### Métodos analíticos:

La determinación del coeficiente de rugosidad de Manning, se puede realizar de manera analítica por medio de conocer todos los parámetros que se involucran en la ecuación de Manning (Ec. 7):



$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Los cuales son el caudal Q, el Área A, la Velocidad Media Vm, el Radio Hidráulico Rh, y la pendiente media S. Una vez conocidos todos estos factores por medio de aforos realizados en el punto de interés se despeja la ecuación de Manning para obtener el valor de n.

En el **presente capítulo** se utiliza en primer lugar el método analítico, haciendo uso de la fórmula de Manning, ya que en campaña habían sido obtenidos los parámetros intervinientes con ayuda del instrumento de medición utilizado, el ADCP. Además se contaba con la información de otras campañas realizadas anteriormente en la que el aforo fue hecho con molinete.

Para el cálculo se considera flujo uniforme, el cual presenta las siguientes características principales: la profundidad, el área mojada, la velocidad y el caudal en cada sección del canal son constantes; y la línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal son paralelos, es decir, sus pendientes son todas iguales.

La pendiente del cauce, en un primer intento, iba a ser determinada utilizando nivel óptico, y a través de mediciones consecutivas a lo largo del cauce se iba a definir el desnivel. Pero en campaña se observó que la pendiente era tan pequeña que se imposibilitaba determinarla de esta manera, ya que íbamos a necesitar mucha distancia para poder apreciar dicho desnivel, además las márgenes del río tenían mucha vegetación lo que dificultaba aun más esta labor.

Por este motivo, se decidió determinar la pendiente a través de una imagen STRM de resolución horizontal 90 metros y error vertical 16 m, sobre la zona de Paso de los Oscares. Con el uso del programa Global Mapper v15.0 Build, se pudo definir la pendiente de un recorrido de 32 km aproximadamente sobre el río Dulce.

El motivo por el cual se tomó esta sección para estudio, fue porque la medición del ADCP arrojó mejores resultados que en Paso de la Cina y además el flujo escurría libremente, recordando que en Paso de la Cina el flujo se encontraba fluyendo a sección llena por el puente, lo cual podía interferir en los resultados.

De esta manera se obtuvo una serie de pares de puntos distancia-elevación que fueron trasladados al Excel en donde fueron graficados.

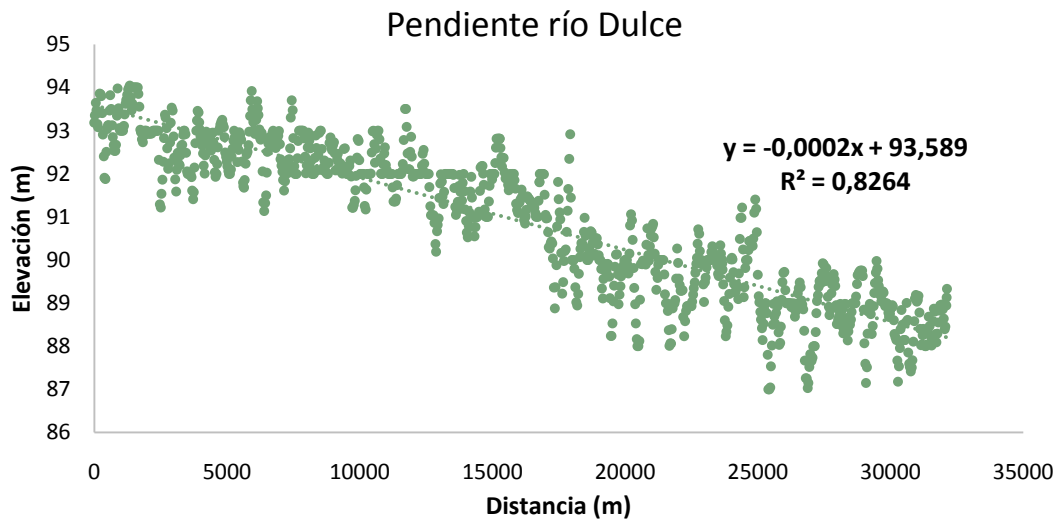


Figura 93. Pendiente del río Dulce

Puede verse la dispersión de puntos que tienen que ver con la precisión que poseen este tipo de imágenes. El error en elevación de la imagen es mayor al valor buscado (pendiente).

A este conjunto de datos se le efectuó un ajuste lineal, dicha fórmula nos arroja la pendiente del tramo en cuestión. Esta pendiente resultó ser muy pequeña como ya lo habíamos supuesto en base a la baja velocidad del flujo.

**Pendiente: - 0,0002**

Para el cálculo de flujo de corrientes naturales de poca profundidad, puede suponerse que el radio hidráulico es aproximadamente la profundidad media del cauce o canal:

$$R \approx H$$

Entonces:

$$\text{con } Q = V * A \quad \text{y} \quad A = B * H$$

$$Q = \frac{1}{n} B H^{5/3} S^{1/2}$$

Luego en base a los datos arrojados por el ADCP en la campaña realizada y a datos obtenidos de aforos efectuados con molinete en distintas fechas en la sección de Paso de los Oscares, se determino para cada medición, el coeficiente de rugosidad de Manning, determinando su promedio **Tabla 16**.

Fecha	Ancho (m)	Area (m <sup>2</sup> )	H med (m)	Q aforado (m <sup>3</sup> /s)	Pendiente (%)	n de Manning
22/10/2013	27,006	15,665	0,580	5,149	-0,02%	0,0274
23/04/2015	47,197	117,231	2,484	78,750	-0,02%	0,0353
08/12/2009	31,000	37,388	1,206	16,937	-0,02%	0,0324
18/03/2010	43,700	114,523	2,621	86,034	-0,02%	0,0328
23/06/2010	40,500	103,744	2,562	63,531	-0,02%	0,0396
<b>Promedio</b>						<b>0,0335</b>

**Tabla 16.** Determinación del n de Manning promedio para la sección de Paso de los Oscares.

De la **Tabla 16** se tiene que el valor del coeficiente de rugosidad obtenido con los datos de aforos en la estación de Paso de los Oscares es de **0,0335**.

Comparando con las tablas publicadas en “Ven Te Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*”, puede decirse que el valor obtenido es aceptable (**Figura 94**).

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
d. Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025	.....	0.060
b. Sección irregular y rugosa	0.035	.....	0.100

**Figura 94.** n de Manning tabulados según diferentes situaciones, “Ven Te Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*”

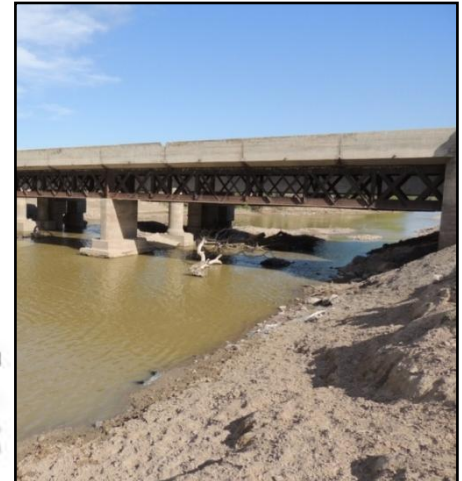
Luego comparando con las imágenes publicadas en “Ven Te Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*”, se definió a la figura (15) como de similares características a las vistas en el caso de estudio (**Figura 95**).

(15)



Figura 5-5 (13-15)

13.  $n = 0.029$ . Canal en tierra excavado en un suelo de limo aluvial, con depósitos de arena en el fondo y crecimiento de pastos.  
 14.  $n = 0.030$ . Canal con lecho de cantos rodados grandes.  
 15.  $n = 0.035$ . Canal natural, pendientes laterales algo irregulares; fondo más o menos nivelado, limpio y regular; en arcilla limosa gris clara a marga limosa marrón claro; muy poca variación en la sección transversal.



**Figura 95.** Comparación de imagen ilustrada en “Ven Te Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*”, e imagen tomada en la sección de estudio.

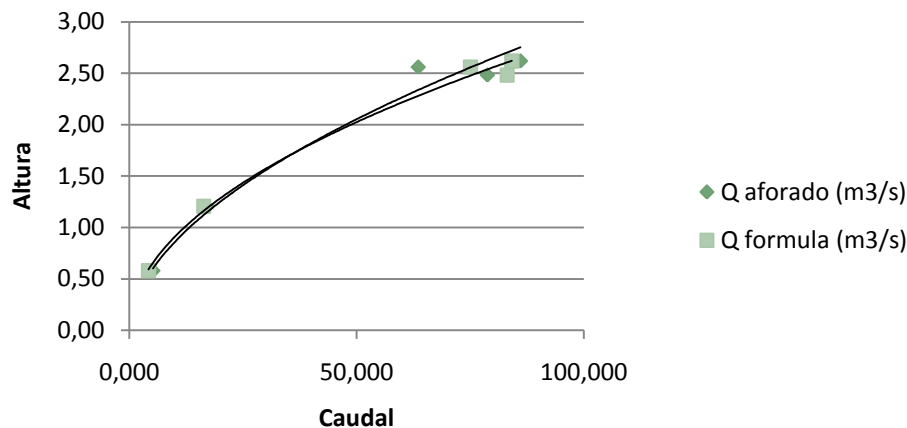
Una vez obtenido el valor de  $n$ , se calcula el valor del caudal por medio de la fórmula de Manning, para así poder comparar estos valores con los de caudales aforados. A partir de esto se puede concluir si este valor de  $n$  se puede considerar como característico para la zona en estudio y para el tipo de lecho de la sección.

Fecha	Q aforado (m <sup>3</sup> /s)	n de Manning	Q formula de Manning (m <sup>3</sup> /s)	$\xi$ %
22/10/2013	5,149	0,0335	4,212	-18,20
23/04/2015	78,750	0,0335	83,113	5,54
08/12/2009	16,937	0,0335	16,375	-3,32
18/03/2010	86,034	0,0335	84,147	-2,19
23/06/2010	63,531	0,0335	75,077	18,17

**Tabla 17.** Comparación de caudales aforados y caudales calculados con la fórmula de Manning utilizando  $n = 0.0335$  en Paso de los Oscares

Observando el error relativo entre valores de caudales aforados y calculados por medio de la fórmula de Manning con  $n = 0.0335$ , puede decirse que dicho valor se mantiene por debajo del 20 %, lo que resulta aceptable. Graficando ambos valores de caudales en función del Hmed, se observa una tendencia similar en ambas curvas (**Figura 96**).

Con lo establecido anteriormente, se puede concluir que el valor de  $n$  de 0,0335 puede ser considerado como característico para la zona de estudio.



**Figura 96.** Caudales aforados vs caudales calculado con la fórmula de Manning en Paso de los Oscares

La discrepancia entre valores de caudales aforados y los determinados a través de la fórmula, puede deberse a un gran número de causas, pudiendo ser la más relevante el hecho de que la mayoría de los aforos presentados fueron realizados con molinete, lo que conlleva a algunos errores al momento del cálculo del ancho, área y caudal.

En Paso de la Cina, fue realizado el mismo procedimiento, determinando el coeficiente de rugosidad de Manning a partir de dos aforos realizados con ADCP y tres con molinete hidrométrico, los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 18**.

Fecha	Ancho (m)	Area (m <sup>2</sup> )	H med (m)	Q aforado (m <sup>3</sup> /s)	Pendiente (%)	n de Manning
22/10/2013	19,778	31,158	1,575	5,252	-0,02%	0,1040
23/04/2015	33,835	118,117	3,491	44,332	-0,02%	0,0794
07/12/2009	28,000	49,675	1,774	21,186	-0,02%	0,0445
18/03/2010	30,000	92,075	3,069	40,709	-0,02%	0,0618
23/06/2010	27,000	92,513	3,426	42,798	-0,02%	0,0636

**Tabla 18.** Cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning para la sección de Paso de la Cina

Los valores obtenidos, muestran una gran variación, pasando por valores desde 0,04 a 0,1. Por lo tanto en esta sección no puede asegurarse la validez del método para determinar un coeficiente de rugosidad que la describa.

La causa principal de este hecho, puede tener origen en el valor que se le confiere a la pendiente, ya que la ecuación de Manning es muy sensible a dicho parámetro.

El motivo por el cual se piensa que la pendiente tomada puede ser errónea, es que en la simplificación en la que se supone flujo uniforme, se plantean las pendientes de energía, la del pelo libre y la del fondo del canal, paralelas. La sección en estudio presenta varias características que llevan a que la simplificación antedicha pueda inducir un apreciable error, por ejemplo:

- que la sección se encuentra justo en una curva del río (**Figura 97**)
- que a partir de cierto caudal la sección comienza a trabajar a sección llena (**Figura 98**)
- la sección de aforo se ubica en el puente, sección para que las hipótesis de flujo uniforme de la ecuación de Manning no se cumplen

llevando dichas situaciones a la formación de una curva de remanso en el sector donde está siendo realizado el aforo y la medición de los demás parámetros, provocando un cambio en la pendiente que no está siendo considerado.



**Figura 97.** Curva aguas arriba de la sección de medición



**Figura 98.** Flujo obstruido por el puente en Paso de la Cina

Además como puede observarse en la **Figura 98** se presenta un aumento en la rugosidad debido a la presencia de ramas, botellas y demás elementos, lo que implica un aumento en el  $n$  de Manning y una disminución en la velocidad del flujo.

# Capítulo 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 5.1. ACTUALIZACION DE LA BASE DE DATOS

- **CONCLUSIONES**

Se actualizaron las series diarias y mensuales de niveles de la Laguna Mar Chiquita hasta febrero del año 2014. Las últimas mediciones indican un nivel diario de la Laguna de 67,68 m s.n.m. el día 28 de febrero y un nivel mensual de 67,3 m s.n.m.

Se actualizó la serie de caudales diarios del río Dulce erogados aguas abajo del Dique Los Quiroga hasta diciembre del año 2006 y la serie de caudales mensuales hasta agosto del año 2011. Las últimas mediciones indican un caudal diario erogado aguas abajo del dique Los Quiroga de 78,4 m<sup>3</sup>/seg el día 31 de diciembre y un caudal mensual de 42,8 m<sup>3</sup>/seg en el mes de agosto.

Se actualizaron los aforos realizados en Paso de la Cina y Paso de los Oscares. Cinco de los siete nuevos aforos obtenidos fueron conseguidos a través de la S.R.H. y los dos restantes se obtuvieron de campañas realizadas por el Laboratorio de Hidráulica en las fechas 22-10-2013 y 23-04-2015.

Se actualizaron las series de niveles horarias de las estaciones de medición de Paso de la Cina y Paso de los Oscares. Dos de las series corresponden a Paso de la Cina, ya que en esta sección se cuenta con dos limnímetros instalados. Se tiene una serie de niveles provenientes del limnómetro Thalimedes entre las fechas 01-06-2012 al 15-10-2014 y otra serie del limnómetro nuevo entre las fechas 28-08-2014 al 23-04-2015. En lo que respecta a Paso de los Oscares, se obtuvo una serie de niveles correspondiente al periodo entre las fechas 28-08-2014 al 15-10-2014.

- **RECOMENDACIONES**

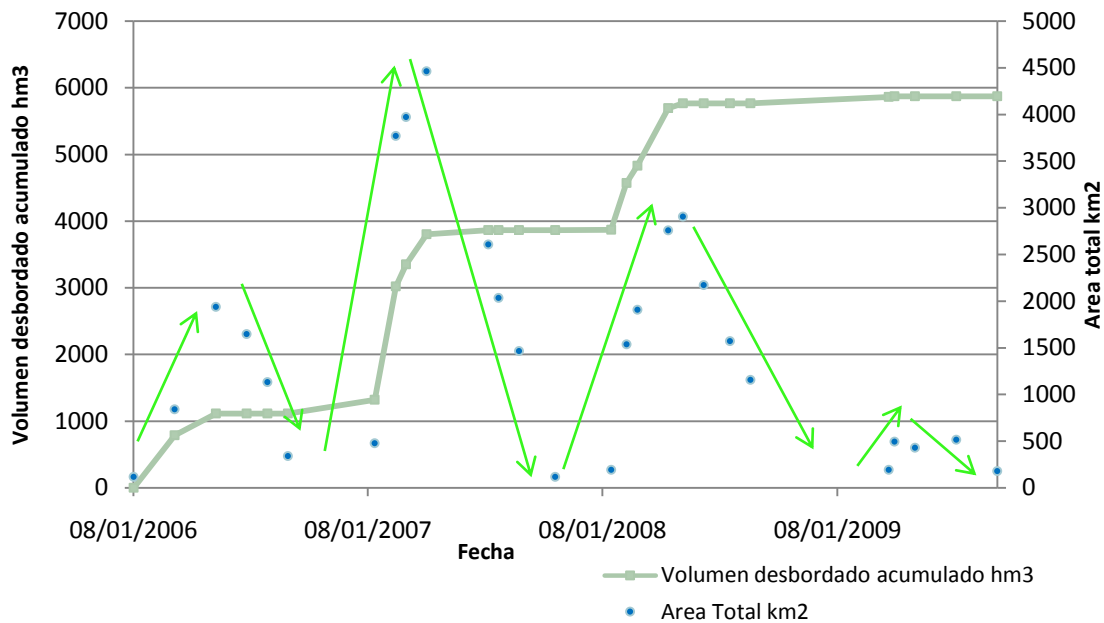
Se debería actualizar todas las series mencionadas anteriormente hasta la actualidad, ya que de ello depende la posibilidad de continuar con los estudios realizados en el presente informe además de otros estudios importantes que aportan información para una mejor comprensión de la Dinámica de los Bañados del río Dulce y la Laguna Mar Chiquita.

## 5.2. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE DESBORDE

- **CONCLUSIONES**

Este estudio permitió describir en aspectos generales la evolución de los Bañados del río Dulce en el tiempo.

Pudieron ser observadas características cíclicas que presenta el sistema en estudio a través de la observación de la siguiente figura, la cual muestra la serie de volúmenes desbordados acumulados en el tiempo y las áreas totales de los bañados.



En los meses de enero-febrero a abril-mayo la curva tiene pendiente positiva pronunciada, o sea que acumula agua en el bañado, mientras que durante los meses de junio-julio a diciembre-enero, presenta una pendiente menor o nula, correspondiendo a caudales de desborde pequeños o generalmente nulos. Por lo tanto puede decirse que cuando la curva de volúmenes acumulados es marcadamente positiva, los valores de área aumentan, mientras que cuando la curva de volúmenes tiene poca pendiente o es constante, la serie de bañados disminuye, produciendo lo que se denomina *recesión de los bañados*.

Con respecto al Bañado Norte, se llegó a la conclusión de que se activa directamente con el caudal desbordado entre dos fechas. El bañado crece rápidamente si hay desbordes y se reduce rápidamente si los desbordes no son suficientes para mantener el área cubierta. En su recesión el agua fluye hacia el este activando el Bañado Este.



Con respecto al Bañado Este se puede decir que responde a la cantidad de agua desbordada acumulada. Es necesario un mínimo de caudal acumulado para que dicho bañado pueda activarse, dependiendo de esta manera del tamaño del desborde y su velocidad.

Con respecto al Bañado Sur, el mismo responde al volumen desbordado acumulado. Puede considerarse que es activado por caudales que provienen de la diferencia de la capacidad de conducción al norte (Paso de los Oscars) menos la capacidad de conducción al sur (Paso de la Cina). El área de dicho bañado no varía tanto como los Bañados Norte y Este ni tampoco desaparece por completo.

Por último se concluye que en el presente trabajo se obtuvieron resultados similares a los obtenidos en Julien (2010), por lo que debería seguir usándose la misma metodología para los años posteriores al período en estudio.

- **RECOMENDACIONES**

Debe ser extendido el período de estudio analizado en este informe, con lo que se podría ajustar dicho análisis obteniendo conclusiones más significativas.

Debería ser utilizada para el análisis la serie de caudales diarias erogados aguas abajo el dique Los Quiroga, ya que desde la presa de Rio Hondo hasta Los Quiroga se presentan muchas pérdidas que no están siendo contempladas para el cálculo de los volúmenes desbordados con el uso de la serie de caudales de Rio Hondo.

Otra recomendación para este trabajo, sería realizar relevamientos de la batimetría del cauce del río Dulce en los puntos de desborde que muestran las imágenes satelitales, para de esta manera poder conocer la capacidad de conducción máxima del cauce en esas secciones y así calcular con mayor precisión los volúmenes de agua desbordados.

### **5.3. TRATAMIENTO DE DATOS LIMNIMÉTRICOS**

- **CONCLUSIONES**

Actualmente se cuenta con dos secciones en el río Dulce en las cuales se encuentran instalados limnímetros automáticos en funcionamiento. Una de ellas es Paso de la Cina, la cual tiene dos estaciones de medición, una en el centro de la sección perteneciente al Laboratorio de Hidráulica y otra en el costado este perteneciente a la Subsecretaría de Recursos Hídricos.

La segunda sección se encuentra en Paso de los Oscars, la cual cuenta con una estación de medición en el centro de la sección.

De las series horarias de niveles del río Dulce adquiridas en secciones citadas anteriormente, solo pudo trabajarse sobre la obtenida del limnómetro nuevo ubicado en la margen Este de la sección de Paso de la Cina, debido a que las otras presentaban errores en la medición.

Dicha serie fue referenciada a una cota de referencia estipulada de 4 metros, a la cual se le resto 0,80 metros (distancia desde el pelo de agua al borde superior del tablero del puente). Con esto se transformó la serie de niveles en una serie de cotas de referencia. El objetivo de la ejecución de esta nueva serie de cotas referenciadas, es poder unir todas las demás series de niveles obtenidas anteriormente y las que se obtengan en el futuro, de cualquiera de los dos limnómetros pertenecientes a esta estación, ya que cuando se realizan las campañas, generalmente se modifica el cero de referencia del aparato y las series que arrojan quedan descolgadas. Para lograr lo establecido anteriormente, **debe tenerse presente que cuando se realice una campaña y se mueva el limnómetro por cualquier causa, con el consecuente movimiento del “cero del aparato”, se torne indispensable la medición de la distancia desde el pelo de agua al borde superior del tablero del puente.** Para hacer más fácil esta labor y para que cualquier persona se asegure de tomar esta distancia y a su vez lo haga correctamente, se diseñó una planilla con un croquis que solo debe ser completada.

- **RECOMENDACIONES**

Realizar campañas periódicas de monitoreo a las secciones de Paso de la Cina y Paso de los Oscars con el fin de mantener en buen estado los limnómetros instalados, ya que la pérdida de mediciones no logradas por motivos eventuales como obstrucción de la boya, desprendimiento del contrapeso o quema del fusible, es una pérdida de material invaluable e irrecuperable cuando se trata de la mejora y actualización del estudio de las secciones en cuestión y del complejo sistema del que forman parte.

## **5.4. CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA COTA - CAUDAL**

- **CONCLUSIONES PARA LA SECCIÓN DE PASO DE LA CINA**

Fue obtenida una curva cota - caudal para la sección de Paso de la Cina a través de la serie de cotas de referencia y seis caudales aforados en la sección. Dicha curva ajusta con la siguiente fórmula:

$$Q = 10,92 H^{1,669}$$

La misma se obtuvo mediante un ajuste estadístico de los valores a través de ecuaciones matemáticas (con fundamento hidráulico) del tipo:

$$Q = \alpha (H - HQ0)^\beta = \alpha \Delta H^\beta$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes de calibración, H es el nivel o altura de superficie libre respecto a un nivel de referencia y HQ0 es un parámetro que representa la altura de superficie libre cuando no hay escurrimiento.

Dicha curva debe ser utilizada únicamente para representar condiciones de flujo que se encuentren en el rango de caudales registrados, para el presente caso dicho rango de caudales se encuentra entre 21,20 m<sup>3</sup>/seg y 44,33 m<sup>3</sup>/seg. Extrapolarlas a condiciones que no se encuentren en ese rango puede conducir a errores importantes.

A partir de los registros de niveles obtenidos en la sección de Paso de la Cina sobre el río Dulce y mediante la curva cota-caudal se determinó la serie de caudales diarios de dicha sección, en donde fueron agregados los caudales obtenidos a partir de la serie de niveles utilizada en Navarro Ramos 2010. Se presenta un gran período desde 2011 a 2013 sin información, debido a que la serie de niveles de ese período es errónea.

- **CONCLUSIONES PARA LA SECCIÓN DE PASO DE LOS OSCARES**

Debido a que no se contó con el relevamiento de una serie de niveles adecuada (sin errores) no se ha podido establecer la actualización de la curva H-Q para dicha sección.

- **RECOMENDACIONES**

Actualizar la serie de caudales aforados, realizando campañas de aforo en las secciones de estudio, cubriendo periodos de bajo, alto y medio caudal, para así tener un espectro de variación de caudal más amplio y poder obtener un mejor ajuste de la ecuación cota-caudal, la cual nos permite obtener los caudales a partir de los datos registrados por los limnímetros de dichas secciones con un menor error. Si los caudales son aforados con el ADCP, estaríamos agregando puntos con un elevado nivel de confiabilidad.

## **5.5. CALCULO DEL CAUDAL UTILIZANDO LA FÓRMULA DE MANNING**

- **CONCLUSIONES**

En primer lugar, cabe aclarar que el cálculo usando la ecuación de Manning fue un ejercicio académico, ya que actualmente se dispone de métodos experimentales que mejoran la determinación del caudal.

Se pudo determinar, para la sección de Paso de los Oscares, un valor característico del coeficiente de rugosidad de Manning igual a  $n = 0.0335$ . Calculando los caudales con el uso de la fórmula de Manning con  $n = 0.0335$ , se obtienen valores que presentan errores relativos con respecto a caudales reales aforados, menores al 20 %.

No pudo llegarse a una conclusión similar en Paso de la Cina ya que los valores del  $n$  de Manning arrojaban mucha variación. La causa principal de este hecho, puede tener origen en el valor que se le confiere a la pendiente debido a una curva de remanso que se presenta en la sección, ya que la ecuación de Manning es muy sensible a dicho parámetro.

- **RECOMENDACIONES**

Realizar más aforos en la sección de Paso de los Oscares con el fin de realizar una aproximación más confiable del valor establecido para el  $n$  de Manning.

Reubicar la sección de aforo de Paso de la Cina con el fin de poder cumplir en mayor medida con las condiciones necesarias para poder ser aplicada la fórmula de Manning.

# Capítulo 6

## BIBLIOGRAFÍA

---

Bucher, E. Bañados del Río Dulce y Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. 2006. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, Argentina.

CFI. Comisión del Río Dulce, 1965. Proyecto del Río Dulce. Informe preliminar para el Banco Interamericano de desarrollo. Tomo I.

Díaz, E. (2013). Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en el Centro y Norte de la República Argentina. Trabajo Final de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

ESRI, (2004). Manual de Usuario del Programa ENVI 4.3. Environmental System Research. Institute. Redlands. California, Estados Unidos. Pp. 750.

FAO (septiembre 1998). Revista de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - Departamento de Agricultura y Protección al Consumidor.

Hillman, G. (1999) Análisis y simulación hidrológica del sistema Laguna de Mar Chiquita. Trabajo Final de Grado en la Carrera de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 345.

Hillman, G., (2003). Análisis y simulación hidrológica del sistema Laguna de Mar Chiquita. Trabajo Final de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 160.

Jones, N. «South Aral Sea 'gone in 15 years'». newscientist.com.

LH-UNC (2011). Estudio de la Cota Máxima de Inundación en la Zona Sur Sur-Oeste de la Laguna Mar Chiquita.

Mery, Julien (2010). Dinámica de los Bañados del Río Dulce: caudales erogados, volúmenes desbordados y área cubierta. Proyecto Final de Carrera de la Ingeniería en Energía y Medio Ambiente del INSA Lyon, realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Pagot, M. (2003) Análisis y simulación hidrológica del sistema Bañados del Río Dulce. Trabajo Final de Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 192.

Piovano, E. L., Damatto Moreira, S., Ariztegui, D. (2002). Recent environmental changes in Laguna Mar Chiquita (central Argentina): a sedimentary model for a highly variable saline lake. *Sedimentology* 49, 1371–1384.

Plencovich G. (2011). Simulación hidrológica de los humedales de Mar Chiquita con apoyo satelital. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos Hídricos. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Córdoba, Argentina.

Pozzi C. (2006). “Simulación hidrodinámica y monitoreo del Sistema Mar Chiquita (Mar de Ansenúza), Córdoba, Argentina”. Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención en Recursos Hídricos, F.C.E.F. y N., UNC, Córdoba., Argentina.

Pozzi, C., Plencovich, G., Hillman, G., Pagot, M., Rodríguez, A., Caamaño Nelli, G., Michelutti, P., Salio, P. (2005). Monitoreo Hidroambiental de la Laguna Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. Aplicación al Diseño de las Defensas Costeras de Miramar. XX Congreso Nacional de Agua y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur.

SSRRHH (2007). Estudio Hidrológico – Ambiental del Sistema Mar Chiquita - Bañados y tramo inferior del Río Dulce.

SSRRHH (2012). Informe final de la Comisión de Evaluación del Impacto de las nubes de polvo y sal generadas en el área de Mar Chiquita.

Torres, R. y P. Michelutti. 2005. Reserva de Uso Múltiple Bañados del Río Dulce y Laguna Mar Chiquita.

Vargas, Constanza (2014). Análisis de la Dinámica Hídrica Espacial de la Laguna Mar Chiquita.

Díaz Lozada, José Manuel (2014). "Cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en el sistema fluvial del río Carcarañá". Tesis de Maestría. Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención en Recursos Hídricos, F.C.E.F. y N., UNC, Córdoba., Argentina.

Navarro Ramos, Silvia Elisa (2010). "Situación actual en el río Dulce: evaluación de la cantidad y calidad del agua".