



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

ESTUDIO DE SEDIMENTACIÓN EN EL EMBALSE RAPEL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MATÍAS HERNÁN LECAROS SÁNCHEZ

PROFESOR GUÍA:

JAVIER GONZÁLEZ SANDOVAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

ARTURO JORQUERA ACUÑA

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2011

“ESTUDIO DE SEDIMENTACIÓN EN EL EMBALSE RAPEL”

Debido a su antigüedad el embalse Rapel ofrece una oportunidad única de ver el estado de avance del depósito de sedimentos en un embalse. Mediante la realización de mediciones de batimetría por parte de ENDESA y este estudio se es capaz de caracterizar la ubicación y estimar el volumen aproximado de sedimento acumulado en el embalse desde el término del llenado en 1971 hasta 39 años después. Además se analizan dos maneras de estimar el aporte de sedimentos afluentes al embalse, mediante un modelo numérico (MOSSEM) y la utilización de dos fórmulas empíricas.

Es posible ver mediante las mediciones que se desarrolla un delta de sedimentos que abarca desde la junta de los ríos Cachapoal y Tinguirirca hasta el sector de Punta Verde. Este delta ha ido avanzado en el tiempo en extensión, afectando el volumen de regulación del embalse. Es posible suponer que en el delta se concentra la mayor parte del sedimento grueso que ha ingresado al embalse, mientras que los sedimentos finos serían transportados hasta el muro, donde existe un importante aumento de la altura de embanque desde la operación hasta la fecha. Sin embargo es necesario corroborar esta hipótesis extrayendo muestras del lecho a lo largo del embalse.

En el trabajo se analiza el uso de un modelo numérico (MOSSEM) para simular el avance del delta. Para una correcta modelación del embalse es necesario realizar consideraciones que permitan representar la geometría y características propias del embalse Rapel, en especial lo que concierne a la condición de borde de aguas arriba.

Utilizando los datos recopilados de caudales y geometría aguas arriba del embalse se realiza una estimación del gasto sólido de fondo para los ríos Cachapoal y Tinguiririca mediante las relaciones de Meyer Peter & Müller y Wilcock & Crowe. Existe una importante variabilidad en los resultados obtenidos para distintas secciones en un mismo río y según la relación de gasto sólido utilizada. Es necesario comprender los fenómenos involucrados para elegir de manera correcta las secciones representativas del río que entreguen la mejor aproximación del gasto sólido que potencialmente puede entrar al embalse. La relación de Meyer Peter & Müller es la que se aproxima de mejor manera al volumen de sedimentos medidos en el embalse, sin embargo no se recomienda su aplicación por no representar la física involucrada en el transporte de sedimentos en ríos de granulometría extendida.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1. Motivación del estudio.....	1
1.2. Descripción problema de sedimentación en embalses.....	1
1.3. Herramientas de análisis	3
1.4. Datos de terreno: Embalse Rapel.....	4
1.5. Propósito del estudio.....	4
2. Recopilación de antecedentes	5
2.1. Descripción general de la zona	5
2.2. Batimetría.....	6
2.2.1. Batimetría de 1968	7
2.2.2. Batimetría de 2010	10
2.3. Hidrografía.....	12
2.3.1. Río Cachapoal	12
2.3.2. Río Tinguiririca.....	13
2.3.3. Junta de los ríos Cachapoal y Tinguiririca	15
2.4. Hidrología	16
2.4.1. Caracterización de las estaciones fluviométricas	16
2.4.2. Curvas de variación estacional	17
2.4.3. Caudales líquidos y gasto sólido en suspensión	19
2.5. Régimen sedimentológico.....	20
2.6. Relación entre caudal (Q) y gasto sólido en suspensión (Qs).....	23
2.6.1. Serie de gasto sólido diario en suspensión	27
2.7. Cotas de operación.....	28
2.8. Hidrodinámica	28
3. Campaña de terreno.....	29
3.1. Objetivo	29
3.2. Descripción de las actividades	29
3.3. Descripción y análisis de datos obtenidos	32
3.3.1. Descripción de zonas de interés	34

3.3.2.	Descripción Zona A	35
3.3.3.	Descripción Zona B.....	38
3.4.	Comparación de batimetría 1968 y 2010.....	39
4.	Análisis del depósito de sedimentos en el embalse Rapel	42
4.1.	Volumen de depósito de sedimentos al año 2010.....	43
4.1.1.	Antecedentes previos.....	43
4.1.2.	Estimación del depósito al año 2010.....	43
5.	Modelación preliminar del embalse Rapel a través de MOSSEM	45
5.1.	Descripción de MOSSEM	45
5.1.	Modelo conceptual del embalse.....	45
5.2.	Simulaciones	46
5.3.	Resultados de la simulación.....	48
6.	Estimación del gasto sólido de fondo afluente al embalse	50
6.1.	Cálculo del gasto sólido de fondo utilizando la relación de Meyer Peter & Müller.....	53
6.1.1.	Caso Río Cachapoal	54
6.1.2.	Caso Río Tinguiririca.....	58
6.2.	Cálculo del gasto sólido de fondo utilizando la relación de Wilcock & Crowe	60
6.2.1.	Caso Río Cachapoal	62
6.2.2.	Caso Río Tinguiririca.....	64
6.3.	Comparación del embanque medido en terreno y el calculado por fórmulas empíricas	66
6.3.1.	Volumen de sedimento depositado según relación de Meyer Peter & Müller	67
6.3.2.	Volumen de sedimento depositado según relación de Wilcock & Crowe	67
6.3.3.	Comparación con volumen de embanque medido en terreno	67
7.	Conclusiones	69
7.1.	Conclusiones generales.....	69
7.2.	Situación actual de depósito de sedimentos en el embalse Rapel.....	69
7.3.	Cálculo preliminar utilizando un modelo computacional (MOSSEM)	70
7.4.	Estimación del gasto sólido de fondo afluente al embalse	71
7.5.	Comentarios finales	73
	Referencias	74

Anexo I: Perfiles año 1968, ENDESA.....	77
Anexo II: Perfiles año 2010, ENDESA	95
Anexo III: Perfiles ecosonda Bathy	107
Anexo IV: Perfiles transversales utilizados en el capítulo 6	133

1. Introducción

1.1.Motivación del estudio

Históricamente los embalses han sido utilizados como herramientas para la regulación hídrica, producción de energía y riego, entre otros usos. Esto ha permitido identificar cuáles son los principales desafíos al momento de diseñar una nueva obra de este tipo. Dentro de ellos se encuentran las filtraciones, calidad del agua, evacuación de crecidas y acumulación de sedimentos.

La acumulación de sedimentos en un embalse responde usualmente a la alteración de las condiciones hidráulicas. Estos cambios alteran a su vez los equilibrios sedimentológicos actúan sobre las formas en que se transportan los sedimentos en un río: el transporte en suspensión y el arrastre de fondo.

La estimación de las tasas de transporte de sedimentos, el tránsito y la distribución de estos dentro del embalse ha sido un problema recurrente dentro de la ingeniería hidráulica, destacándose por su complejidad y variabilidad en los resultados. La utilización de herramientas computacionales en el último tiempo ha permitido el tratamiento de una mayor cantidad de datos y variables, así como también el análisis de una mayor cantidad de escenarios, para así reducir o acotar el rango de incertidumbre.

Un análisis adecuado del transporte y depósito de los sedimentos permite estimar la pérdida de capacidad de un embalse, de modo que es posible incluir esta variable dentro de los análisis económicos tempranos del proyecto, ya sea para evaluar de forma más certera la vida útil de ellos o bien para programar eventuales labores de limpieza. Para esto se requiere, por un lado, de una herramienta que permita manejar adecuadamente los fenómenos de transporte de sedimentos, y de datos medidos en terreno que permitan calibrar y verificar los resultados obtenidos.

1.2.Descripción problema de sedimentación en embalses

Se define como sedimento fluvial aquellas partículas transportadas por el flujo de un cauce, natural o artificial, que son producto de la erosión de la cuenca. Estos sedimentos son normalmente transportados a lo largo de los cauces bajo una condición de equilibrio entre las condiciones de caudal, morfología y arrastre sólido. Al existir un embalse se rompe dicho equilibrio, produciéndose una depositación aguas arriba de la presa y una degradación del lecho aguas debajo de la estructura. La distribución de los

sedimentos tanto gruesos como finos dentro del embalse responde a fenómenos hidrodinámicos, de transporte y depositación.

Las partículas gruesas, aquellas que según la convención ASTM quedan retenidas por la malla #200, responden tanto a las fuerzas inerciales del flujo como a la fuerza gravitacional, trasladándose esencialmente cerca del fondo y sin alejarse demasiado de este. Al contrario, el sedimento fino por poseer menos masa es transportado en suspensión, abarcando toda la columna de agua.

Cuando un cauce llega a un cuerpo de agua en reposo como es el caso de un embalse, las velocidades de escurrimiento disminuyen y se pierde capacidad de transporte. Las partículas gruesas son las primeras en depositar, dando origen a la formación de un delta a la cola del embalse. Este depósito tiene forma de abanico, un frente abrupto y una pendiente aguas arriba menor a la existente con anterioridad en el cauce. El arrastre de fondo proveniente del cauce hace crecer el delta en ambas direcciones, especialmente durante las crecidas.

En el caso de los sedimentos finos, si la densidad del cauce aportante es mayor que la del cuerpo de agua en reposo debido a una alta carga de sedimento fino, se genera lo que se conoce como una corriente de turbidez. La inmersión se produce en el punto en que las fuerzas gravitacionales superan a las inerciales, y a partir de este punto la corriente de turbidez es capaz de transportar el sedimento fino por el fondo del embalse, pudiéndolo llevar incluso hasta las cercanías del muro. (González, 2006)

La Figura 1.1 muestra un esquema básico de un delta de sedimentos producto de la interacción río – embalse.

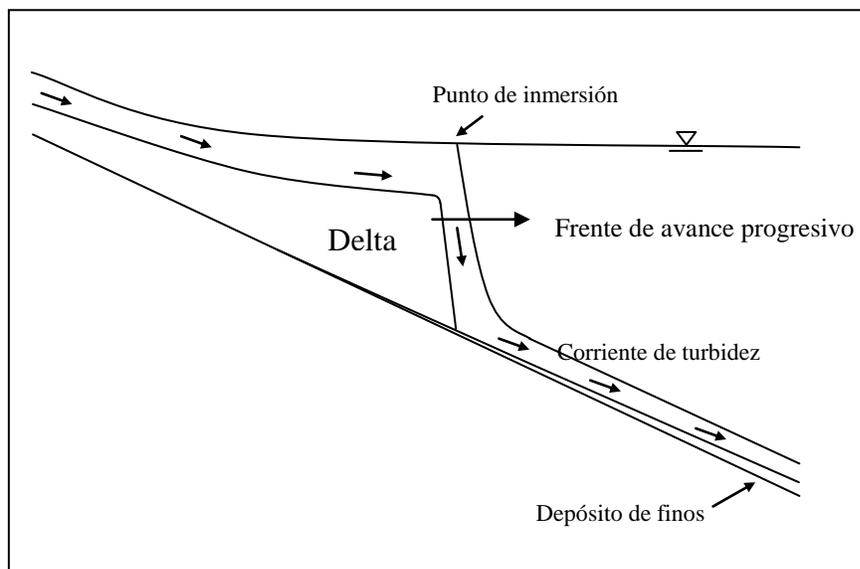


Figura 1.1 Esquema de un delta de sedimentos producto de la llegada de un río a un cuerpo de agua en reposo (González, 2006)

A pesar de que los la granulometría de los lechos de los ríos chilenos posee en su mayoría sedimentos gruesos y de granulometría extendida, es común que el aporte de gasto sólido total anual sea mayoritariamente debido al sedimento fino. Estudios como el de la Central Ralco (Endesa, 1990) estiman el aporte de gasto en suspensión en 86,8% del total. Más al norte, en el embalse Puntilla de Viento en la cuenca del río Aconcagua, se estima un aporte anual de sedimento fino de 87,6% del total (Gajardo, 2003).

1.3.Herramientas de análisis

Entre los métodos para determinar en terreno cuál es el arrastre de fondo de un río, se encuentran las instalaciones del tipo Helley-Smith Sampler (Emmet, 1980), que consiste en un tipo de “trampas” de sedimentos que se instala en el lecho del río, pero en general son aplicables a un espectro limitado de tamaños de granulometría. Esto ha llevado históricamente a buscar fórmulas empíricas que permitan representar el fenómeno. En cambio, el transporte en suspensión es relativamente sencillo medirlo, y se posee estadística histórica en ríos chilenos.

Existen estudios que estiman la producción de una cuenca de acuerdo a su tipo de clima y ubicación (Inbar, 1992) que sirven como referencia para obtener órdenes de magnitud en producción de sedimentos de una cuenca. Este valor sin embargo no puede ser utilizado en un proyecto específico puesto que cada río posee sus propias características hidráulicas que lo hacen único e irrepetible.

Por otro lado, de manera tradicional se han utilizado en Chile diversas relaciones para el cálculo del arrastre de fondo, entre ellas las relaciones de Meyer Peter & Müller, Ackers & White, Parker y Wilcock & Crowe. Por otro lado existen modelos comerciales que incluyen módulos de transporte de sedimentos, que utilizan estas relaciones, tales como EFDC de la Environmental Protection Agency (EPA) y la plataforma MIKE del Danish Hydraulics Institute (DHI). Estos modelos permiten el cálculo de los fenómenos hidrodinámicos acoplados al transporte de sedimentos, por lo que es fundamental comprender sus limitaciones y aplicabilidad a los ríos chilenos, por ejemplo en el cálculo de regímenes subcríticos (Astudillo & Tamburrino, 2005).

En el último tiempo González (2006) desarrolló un modelo de simulación de sedimentación en embalses (MOSSEM) capaz de relacionar las distintas variables que componen el problema, especialmente para las características de los cauces chilenos.

Un modelo como MOSSEM actualiza la manera de realizar los estudios de sedimentación en embalses, incorporando variables antes no consideradas como la corriente de turbidez y la distribución espacial de los sedimentos dentro del embalse. Se realiza una aproximación a una modelación del embalse que permite conocer las limitaciones del modelo y sugerencias para un uso posterior en otros embalses.

1.4.Datos de terreno: Embalse Rapel

El embalse Rapel fue construido para regular las aguas de los ríos Cachapoal, Rapel y Tinguiririca para la producción de hidroelectricidad. Tiene como fecha de inicio de llenado el año 1968, pero demoraría hasta el año 1971 en estar a plena capacidad y comenzar su operación. Debido a su antigüedad presenta problemas asociados al embanque de los sedimentos, gruesos y finos. Es posible ver en la cabecera del embalse zonas completas que solían ser navegables con islas de sedimento acumulado que hacen imposible la navegación. A su vez, la pérdida de capacidad de regulación está estrechamente relacionada con una merma en la producción eléctrica de la Central Rapel.

Este embalse dispone de datos de caudales, niveles en el embalse y gasto sólido en suspensión, además de mediciones batimétricas en zonas estratégicas realizadas antes de la operación y en años recientes. Esto permite conocer aproximadamente el estado actual del embanque del embalse y realizar cálculos mediante formulaciones empíricas de arrastre de sedimentos (Meyer Peter & Müller, Wilcock & Crowe), comparando los resultados teóricos con lo observado en terreno.

1.5.Propósito del estudio

Este estudio pretende:

- Analizar los datos disponibles en el embalse Rapel en el contexto de un estudio sedimentológico
- Complementar y corroborar las mediciones batimétricas con una campaña de terreno
- Analizar y preparar los datos necesarios para el uso de herramientas como MOSSEM en simulaciones numéricas del embalse
- Entregar las recomendaciones para la utilización de un modelo numérico que represente el embalse Rapel
- Comparar los resultados de embanque medidos en terreno con herramientas empíricas de cálculo: métodos de Meyer Peter & Müller y Wilcock & Crowe

2. Recopilación de antecedentes

2.1.Descripción general de la zona

El embalse Rapel se emplaza en el límite de las provincias de Cardenal Caro y Cachapoal, ubicado en el río del mismo nombre, perteneciente a la Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Está formado por la junta del río Rapel y el estero Alhué. El río Rapel a su vez nace en la unión del río Tinguiririca y el río Cachapoal. Estos ríos aportan al menos el 86,8% del caudal afluente total, y controlan más del 74,6% de la cuenca afluente al embalse (Benítez, 1984). El embalse posee tres cubetas principales, Alhué, Cachapoal – Tinguiririca y Muro, esta última comienza a partir de la junta de las dos primeras. Posee aproximadamente 30 km de largo, alcanzando un ancho máximo de 5 km en la cubeta Alhué y se reduce a poco más de 150 m cerca del muro. La superficie inundada total alcanza las 8000 ha.

Actualmente las cotas de fondo del río se desarrollan entre la cota 54.4 ms.n.m. en el sector del muro y 102 ms.n.m. en la junta de los ríos Cachapoal y Tinguiririca.

La Figura 2.1 muestra una imagen satelital del embalse y la ubicación de las cubetas Alhué, Cachapoal-Tinguiririca y Muro.

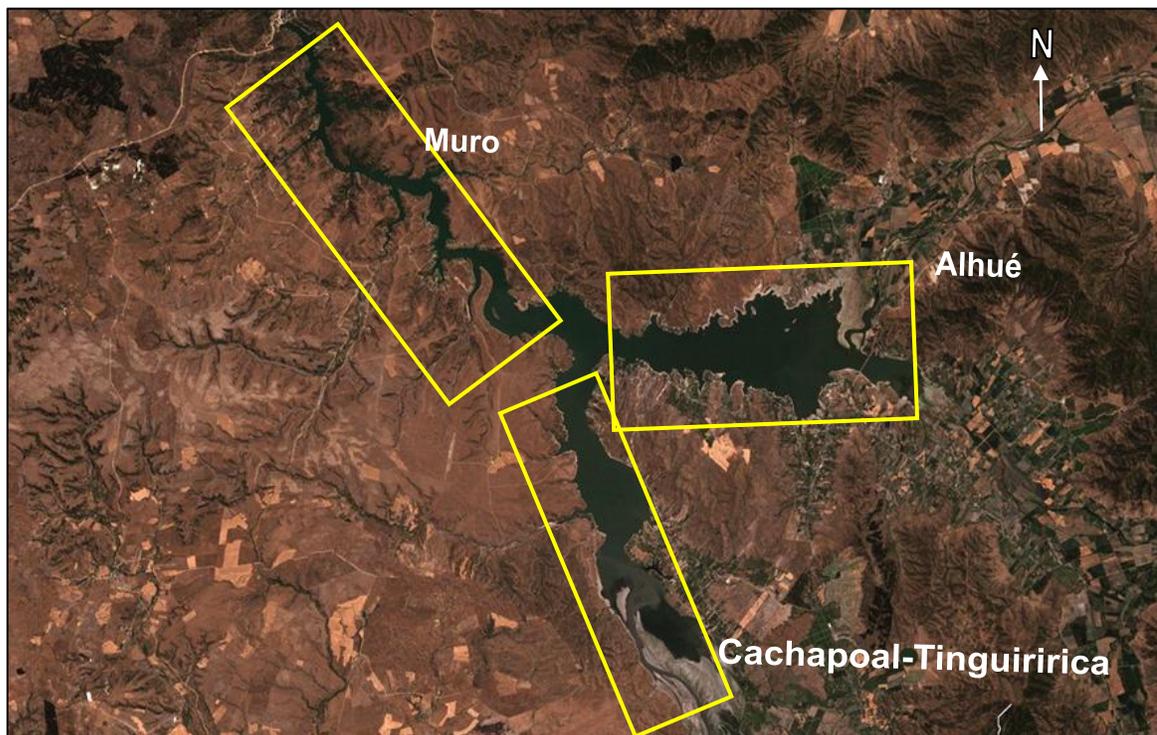


Figura 2.1 Imagen satelital del Embalse Rapel con ubicación de las cubetas

A partir de la junta entre el estero Alhué y el río Rapel, el embalse continúa por 17 km hasta llegar al muro, donde se ubica la Central Hidroeléctrica Rapel, perteneciente a ENDESA S.A..

2.2. Batimetría

La cubeta Cachapoal – Tinguiririca se puede dividir en tres sectores, Las Juntas, Llallauquén y Las Balsas como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2 Zonas en la Cubeta Cachapoal - Tinguiririca

El sector de Las Juntas posee una ribera oriente de pendiente suave, situadas entre las cotas 110 a 120 ms.n.m.. La ribera poniente al contrario es escarpada y supera rápidamente la cota 200 ms.n.m.. En Llallauquén se concentra una gran cantidad de actividad turística en la ribera oriente, por lo que esta zona es especialmente sensible a los cambios de cota del embalse. También posee una mayor pendiente en la ribera poniente, pero es menos escarpada que en la zona de Las Juntas. En Las Balsas la ribera oriente es más escarpada, y posee alturas que superan los 240 m, mientras la ribera poniente posee pendientes más suaves. El embalse posee un ancho variable entre los 600 m y los 2000 m en todas estas zonas. Además, tiene una profundidad promedio de 5 m en Llallauquén y de 20 m en Las Balsas.

El sector de la cubeta Alhué es más corto y ancho que la cubeta Cachapoal – Tinguiririca. Dado que la cuenca que desagua es netamente pluvial y que el área que drena es aproximadamente el 10% del área total (Benítez, 1983), el escurrimiento principal del embalse no ocurre en esta zona (De la Fuente & Niño, 2008).

El embalse Rapel posee una profundidad máxima de aproximadamente 50 metros medidos en el muro desde la cota 105 ms.n.m..

2.2.1. Batimetría de 1968

Para el desarrollo de este estudio se contó con planos de topografía del embalse Rapel previos a su llenado el año 1968, proporcionados por ENDESA. Los planos corresponden al año 1959, y muestran la topografía hasta la cota 110 msn.n.m.. Mediante estos datos se puede obtener perfiles batimétricos transversales de la situación base existente previa al llenado del embalse el año 1968. Estos datos cubren toda la extensión del embalse, desde la zona de Las Juntas hasta el muro de la central Rapel.

La Tabla 2.1 muestra la numeración y ubicación de los perfiles del año 1968 medidos desde el muro (km 0) hacia aguas arriba.

Tabla 2.1 Numeración de los perfiles del año 1968

Perfil	Cota inferior	km	Perfil	Cota inferior	km
PC1	103	35,9	P16	72	15,2
PC2	99	34,7	P17	70	14,1
P1	95	33,4	P18	69	13,0
P2	94	32,3	P19	64	11,5
P3	93	30,5	P20	61	10,1
P4	91	29,8	P21	53	9,0
P5	90	28,9	P22	46	8,1
P6	87	28,1	P23	48	7,1
P7	86	26,6	P24	43	6,2
P8	84	25,1	P25	40	5,2
P9	84	23,9	P26	35	3,9
P10	81	23,1	P27	28	2,9
P11	81	21,8	P28	30	2,0
P12	79	20,7	P29	21	1,0
P13	78	19,5	P30	16	0,0
P14	75	18,4			
P15	72	16,4			

El detalle de cada perfil se incluye en el Anexo I.

A continuación, en la Figura 2.3 se muestra la ubicación de estos perfiles.



Figura 2.3 Ubicación de perfiles del año 1959, válidos para evaluar la situación del Embalse Rapel hacia el año 1968

La Figura 2.4 muestra el perfil longitudinal construido a partir de los perfiles transversales, utilizando la cota de fondo del cauce principal tal como aparece en la Tabla 2.1.

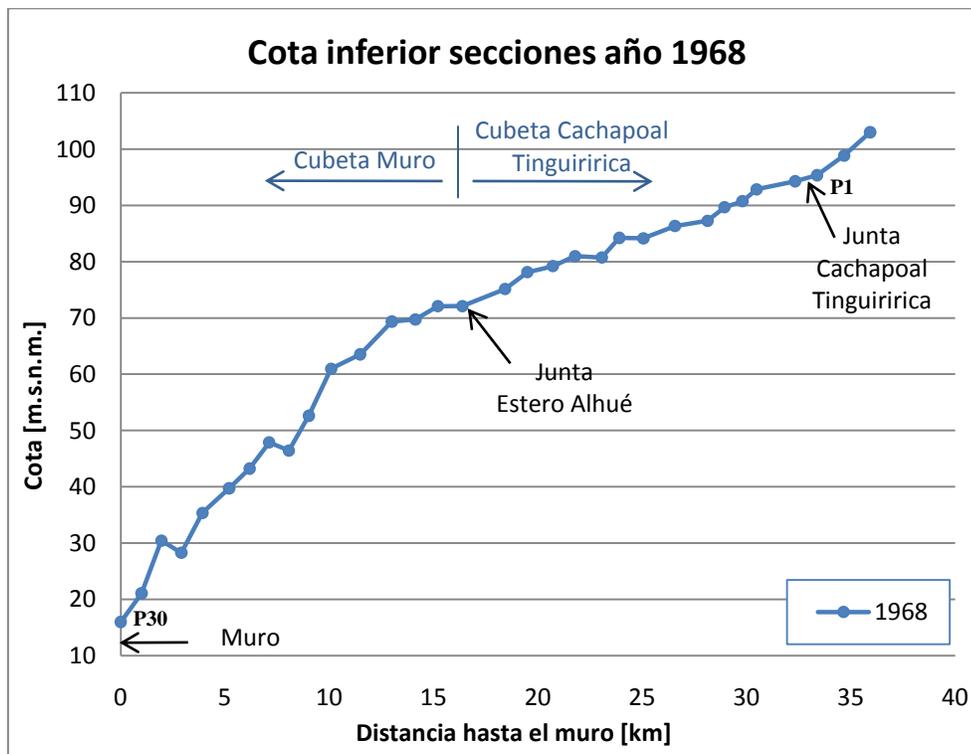


Figura 2.4 Perfil longitudinal de las secciones del año 1968

Se pueden distinguir dos sectores de pendientes distintas, en el primer tramo entre el muro (km 0) y la junta con el estero Alhué (km 15) la pendiente es de aproximadamente 0,4%, tres veces mayor que en el tramo a continuación, desde la junta con el estero Alhué hasta la confluencia de los ríos Tinguiririca y Cachapoal (Junta Cachapoal Tinguiririca).

2.2.2. Batimetría de 2010

En los meses de verano de 2010 ENDESA llevó a cabo un levantamiento batimétrico en el embalse Rapel que forma parte del Informe Técnico titulado “Estudio Embanque Sector Llallauquén”. En este estudio se actualiza la información de batimetría disponible del año 1998.

La información de batimetría actualizada de ENDESA es presentada a continuación en la Tabla 2.2 con la numeración de los perfiles, cota inferior representativa y kilometraje medido desde el muro de la central (km 0) hacia aguas arriba.

Tabla 2.2 Cota inferior de los perfiles medidos por ENDESA

Perfil	Cota inferior	km
P10	102	34.9
P11	102	34.3
P12	100	33.7
P13	102	33.2
P14	101	32.7
P15	101	32.3
P16	100	31.8
P17	101	31.2
P18	100	30.8
P19	100	30.2
P20	100	29.4
P21	99	28.6
P22	101	28.0
P23	101	27.2
P24	98	26.3
P25	100	24.7
P26	98	24.1
P27	96	22.7
P28	93	21.8
P29	85	19.7
P30	82	18.4
P34	81	17.2

La Figura 2.5 muestra lo que correspondería al delta descrito en el Capítulo 1, el que estaría compuesto de manera principal por sedimento grueso. Se distingue el pie del delta, y su parte superior.

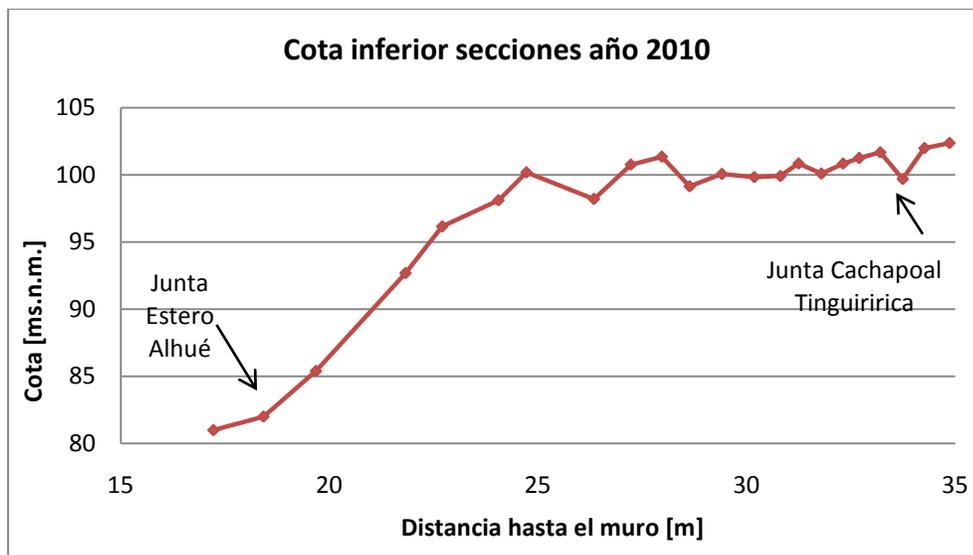


Figura 2.5 Perfil longitudinal de las secciones medidas por ENDESA, verano año 2010

2.3.Hidrografía

Se hace una breve descripción de las principales fuentes de gasto sólido del embalse Rapel, los ríos Cachapoal y Tinguiririca.

2.3.1. Río Cachapoal

Es el principal afluente del embalse Rapel, con una hoya de 6.370 km². Nace en el seno de un ventisquero, entre las cumbres Nevado de Los Piuquenes y el Pico del Barroco. Durante su descenso por la Cordillera de Los Andes se le unen los ríos Las Leñas, Cortaderal, Los Cipreses y el río Pangal. Luego de recibir el aporte de los ríos Coya y Claro pasa junto a la ciudad de Rancagua.

Al entrar a la depresión intermedia el río Cachapoal se transforma de un río encajonado de alta montaña a uno trezado como se aprecia en la Figura 2.6, característica típica de ríos de alto caudal y alto transporte de sedimentos por el fondo (Schumm y Meyer, 1979).



Figura 2.6 Río Cachapoal, 27 km aguas abajo de su paso por la ciudad de Rancagua. Se aprecia el aspecto trezado del río.

Como se puede ver en la Figura 2.7, al llegar al sector de Puente Arqueado 7 km aguas arriba de la junta con el río Tinguiririca, el río posee un comportamiento de carácter de barras alternadas, característicos de

transporte mixto tanto de arrastre de fondo como de sedimento en suspensión, así como de pendientes menores (Schumm y Meyer, 1979).



Figura 2.7 Imagen del río Cachapoal en el sector de Puente Arqueado. Se observa la presencia de barras alternadas.

2.3.2. Río Tinguiririca

Representa el segundo afluente más importante afluente al embalse Rapel. Se forma de la junta de los ríos Azufre y Las Damas. En su descenso a través de la Cordillera de los Andes recibe los aportes de los ríos Clarillo y Claro entre otros.

El río cruza la Ruta 5 Sur aproximadamente 140 km al sur de Santiago, en la comuna de San Fernando. Luego continúa su recorrido en dirección hacia el poniente recibiendo aporte de esteros menores, hasta que en la comuna de Placilla recibe los aportes del Estero Chimbarongo, el que recibe aguas del embalse Convento Viejo y este a su vez de la Bocatoma Río Teno, construida por Endesa para proveer de agua a la central Rapel. Luego de la junta, el río Tinguiririca continúa hasta juntarse con el río Cachapoal y descargar en el Embalse Rapel.

El río Tinguiririca posee al igual que el río Cachapoal una morfología marcada por el caudal y las pendientes propias de los ríos de la zona central de Chile. Luego del confinamiento de la Cordillera de Los

Andes en su nacimiento, posee características similares al río Cachapoal, con un aspecto trenzado de alto arrastre de sedimentos, aunque de una extensión menor que en el caso del río Cachapoal. Esto se puede ver en la Figura 2.8.



Figura 2.8 Imagen del río Tinguiririca mostrando un carácter trenzado, 40 km aguas abajo de la ciudad de San Fernando.

Una vez que el río llega a zonas de menor pendiente cambia su morfología para alternar sectores de meandros, tramos rectos y de barras alternadas. Esto indica una menor capacidad de arrastre si se compara con el río Cachapoal.

En la Figura 2.9 se pueden ver meandros y barras alternadas, propias de un arrastre menor de sedimentos si se compara con el tramo trenzado y de una menor pendiente.



Figura 2.9 Tramo del río Tinguiririca 3 km aguas arriba del embalse Rapel.

2.3.3. Junta de los ríos Cachapoal y Tinguiririca

Los ríos Cachapoal y Tinguiririca se unen en el sector llamado Las Juntas. En este se aprecia una acumulación de sedimentos provocados por el cambio en las condiciones hidráulicas del escurrimiento. En la Figura 2.10 se muestra este sector, que marca el inicio del Embalse Rapel. Se aprecia la formación de barras de sedimentos y una gran cantidad de estos depositados.



Figura 2.10 Sector de Las Juntas. Se indica el sentido del escurrimiento e identifica los ríos.

2.4.Hidrología

Existen datos de dos estaciones hidrométricas: Cachapoal en Puente Arqueado y Tinguiririca en Los Olmos. Estas estaciones tienen estadística de caudales medios diarios entre los años 1968 y 2009, y de gasto sólido en suspensión entre 1968 hasta 1991. Con estos datos se genera una serie de caudales y gasto sólido en suspensión a nivel diario para los años de operación del embalse Rapel (1968 hasta el año 2009). Además se encuentra una relación entre el caudal y gasto sólido en suspensión para cada río.

2.4.1. Caracterización de las estaciones fluviométricas

Las estaciones de Cachapoal en Puente Arqueado y Tinguiririca en Los Olmos pertenecieron a ENDESA durante el período 1968-2001. Desde el año 2002 son controladas por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (DGA).

La Tabla 2.3 muestra las coordenadas de las estaciones fluviométricas y sus características principales.

Tabla 2. 3 Estaciones fluviométricas

Parámetro	Cachapoal en Puente Arqueado	Tinguiririca en Los Olmos
Latitud	34° 17' S	34° 30' S
Longitud	71° 2' O	71° 23' O
Altitud [ms.n.m.]	117	123
Área Cuenca [km ²]	6481	3089

2.4.2. Curvas de variación estacional

Para caracterizar el comportamiento estacional de los ríos Cachapoal y Tinguiririca se dispone de un estudio del año 2004 encargado por la DGA y desarrollado por CADE-IDEPE. De ese informe se extraen las curvas de variación estacional de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, a partir de la información disponible en las estaciones de Puente Arqueado y Los Olmos respectivamente.

La Figura 2.11 muestra la curva de variación estacional para el río Cachapoal.

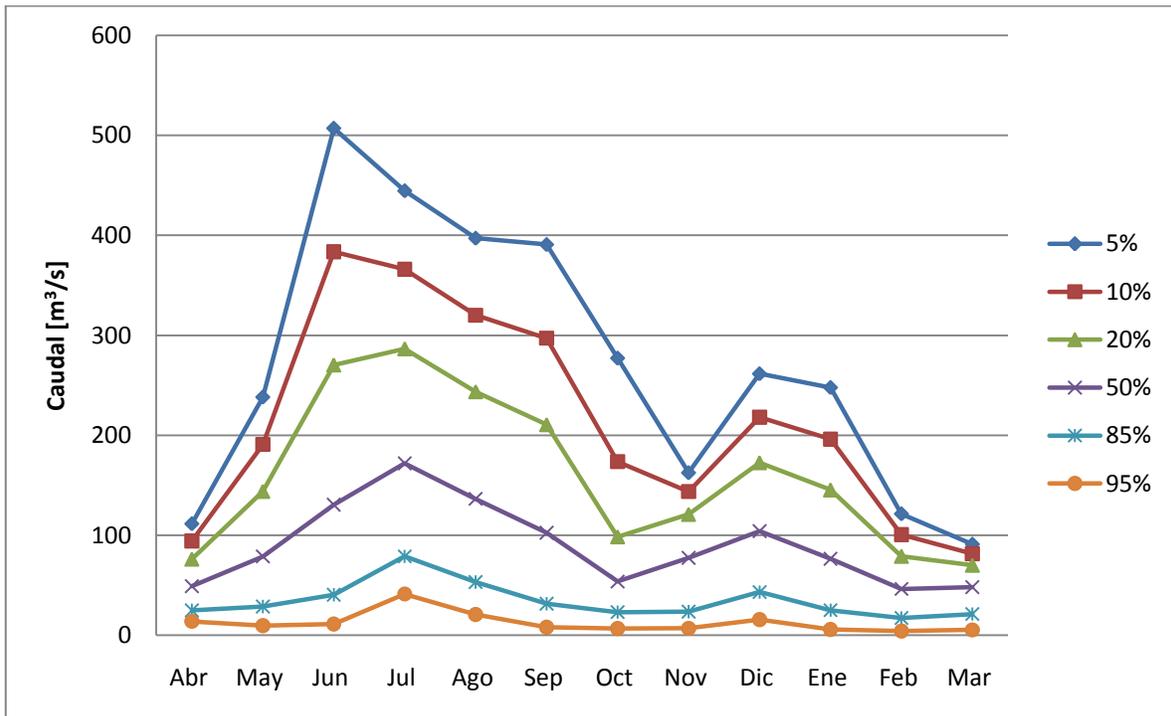


Figura 2.11 Curva de variación estacional del caudal en estación Cachapoal en Puente Arqueado (CADE-IDEPE, 2004)

De la misma manera, la Figura 2.12 muestra la curva de variación estacional para el río Tinguiririca.

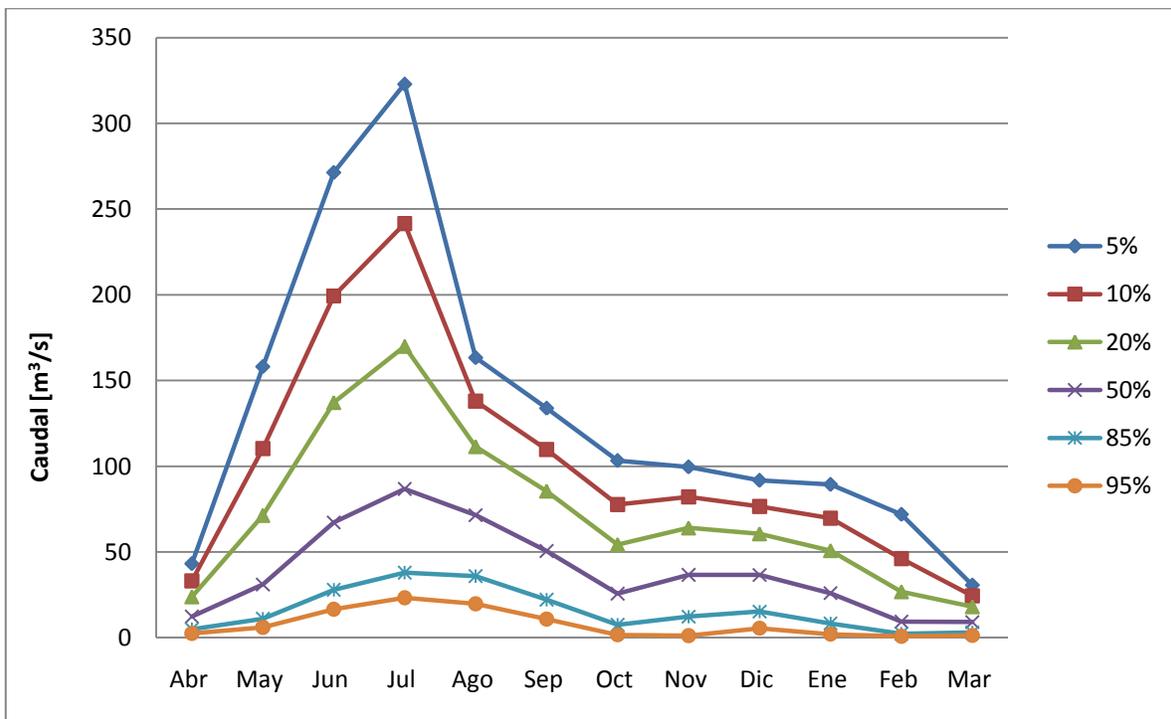


Figura 2.12 Curva de variación estacional del caudal en la estación Tinguiririca en Los Olmos (CADE-IDEPE, 2004)

Se observa que ambos ríos, Cachapoal y Tinguiririca, poseen un componente principal pluvial de crecidas, con una disminución sustancial del caudal durante el período nival. A su vez, existen diferencias entre los sistemas de ambos ríos.

El río Cachapoal en la estación Puente Arqueado posee caudales nivales marcados que se extienden desde octubre hasta marzo. En abril comienza la temporada de lluvias y un aumento marcado de los promedios mensuales de caudal, que son mayores que en la temporada de deshielo.

El río Tinguiririca en Los Olmos posee el mismo comportamiento de crecidas pluviales entre abril y octubre. En los meses de deshielo no se observa un aumento del caudal tan marcado como en caso del Cachapoal, sobre todo para caudales con menor probabilidad de excedencia. De todas maneras para caudales más habituales sí se observa un leve aumento de la magnitud de los caudales durante el período octubre – marzo.

2.4.3. Caudales líquidos y gasto sólido en suspensión

Desde 1968 hasta 2001 la estadística de caudales se encuentra prácticamente completa, solo faltando los meses de enero y febrero en ambas estaciones el año 1970. A partir del año 2002 existe una mayor irregularidad en los datos, por lo que se procede a rellenar la estadística mediante el método que se describe a continuación.

Primero se calcula el caudal medio mensual de todos los años de los que se posee estadística. Luego se calcula el caudal medio mensual del año que se busca corregir. Se hace una ponderación entre el valor del caudal medio mensual del año por corregir con caudal medio mensual de la estadística, y este valor se multiplica por el caudal medio mensual de la estadística, y se reemplaza este valor en el mes del año que se busca corregir. Al hacer esto se produce un cambio en el caudal medio mensual del año por corregir, por lo que también cambia el valor corregido. Se itera hasta converger a un valor final de corrección. El valor del caudal medio mensual se reemplaza en aquellos datos diarios faltantes de manera directa.

En caso de que solo falte un solo dato de caudal medio diario se promedia los dos datos inmediatamente adyacentes y se utiliza este valor como corrección.

Se completa la estadística de caudales desde el año 1968 hasta el año 2009 para las estaciones de Cachapoal en Puente Arqueado y Tinguiririca en Los Olmos. Entre los datos de relleno no se encuentran datos de crecidas, sino que corresponden en su mayoría a datos del período nival.

Las Figuras 2.13 y 2.14 muestran la serie completa de caudales medios diarios entre 1968 y 2009 para ambas estaciones.

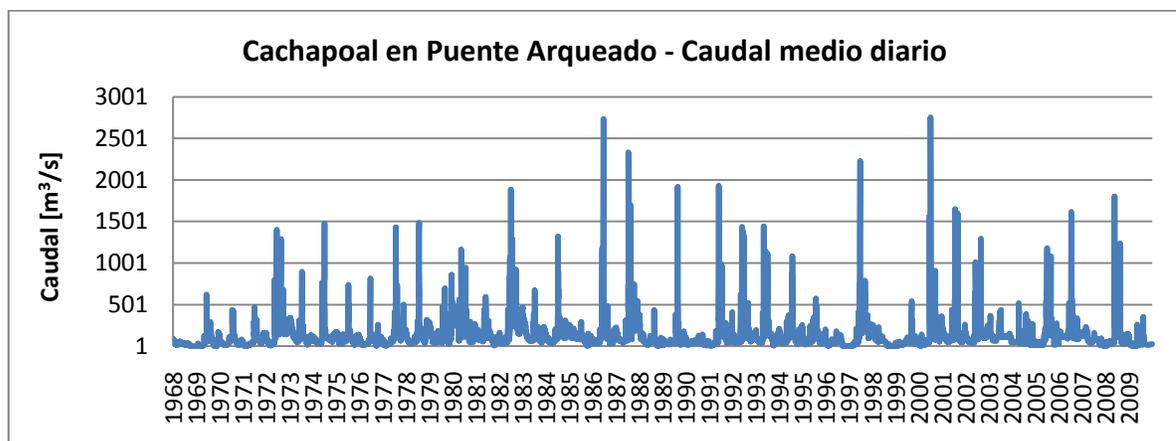


Figura 2.13 Caudal medio diario para la estación Cachapoal en Puente Arqueado

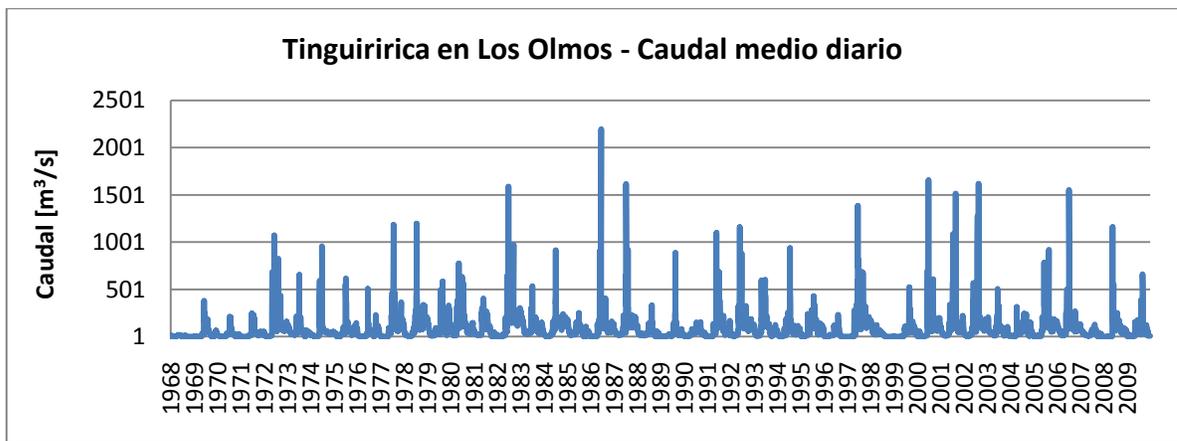


Figura 2.14 Caudal medio diario en la estación de Tinguiririca en Los Olmos

El caudal medio anual de ambos ríos calculado a partir de la estadística rellena se presenta en la Figura 2.15:

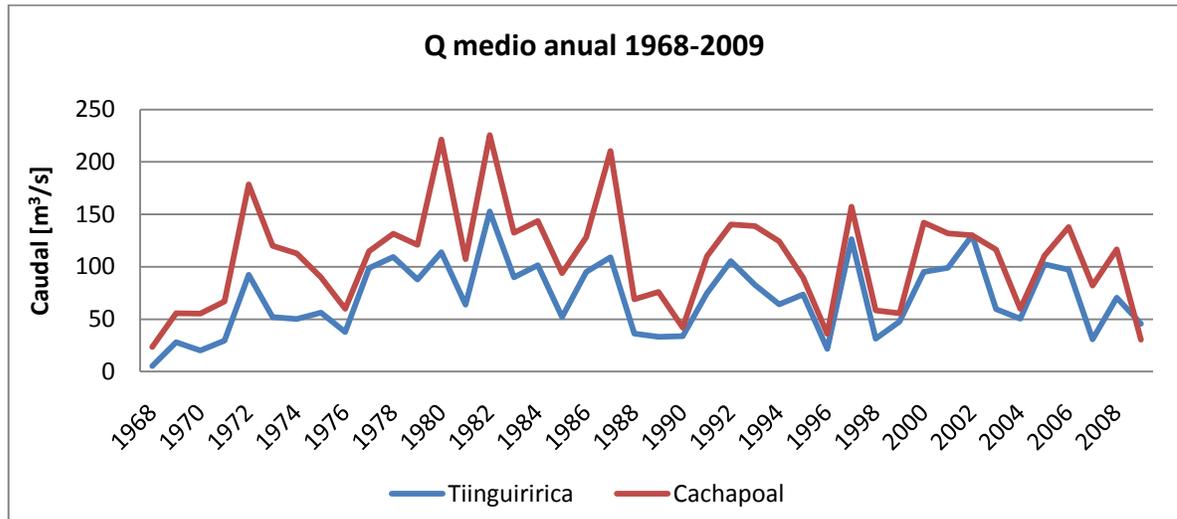


Figura 2.15 Caudal medio anual para el período entre los años 1968 y 2009. Ríos Cachapoal y Tinguiririca en las estaciones de Puente Arqueado y Los Olmos respectivamente

2.5. Régimen sedimentológico

Las estaciones fluviométrica de Tinguiririca en Los Olmos y Cachapoal en Puente Arqueado contienen registro del sedimento en suspensión desde los años 1968 hasta el 1992, mostrando claros aumentos del sedimento arrastrado para las crecidas.

Para encontrar una relación entre el caudal líquido y el gasto sólido en suspensión, es necesario entender el régimen sedimentológico de ambos ríos. Para esto se comparan el caudal líquido y el gasto sólido en

suspensión promedio mensual para dos años distintos, a modo de realizar un análisis cualitativo del fenómeno.

En la Figura 2.16 se muestra para un año cualquiera y a modo de ejemplo, los promedios mensuales de caudal en m^3/s y sedimento en suspensión en ton/día para el río Tinguiririca en la estación fluviométrica de Los Olmos.

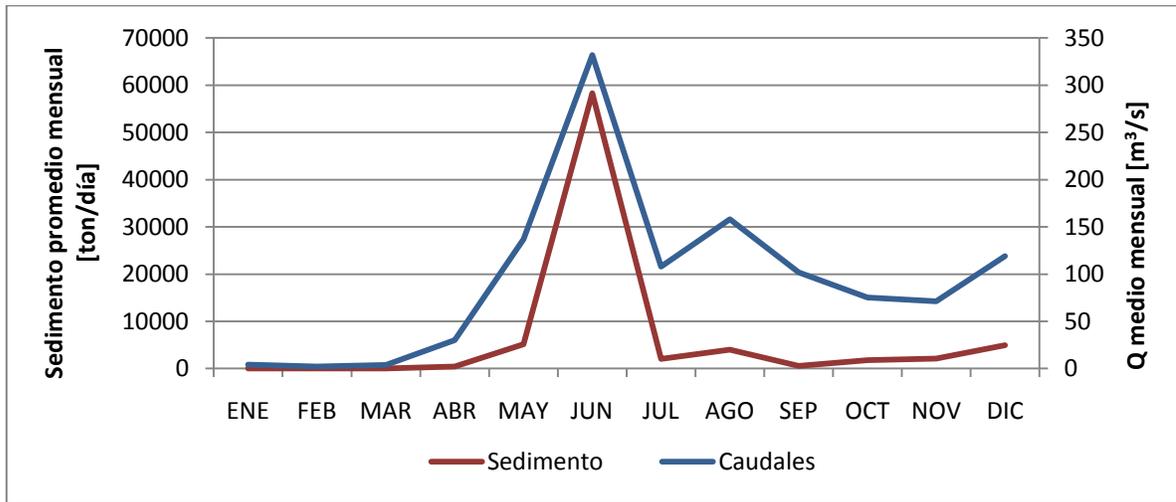


Figura 2.166 Promedio mensual de sedimento en suspensión y caudal, río Tinguiririca año 1986

La Figura 2.17 muestra el mismo tipo de comportamiento para un año menos lluvioso arbitrario (1988)

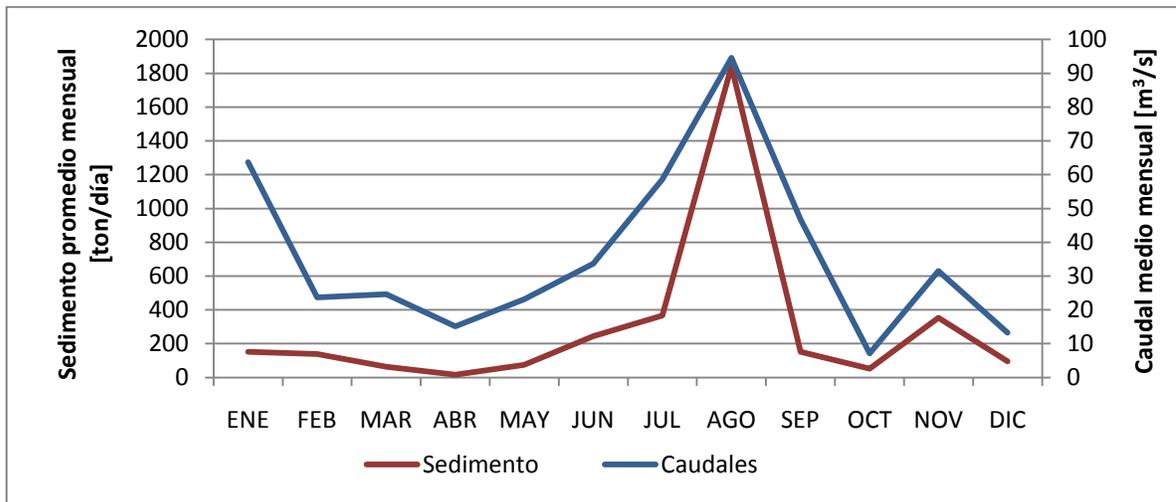


Figura 2.177 Promedio mensual de sedimento en suspensión y caudal, río Tinguiririca año 1988

El promedio de caudales durante los meses pluviales (mayo a octubre) de los años 1986 y 1988 es de 151 m³/s y 44 m³/s respectivamente. A pesar de que la diferencia es de un 300% en caudal medio mensual durante estos meses, la diferencia en el transporte de sedimento peak en suspensión es de más de 30 veces. Suponiendo que el mayor volumen de caudal durante estos meses proviene de lluvias, esto indicaría que no existe una relación lineal entre el caudal medio mensual y el transporte de sedimentos, sino que existen otras variables involucradas, como la intensidad de la lluvia, su ubicación dentro de la cuenca y la disponibilidad de sedimentos. En la misma Figura 2.17 se puede ver que el sedimento transportado es casi nulo en los meses de deshielo.

En el caso del río Cachapoal, en la estación Cachapoal en Puente Arqueado se midió el sedimento en suspensión, entre los períodos 1968 y 1992. A modo de ejemplo, la Figura 2.18 muestra para el año 1986, los promedios mensuales de caudal en m³/s y sedimento en suspensión en ton/día. Se hace el mismo ejercicio para un año menos lluvioso cualquiera (1988) como se muestra en la Figura 2.19:

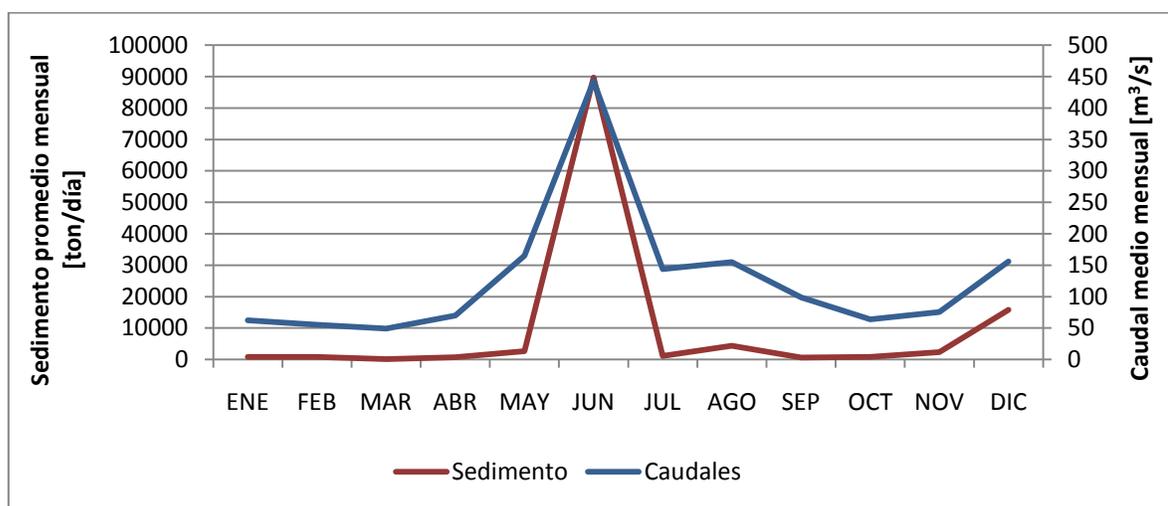


Figura 2.18 Caudales medios mensuales en m³/s y sedimento promedio mensual en ton /día. Río Cachapoal. 1986

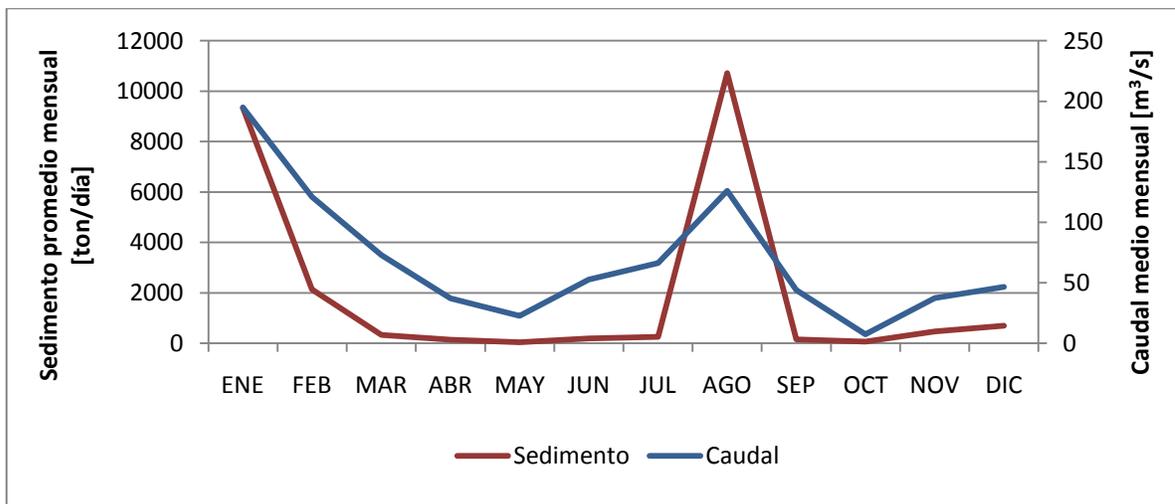


Figura 2.19 Caudales medios mensuales en m³/s y sedimento promedio mensual en ton /día. Río Cachapoal. 1988

Como se observa en la Figura 2.18, para el año 1986 el transporte en suspensión ocurre en forma mayoritaria durante los meses de lluvia y en forma menor durante los meses de deshielo. En la Figura 2.19 se puede ver que para el año 1988 el caudal durante el verano es mayor que el promedio mensual en invierno. A pesar de esto, el máximo de sedimento en suspensión sigue siendo en invierno.

Se observa que la mayor cantidad de sedimento transportado en suspensión ocurre en el período de lluvias, mientras que en los deshielos, a pesar de haber caudales importantes el sedimento disminuye a niveles casi nulos. Esto hace suponer que los eventos de lluvia lavan la cuenca y arrastran partículas en sectores alejados del cauce, llegando a este a través de la escorrentía superficial y derivando en un mayor transporte en suspensión. En otros años el comportamiento es similar, con un transporte mayoritario del sedimento en suspensión durante los meses de invierno.

La elección de los años fue totalmente arbitraria y tiene como objetivo graficar la variabilidad del fenómeno entre dos años distintos.

2.6. Relación entre caudal (Q) y gasto sólido en suspensión (Qs)

A diferencia del arrastre de fondo, la cantidad de sedimento fino transportado en la columna de agua depende en gran medida del tipo de crecida del cauce. Si es una crecida de tipo pluvial, es probable que exista un mayor arrastre de sedimentos desde sectores alejados del cauce principal, comparado con la situación de deshielo, donde existen menos medios para que el material sea transportado desde estos sectores. Por esta razón, para establecer una relación confiable entre Q y Qs es necesario distinguir las crecidas según el período en el que ocurren, pluvial o nival.

La separación de los datos de caudales y sedimentos según régimen permite un análisis más adecuado de la física del problema. De esta manera se analizan 4 conjuntos de datos de Q y Qs:

- Río Tinguiririca-Régimen pluvial
- Río Tinguiririca-Régimen nival
- Río Cachapoal-Régimen pluvial
- Río Cachapoal-Régimen nival

Para el cálculo de estas relaciones se utiliza la estadística disponible entre los años 1968 y 1991 de gasto sólido en suspensión en las estaciones Cachapoal en Puente Arqueado y Tinguiririca en Los Olmos.

Por la amplia dispersión de los datos se opta por un ajuste de tipo potencial al igual que Benítez (1984), de la forma:

$$Q_s = a \cdot Q^b \quad (2.1)$$

Donde a y b son coeficientes que varían según el río y tipo de régimen. En el régimen del río Tinguiririca se identifica dos situaciones, $Q < 150 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q > 150 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Tabla 2.4 muestra los valores de a y b para las situaciones estudiadas.

Tabla 2.4 Valores de las constantes de la relación entre caudal y gasto sólido suspensión

Tinguiririca	Pluvial		Nival
	Q<150 (m ³ /s)	Q>150 (m ³ /s)	
a	1,7849	0,0033	2,3402
b	1,3283	2,6323	1,4931

Cachapoal	Pluvial	Nival
a	0,0626	0,9870
b	2,1557	1,7460

En las Figuras 2.20, 2.21, 2.22 y 2.23 se aprecian los ajustes realizados. Los pares faltantes de Q y Qs se omiten de la estadística.

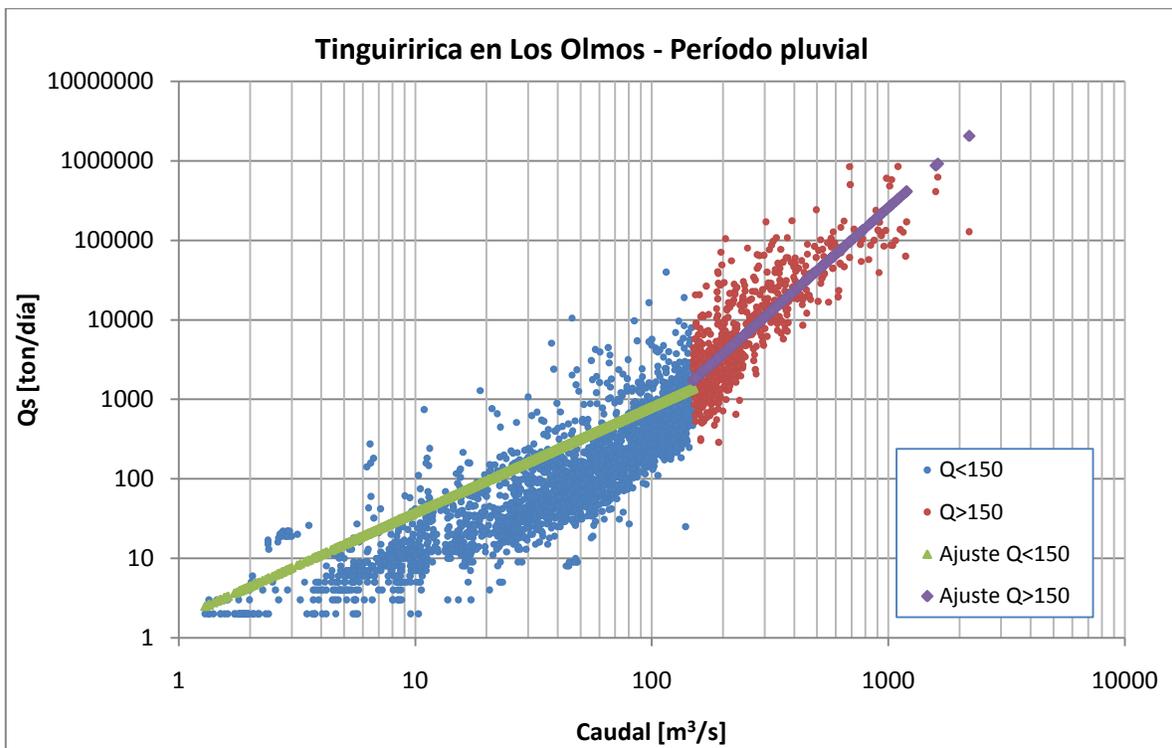


Figura 2.20 Ajuste entre Q y Qs para la estación Tinguiririca en Los Olmos para el período pluvial

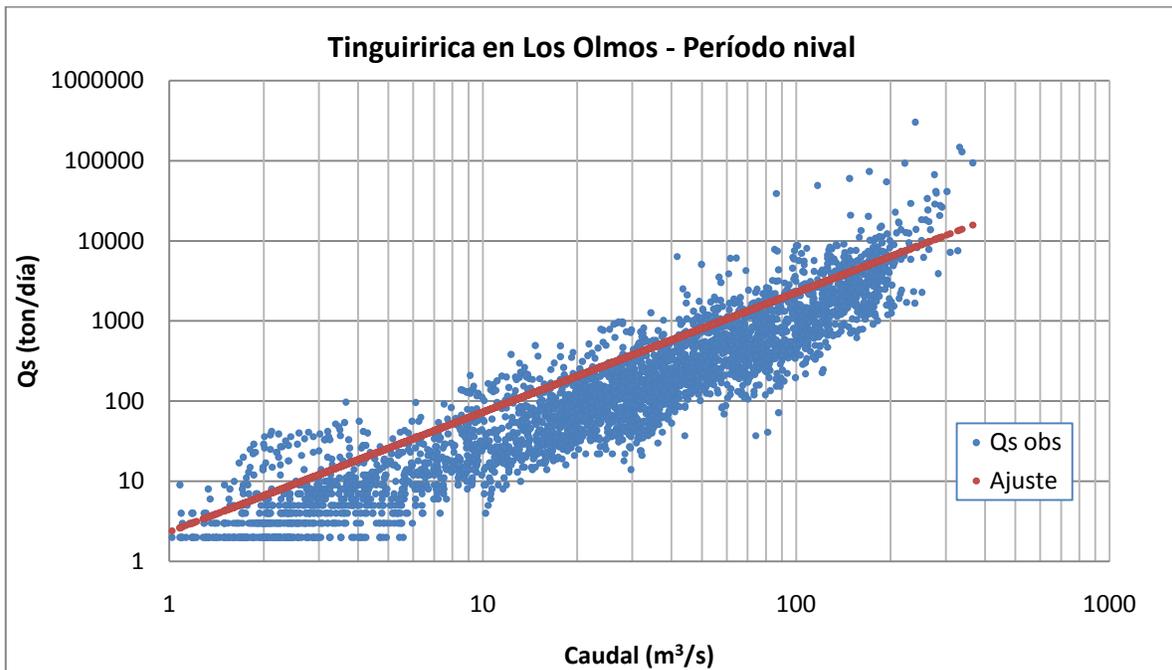


Figura 2.21 Ajuste entre Q y Qs para la estación Tinguiririca en Los Olmos para el período nival

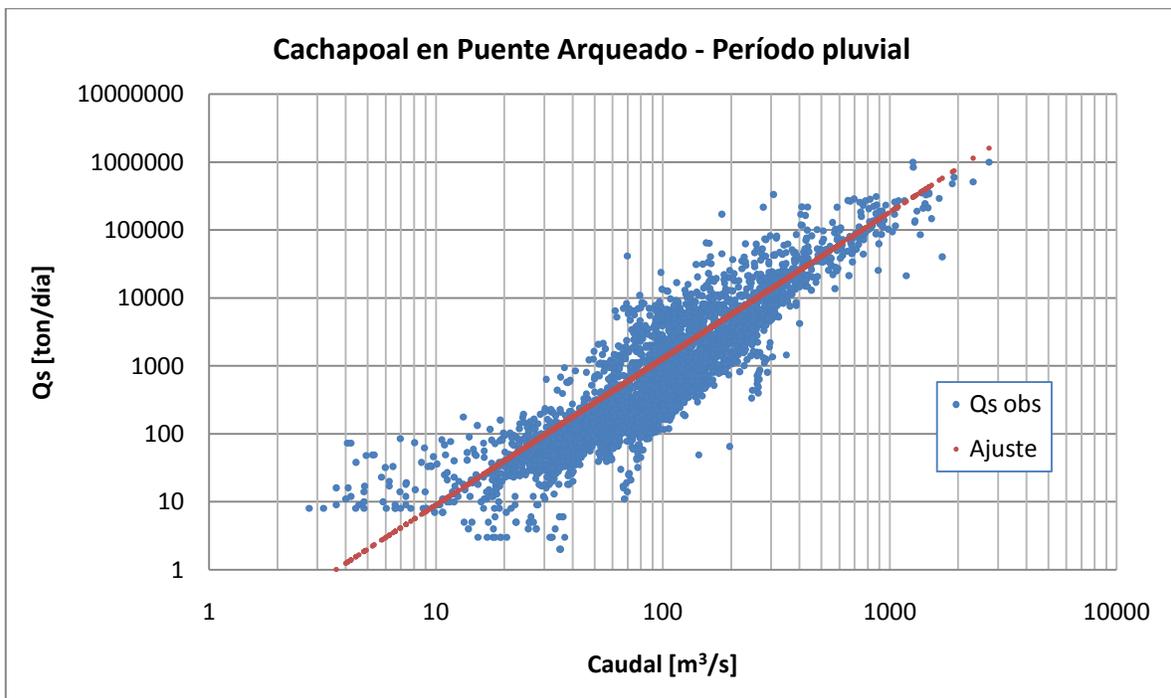


Figura 2.22 Ajuste entre Q y Qs para la estación Cachapal en Puente Arqueado para el período pluvial

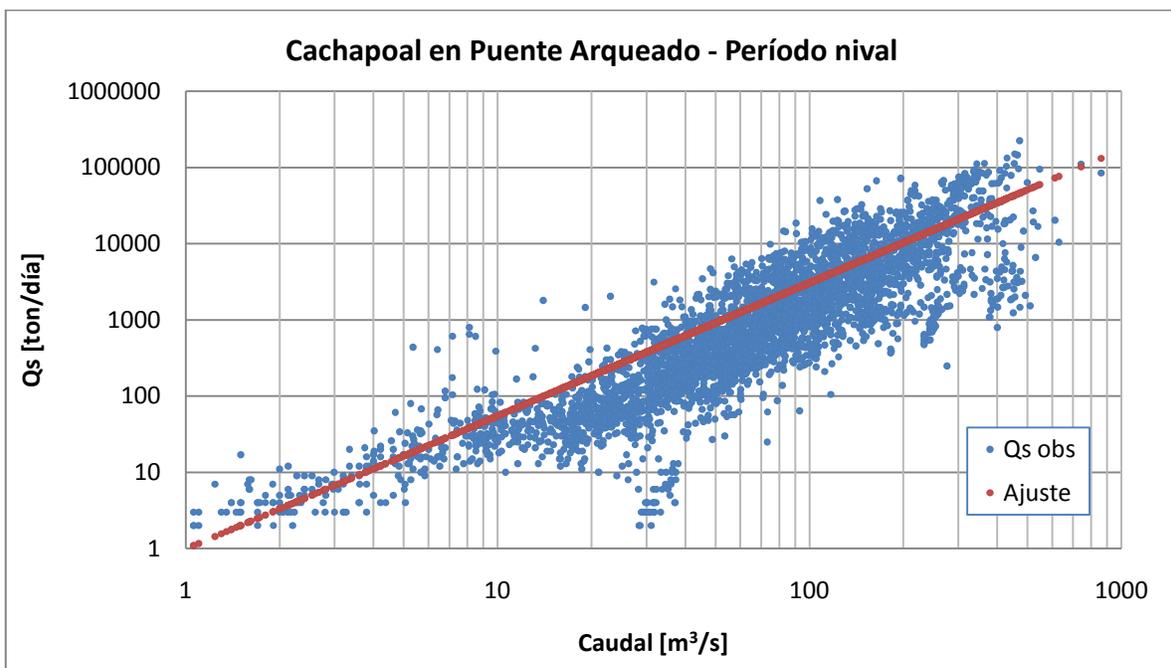


Figura 2.23 Ajuste entre Q y Qs para la estación Cachapal en Puente Arqueado para el período nival

En una primera instancia, estos ajustes se realizan mediante una regresión potencial, aplicando la función de mínimos cuadrados a los logaritmos de los valores. Cuando existen valores con una dispersión de varios órdenes de magnitud, el aplicar la función de mínimos cuadrados a los logaritmos se subvalora aquellos elementos mayores. Debido a esto se ajusta manualmente los valores obtenidos mediante el

método de los mínimos cuadrados. Este ajuste se realiza comparando la sumatoria de los valores de gasto sólido reales a la sumatoria de los valores ajustados. De esta manera el total de los sedimentos aportados en el período del que se posee estadística queda reflejado en la relación encontrada de Q y Q_s .

Con las relaciones entre el caudal y el gasto sólido en suspensión se puede completar la serie de sedimento en suspensión para el período comprendido entre los años 1968 y 2009.

2.6.1. Serie de gasto sólido diario en suspensión

Utilizando las relaciones entre Q y Q_s y la serie de caudales calculada anteriormente, se procede a generar la serie de gasto sólido diario en suspensión para cada estación, como se muestra en las Figuras 2.24 y 2.25.

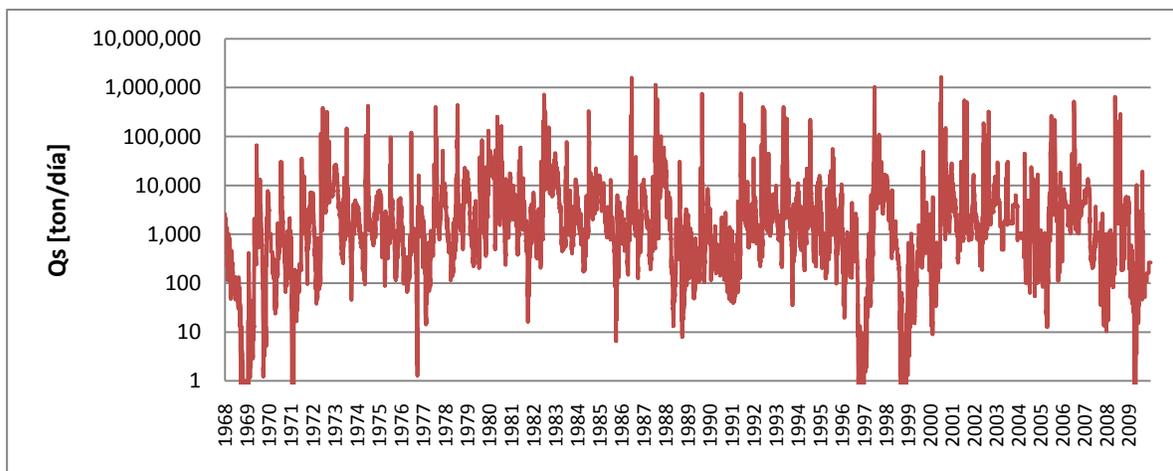


Figura 2.24 Gasto sólido en suspensión para la estación Cachapoal en Puente Arqueado

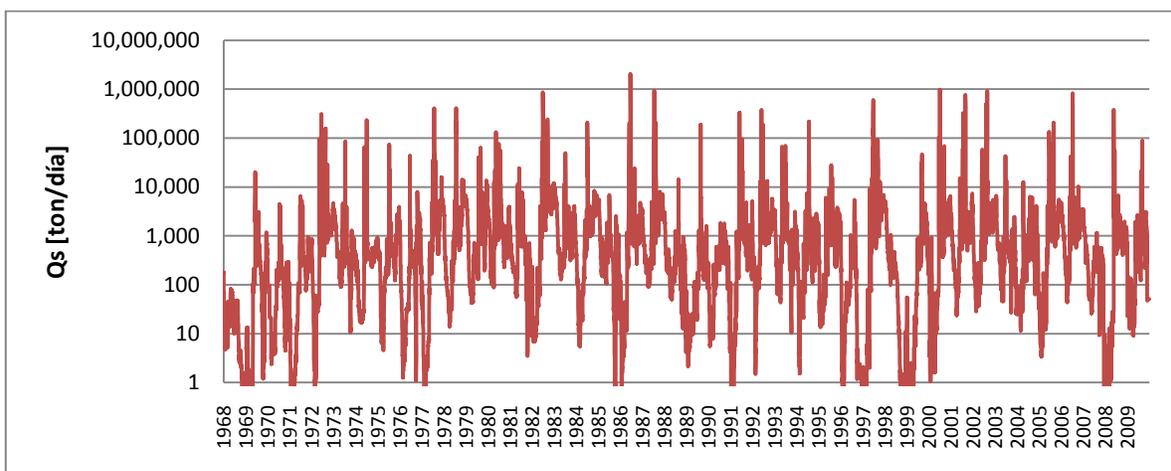


Figura 2.25 Gasto sólido en suspensión para la estación Tinguiririca en Los Olmos

2.7. Cotas de operación

Los niveles de operación en el muro del embalse corresponden históricamente a 105 ms.n.m. como límite superior, y registrándose un mínimo histórico de 97,4 ms.n.m. el año 1976 pero en general se mantiene sobre los 99 ms.n.m. Las variaciones diarias de niveles tienen como máximo los 2,5 metros registrados en 1993. En general las variaciones son menores a un metro durante todo el año, con algunas variaciones esporádicas de 2 metros, pero estas han ocurrido solo 7 veces entre los años 1970 y 2002, y nunca dos veces en un mismo año.

2.8. Hidrodinámica

El escurrimiento del embalse se realiza de manera preferente por las cubetas Cachapoal - Tinguiririca y Muro. Aún en situaciones de crecidas, el flujo que entra a la cubeta Alhué es evacuado al cabo de unas horas (De la Fuente & Niño 2008). La Figura 2.26 muestra los campos de velocidades simuladas en el embalse Rapel bajo condiciones promedio.

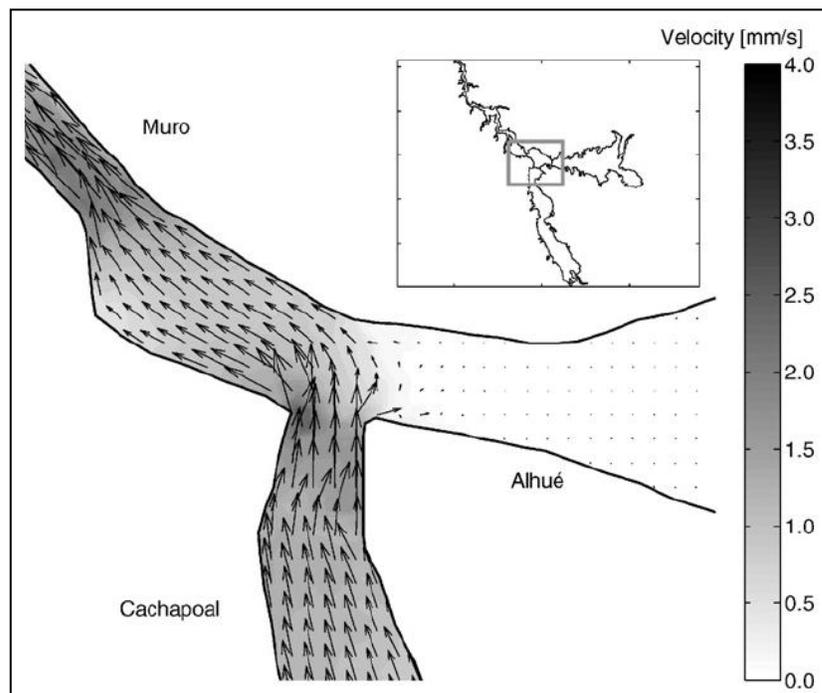


Figura 2.26 Campo de velocidades simulado en la confluencia entre la cubeta Cachapoal – Tinguiririca y la cubeta Alhué bajo condiciones promedio de septiembre. (De la Fuente & Niño, 2008)

La falta de interacción entre estas cubetas indica que el sedimento fino que ingresa a través de los ríos Cachapoal y Tinguiririca es llevado hacia la cubeta Muro y no desviado hacia la cubeta Alhué.

3. Campaña de terreno

3.1. Objetivo

El objetivo principal de la campaña de terreno corresponde a complementar los antecedentes batimétricos disponibles, para obtener una mejor caracterización de la profundidad del lecho del lago y la distribución de los sedimentos acumulados durante el período de operación del embalse. Para esto se utiliza el equipo de ecosonda BATHY 2010 CHRIP (Sub Bottom Profiler and Bathymetric Echo Sounder) propiedad de la Universidad de Chile. Este instrumento emite una señal de ultrasonido y capta su tiempo de retorno para entregar la profundidad del lecho en el punto de medición.

Para una correcta evaluación de la situación de los sedimentos en el embalse es necesario que las mediciones se realicen en todo el largo del lago y no sólo en un sector.

La medición regular del fondo del embalse permitiría establecer tasas de embanque y su cambio en el tiempo.

Esta nueva batimetría se comparará con la batimetría anterior al llenado del embalse y se obtendrán las profundidades de embanque desde el llenado hasta la actualidad.

3.2. Descripción de las actividades

Entre los días 27, 28 y 29 de diciembre de 2010 se llevó a cabo la campaña de terreno en el embalse Rapel en la compañía de Gabriel Vargas Easton, Profesor Asociado del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

La Figura 3.1 muestra la instalación del equipo y a continuación una breve descripción.



Figura 3.1 Equipo de mediciones en terreno

En la Figura 3.1 se observa el equipamiento utilizado en la campaña de terreno en el Embalse Rapel. En esta se puede ver a la ecosonda, identificada con el número 1, instalada bajo el sistema de flotación. La ecosonda posee cuatro parlantes que emiten las ondas de ultrasonido en distintas frecuencias para poder penetrar las subcapas de sedimento. El sistema de flotación mediante un kayak (2) le entrega a la ecosonda la estabilidad necesaria para la toma de datos, mientras la lancha (3) tira del kayak y permite el recorrido del lago. La Figura 3.2 muestra al equipo BATHY mientras es remolcado por la lancha.



Figura 3.2 Sistema de flotación del equipo BATHY

El kayak le otorga al equipo la estabilidad necesaria para una obtención correcta de datos. De otra manera se obtienen lecturas erróneas relacionadas con los movimientos transversales y longitudinales del

instrumento. Esto se corrige mediante la utilización de velocidades bajas, tratando de mantener un eje perpendicular entre el fondo y el instrumento.

A continuación en la Figura 3.3 se muestra el computador que procesa los datos en tiempo real y muestra las mediciones a medida que son obtenidas por la ecosonda.



Figura 3.3 Computador a bordo para lectura en tiempo real

Junto con el dato de profundidad, un GPS conectado al computador entrega los datos de velocidad instantánea y localización, los que son grabados en el archivo final de datos.

La Figura 3.4 muestra el tipo de los datos obtenidos por la ecosonda.

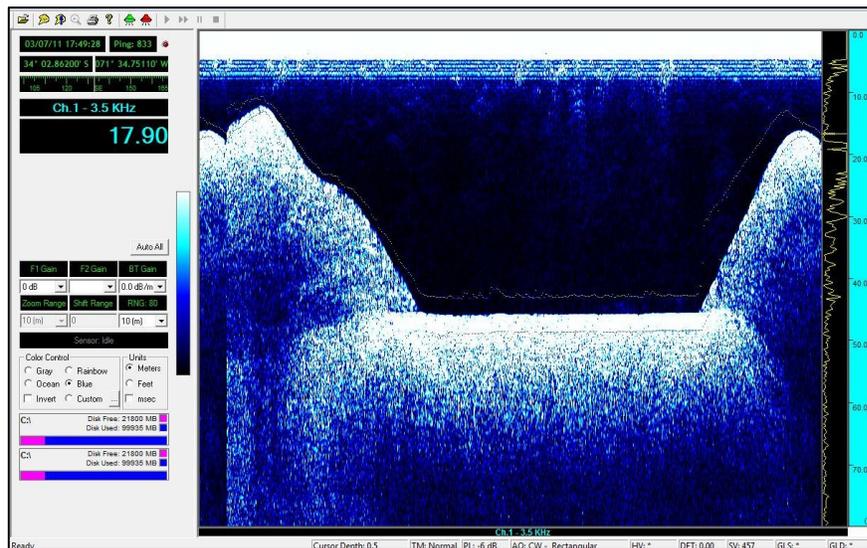


Figura 3.4 Imagen ejemplo de mediciones de equipo BATHY

La Figura 3.4 muestra una imagen que corresponde al archivo de salida del equipo BATHY en un recorrido de manera transversal al sentido del escurrimiento en el lago Rapel cerca del muro. A la derecha de la imagen se aprecia la escala de profundidad, donde 0 es la ubicación del instrumento que es de aproximadamente 1 m bajo la superficie del agua.

En lugares donde el sedimento está estratificado es posible ver la profundidad de estas capas e inferir acerca de su densidad. Sin embargo en las mediciones realizadas en el embalse Rapel no es posible hacer esta distinción, por lo que se deduce que el sedimento no estaría estratificado y poseería una mezcla de limos y arena en su capa superior. La fracción de arena se infiere debido a que la ecosonda no es capaz de penetrar las capas de sedimento y visualizar el lecho rocoso del embalse, lo que según el Profesor Vargas ocurre cuando existe arena en la mezcla de sedimento.

3.3. Descripción y análisis de datos obtenidos

Se realizaron mediciones de profundidad en perfiles tanto transversales como longitudinales del lago, para comparar estos datos con la batimetría existente que se describe en la sección 2.2. En las Figuras 3.5 y 3.6 se detalla la ubicación de estos perfiles.

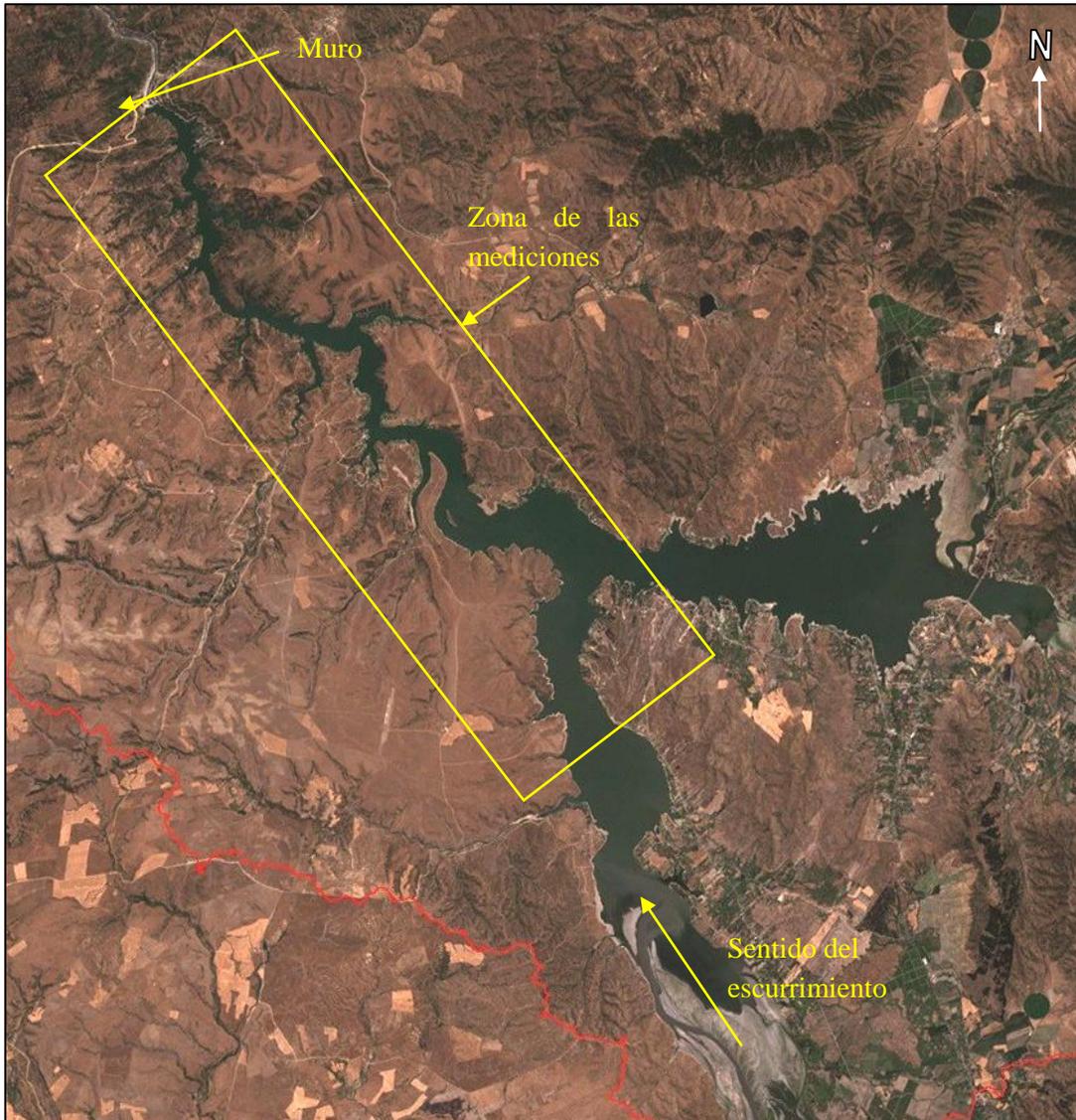


Figura 3.5 Imagen con la zona de mediciones



Figura 3.6 Imagen ampliada de la zona de mediciones, los perfiles están marcadas en amarillo

3.3.1. Descripción de zonas de interés

Utilizando las mediciones realizadas en la salida a terreno efectuada en diciembre de 2010 y los datos de batimetría proporcionados por ENDESA en mediciones realizadas a principio de 2010, se pueden distinguir tres zonas A, B y C en la Figura 3.7:

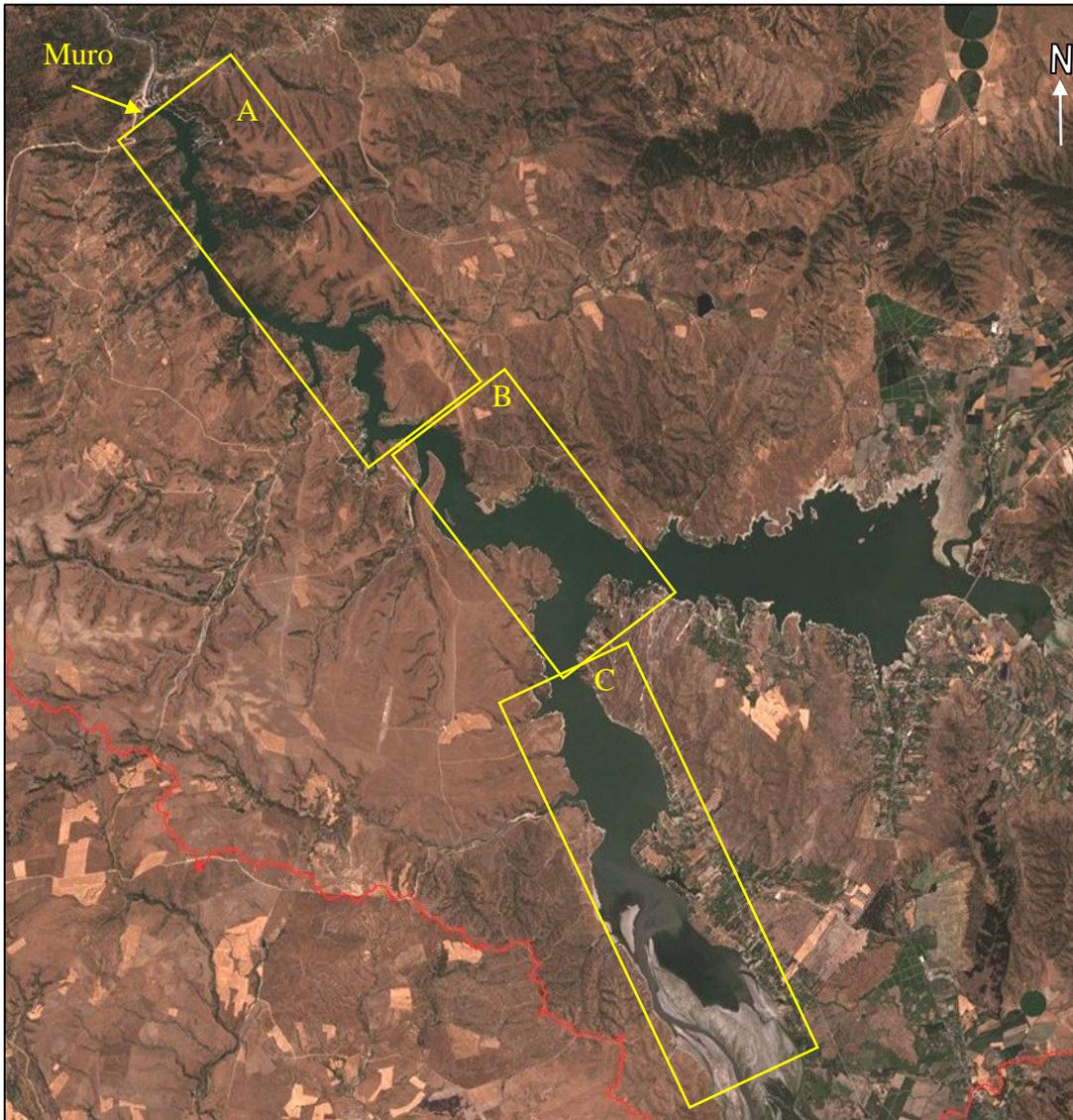


Figura 3.7 Zonas A, B y C

La zona A se distingue por una caja angosta, de paredes escarpadas y sedimento plano en el fondo. De acuerdo a los resultados de las mediciones realizadas en la campaña de terreno, disponibles en el Anexo III, corresponde a una zona donde la fracción fina del gasto sólido ha conseguido viajar y ha depositado preferentemente. Aquí también ha llegado el arrastre asociado al lavado de la cuenca intermedia entre la

confluencia de los ríos Cachapoal y Tinguiririca y la Central Rapel. Es razonable suponer que el sedimento de esta zona se compone en mayor parte de limos y arenas finas.

La zona B posee zonas de depósito un poco más anchas que la zona A, y una distribución menos uniforme en el sentido transversal del escurrimiento. De acuerdo a lo observado en las mediciones realizadas en el sector, es posible inferir que en esta zona existe sedimento grueso. Es la zona donde se encuentra el pie del delta y la junta con el estero Alhué.

La zona C posee las áreas más amplias de depósito, y es donde el delta está más desarrollado. De acuerdo a lo observado en terreno, se puede deducir que en el delta se concentra el sedimento grueso arrastrado por los ríos Cachapoal y Tinguiririca.

Se desarrolla una descripción más detallada de las zonas A y B, las que fueron cubiertas en la salida a terreno. En los gráficos también se incluye la información de la zona C, lugar donde ENDESA realizó a principios del año 2010 una campaña de batimetría, como se describe en la sección 2.3.2.

Se numera los perfiles desde P1 hasta P29, donde P1 es el perfil más cercano al muro de la Central Rapel. La zona A comprende entre P1 y P12, mientras la zona B entre P13 y P29. El detalle de estos perfiles se puede observar en el Anexo II.

3.3.2. Descripción Zona A

Esta zona comprende entre el km 0 y km 12, siendo el km 0 el muro de la central. Posee una cota inferior en el km 0 de 54.4 m.s.n.m. en el perfil transversal hasta 71 m.s.n.m. en el km 12. La Figura 3.8 muestra los perfiles ubicados en esta zona. Los perfiles P9 y P12 corresponden a mediciones longitudinales.

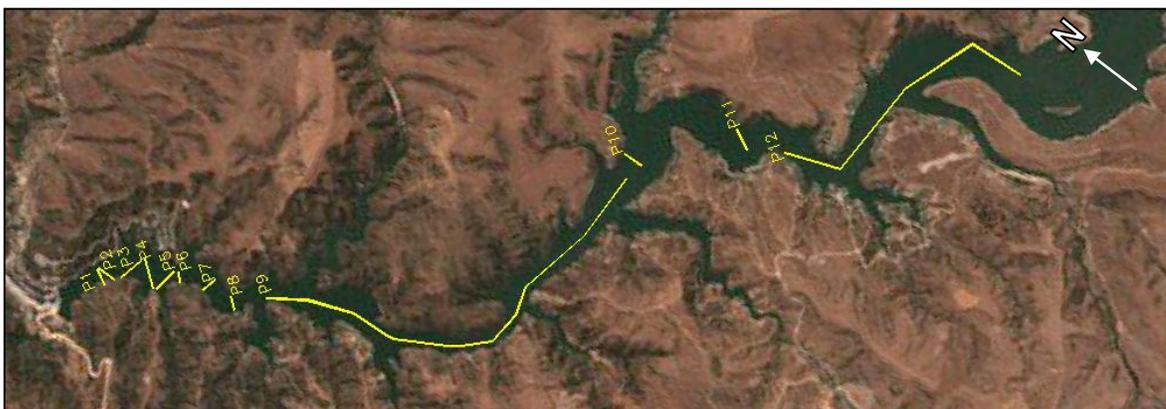


Figura 3.8 Detalle de la Zona A

La Figura 3.9 muestra el P7, ubicado en el km 2. A la hora de la medición el lago tenía una cota de 100.5 m.s.n.m., y considerando una profundidad del equipo de 1 m respecto a la superficie del agua, se puede obtener la cota representativa del fondo, midiendo la profundidad del lecho hasta la ecosonda. Haciendo este cálculo se encuentra que el lecho de este perfil se encuentra en la cota 56 m.s.n.m. La sección posee un ancho en la superficie del agua de aproximadamente 220 m.

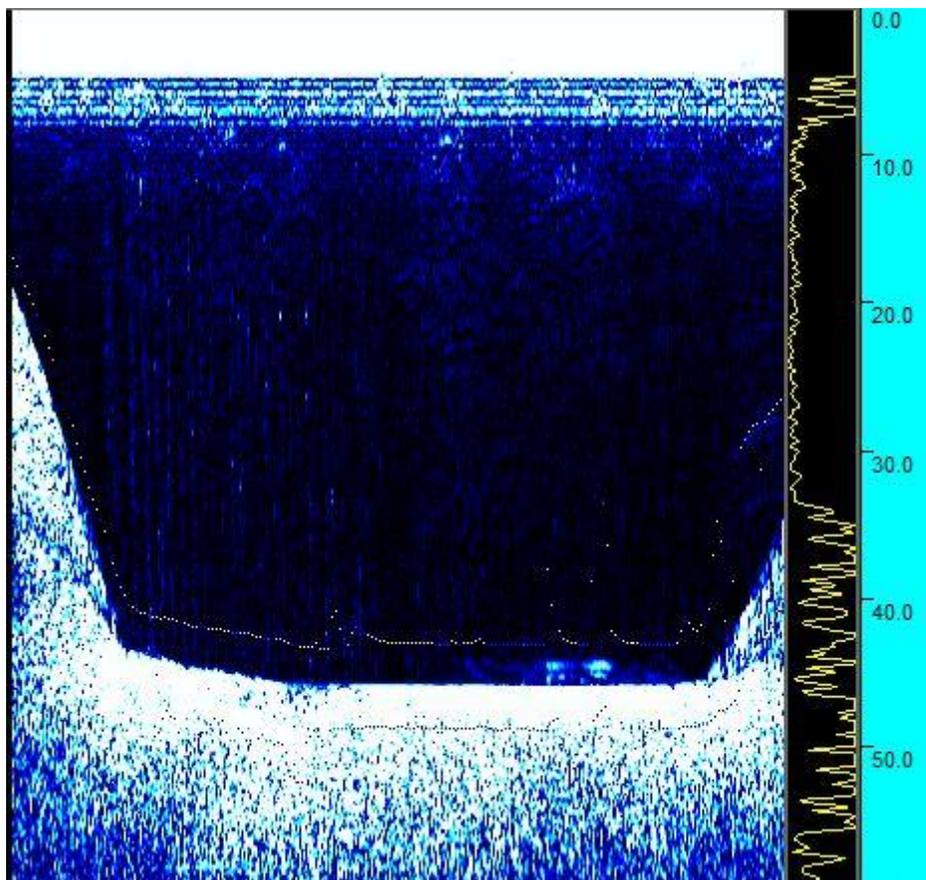


Figura 3.9 Perfil P7, km 2. El sedimento en esta parte se caracteriza por ser plano tanto transversal como de manera longitudinal.

En la figura 3.10 se observa un perfil longitudinal del lecho del embalse en un tramo de 500 m del perfil P9, ubicado según se indica en la Figura 3.8

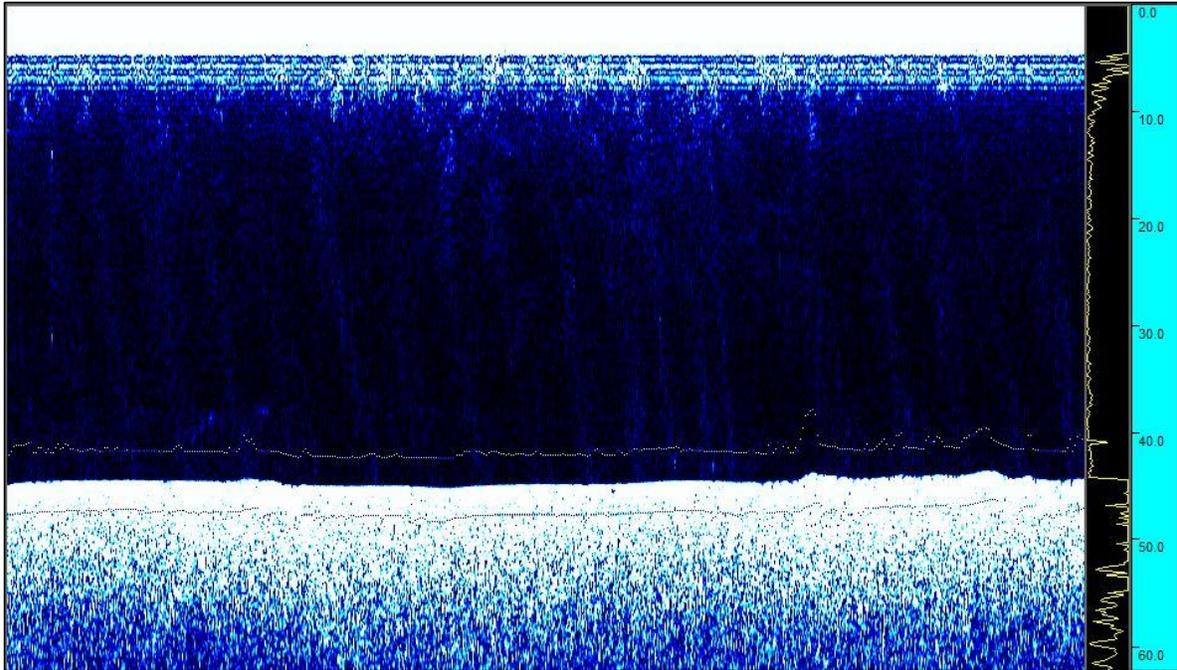


Figura 3.10 Perfil longitudinal del lecho en tramo de la zona A. Esta zona posee una pendiente entre 0.03% y 0.2%.

Como se aprecia en la Figura 3.10, la pendiente del lecho en dirección longitudinal es muy pequeña en el sector cercano al muro. Esto se mantiene por aproximadamente cinco kilómetros medidos desde la central Rapel hacia aguas arriba (Perfil 6) con valores de 0.03% de pendiente. A partir de este punto la pendiente comienza a aumentar, manteniéndose relativamente constante en 0.2% hasta el km 25, en la zona de Las Balsas, donde disminuye en la zona del delta hasta valores cercanos a 0.03% nuevamente.

3.3.3. Descripción Zona B

Esta zona comprende entre el km 12 y km 20, entre los perfiles P13 y P24. En el tramo es apreciable la caja original del río Rapel previo al llenado (Figura 3.13), dado que posee el menor espesor de sedimento depositado en todo el embalse. Los perfiles ubicados en esta zona se pueden ver en la Figura 3.11.

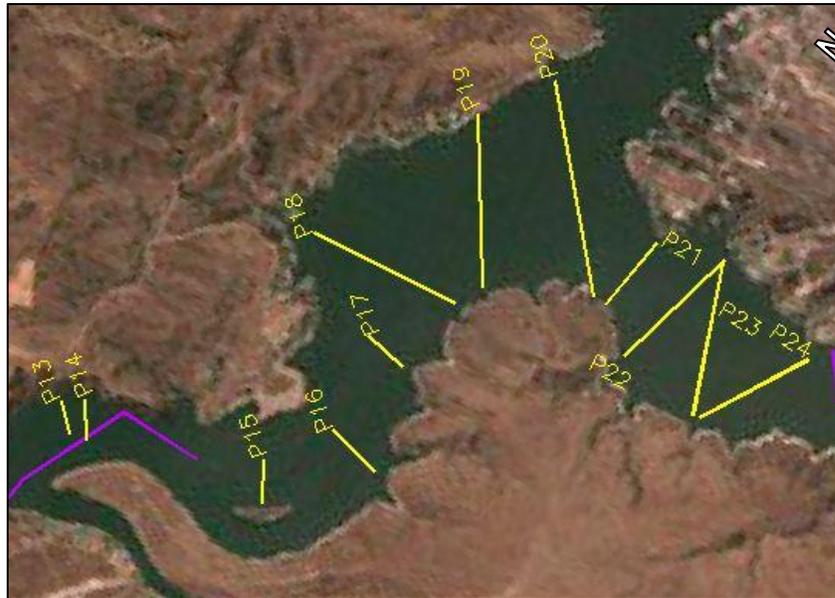


Figura 3.11 Detalle de la Zona B

Las medidas del extremo de aguas arriba de la zona B se enlazan con la batimetría de ENDESA descrita en la sección 2.2.2.

La Figura 3.12 muestra el perfil P21, ubicado en el km 18,4.

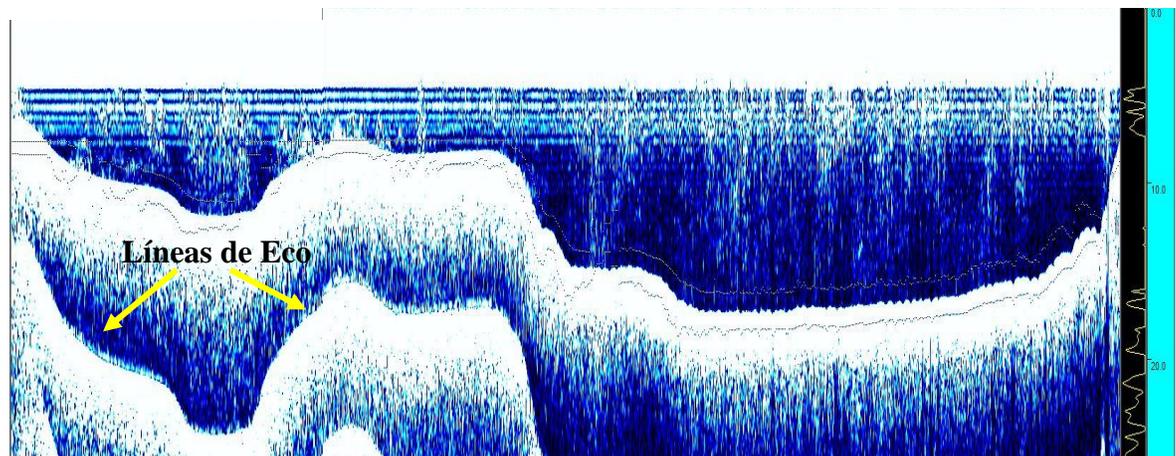


Figura 3.12 Perfil 21. Km 18.4

Se puede ver que en la parte derecha de la caja el sedimento no guarda la misma distribución plana vista en la zona A. La existencia de mayores taludes en el fondo podría indicar la presencia de sedimento más grueso que en la zona A. Sin embargo esta hipótesis debe ser corroborada mediante sondajes en que se analice el tamaño de grano del lecho.

Las formas que se aprecian bajo la primera línea de fondo corresponden a un eco del equipo, y no deben ser consideradas.

Dado que el perfil 21 medido en terreno coincide con el perfil 14 del año 1968 (Figura 2.3) se comparan ambos perfiles a modo de evaluar el embanque producido durante el período entre el llenado y el año 2010. La Figura 3.13 muestra la comparación del Perfil 21 del año 1968 con los datos medidos en la visita a terreno (Figura 3.12), donde se observa el embanque que se ha producido en el perfil analizado.

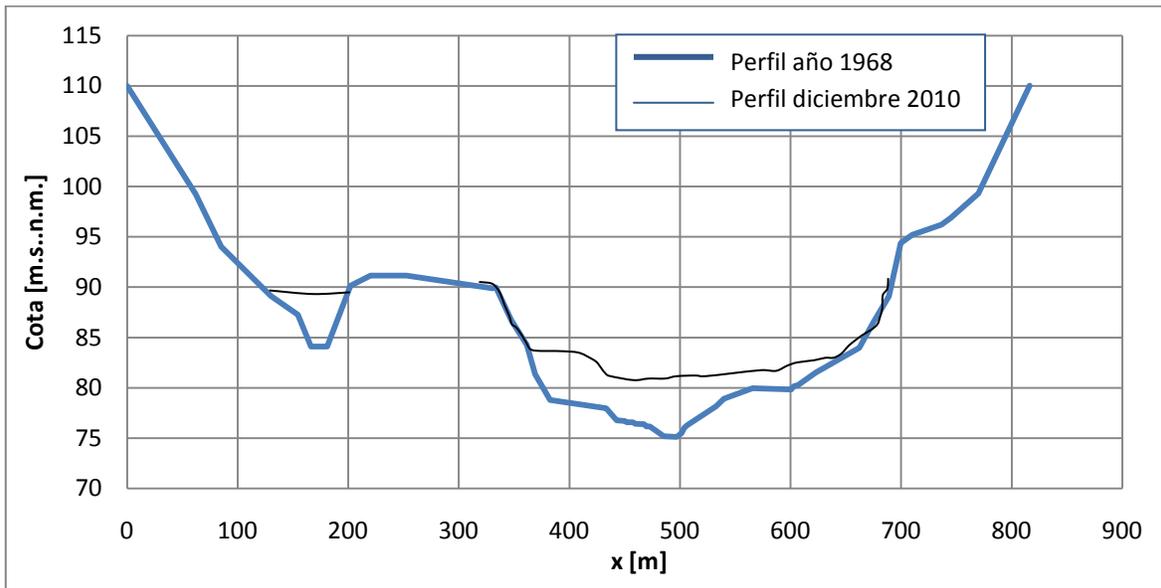


Figura 3.13 Comparación entre el lecho del embalse en el perfil original previo al llenado (P14) y el medido en terreno (P21).

En la Figura 3.13 se puede ver en azul la batimetría previa al llenado del embalse, y en una línea más delgada y oscura los datos de batimetría obtenidos en terreno. Se aprecia que hay un sector del perfil original que no ha tenido embanque.

3.4. Comparación de batimetría 1968 y 2010

Para comparar el perfil longitudinal del embalse Rapel antes de su llenado con los datos obtenidos en el año 2010, se actualiza el valor de la cota de fondo en cada perfil de 1968 con el valor obtenido con la

ecosonda en diciembre de 2010. Aunque los perfiles de 1968 no coinciden siempre en ubicación con los perfiles obtenidos en la salida a terreno, cuando esto ocurre se interpola el valor de la cota de fondo entre los dos perfiles adyacentes al perfil de 1968 que se busca actualizar, ponderando el valor de la cota de fondo por la distancia respectiva al perfil. De esta manera se encuentra un valor interpolado para el perfil del año 1968 y se actualiza el perfil longitudinal del embalse. La Tabla 3.1 muestra los datos de cota inferior de los perfiles del año 1968 y su equivalente medido en terreno en diciembre de 2010.

Tabla 3.1 de batimetría obtenidos en la salida, comparados con los datos de 1968 son los siguientes

Perfil de 1968	Cota inferior 1968	Cota inferior campaña diciembre 2010	km
PC1	104	-	35.9
PC2	101	-	34.7
P1	98	-	33.4
P2	97	-	32.3
P3	96	-	30.5
P4	94	-	29.8
P5	94	--	28.9
P6	91	-	28.1
P7	90	-	26.6
P8	86	-	25.1
P9	88	-	23.9
P10	84	-	23.1
P11	84	92	21.8
P12	81	90.4	20.7
P13	80	87.3	19.5
P14	77	82.7	18.4
P15	76	80.3	16.4
P16	72	78	15.2
P17	70	77.3	14.1
P18	71	74	13.0
P19	67	70	11.5
P20	61	66.1	10.1
P21	58	62.8	9.0
P22	51	61	8.1
P23	49	58.6	7.1
P24	48	57	6.2
P25	44	55	5.2
P26	38	55.5	3.9
P27	33	54.7	2.9
P28	36	54.5	2.0
P29	31	54.4	1.0
P30	19	54.4*	0.0

*Valor extrapolado

Para completar el perfil longitudinal actualizado con las mediciones de diciembre de 2010, se utiliza los valores medidos por ENDESA en el verano de 2010, presentados en la Tabla 2.2 y Figura 2.3. De esta manera, se completa el perfil longitudinal actualizado del año 2010.

En la Figura 3.14 se muestra las cotas de fondo del lecho del embalse Rapel y la sedimentación del embalse desde el año 1968 al año 2010.

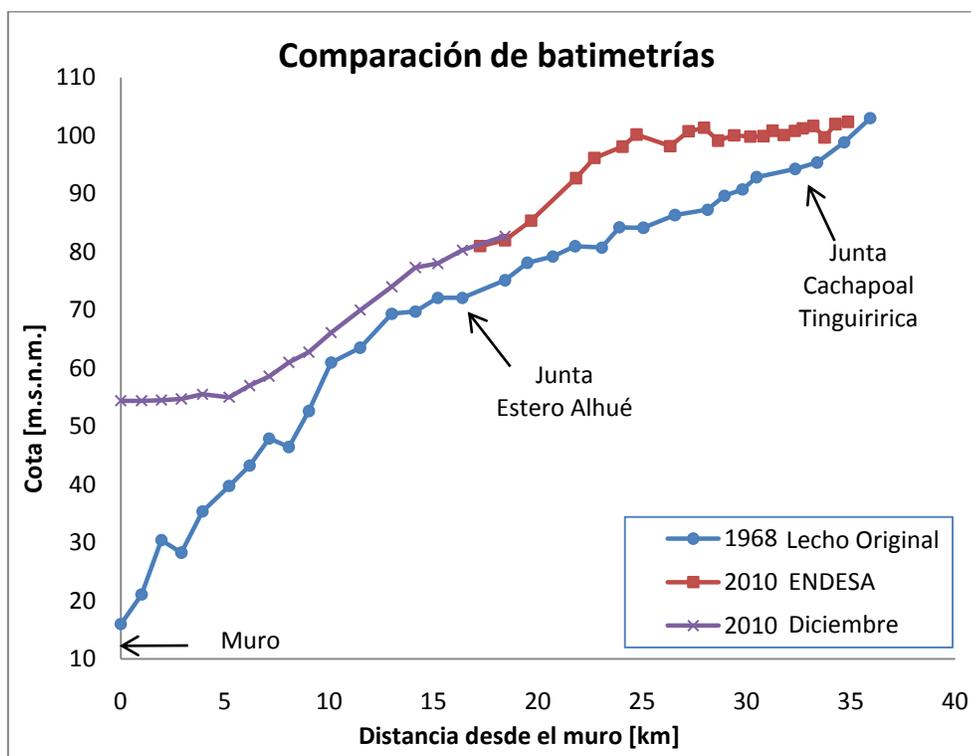


Figura 3.14 Comparación batimetrías de los años 1968 y los perfiles medidos en 2010

El análisis del embanque observado mediante la diferencia entre los perfiles longitudinales del embalse Rapel en el año 1968 y el medido en el 2010 es presentado en el Capítulo 4.

4. Análisis del depósito de sedimentos en el embalse Rapel

Para analizar el estado actual de depósito de sedimentos en el embalse Rapel, a continuación se muestra la Figura 4.1, donde se muestra la sedimentación ocurrida entre los años 1968 y 2010.

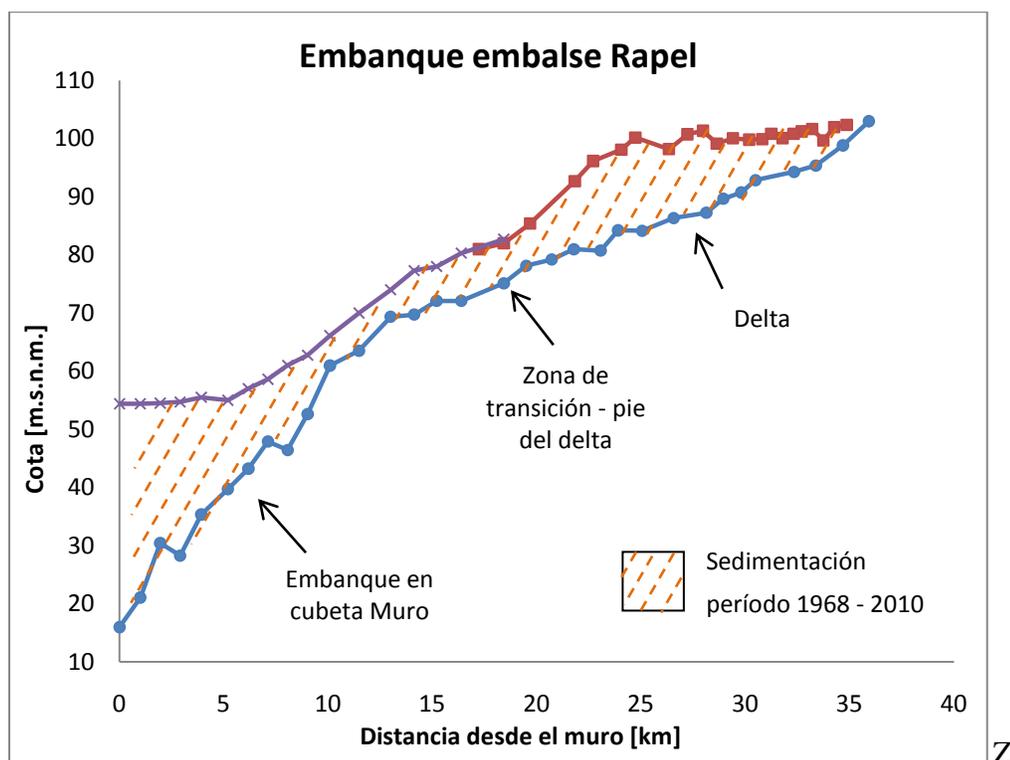


Figura 4.1 Descripción de las zonas de embanque en el embalse Rapel

En la Figura 4.1 es posible identificar tres zonas principales, el delta de sedimentos (ver Figura 1.1), una zona de transición al pie del delta y el embanque plano en la zona de la cubeta Muro. Se puede ver que el delta está completamente desarrollado, y se identifica su pie en el km 20, desarrollándose hacia aguas arriba por 15 km. El delta posee un espesor de embanque de hasta 15 metros entre el sector de las Balsas y Llallauquén (ver Figura 2.2). Desde el km 20 hasta el km 10 la zona de transición posee espesores de sedimento entre 5 y 7 metros. Siguiendo hacia el muro y coincidiendo con el cambio de pendiente en el fondo original del embalse, en el km 10 se produce un aumento importante en la profundidad del sedimento. De esta manera, en la cubeta Muro se alcanza un espesor máximo de depósito de más 30 m.

Para dimensionar el sedimento acumulado durante la operación del embalse se calcula el volumen de sedimento depositado desde el año 1968 hasta el año 2010.

4.1. Volumen de depósito de sedimentos al año 2010

4.1.1. Antecedentes previos

Existen antecedentes de los años 1984 y 1998 de mediciones de batimetría y cálculo de depósito de sedimentos en el embalse Rapel llevados a cabo por ENDESA. No es posible comparar directamente estos valores puesto que se consideraron distintas metodologías y zonas de estudio. En el estudio del año 1984 se calculó el depósito de sedimento desde el km 30 hasta el km 35 aproximadamente y en el año 1998 desde el km 28,6 hasta el km 35.

La Tabla 4.1 muestra los antecedentes de volumen embancado de sedimento en el embalse Rapel para años anteriores.

Tabla 4.1 Antecedentes previos de volumen de sedimento depositado dentro del embalse. Los estudios consideran diferentes áreas de cálculo por lo que los valores no son comparables

Año	Embanque (mill. m ³)
1984 (Benítez)	15
1998 (ENDESA)	147

4.1.2. Estimación del depósito al año 2010

Según lo visto en el Capítulo 3, es posible suponer que el sedimento grueso (gravas y arenas gruesas y medias) y el sedimento fino (arenas finas y limos) se distribuye de manera distinta dentro del embalse Rapel. Distinguir donde comienza el depósito de un tipo de sedimento y termina el otro es difícil sin la extracción de muestras del lecho del embalse. Sin embargo es posible, para efectos del cálculo, suponer que el sedimento grueso se distribuye de manera preferente en el sector del delta de sedimentos, descrito en la Figura 4.1, mientras que el lecho plano del sector cercano al muro de la central Rapel indicaría la presencia mayoritaria de sedimentos finos. Mediante este supuesto, se considera el cálculo del volumen de embanque en el embalse Rapel separándolo en dos tramos, uno donde se supone que existe solo sedimento fino y otro tramo donde estaría el sedimento grueso. El tramo donde estaría el sedimento fino va desde el muro (km 0) hasta el pie del delta (km 18.4), mientras el otro tramo comprende desde el pie del delta hasta el km 35. Debido a que no se dispone del ángulo entre los perfiles del año 1968, existe una gran

incertidumbre en la precisión de los resultados. Se considera que los perfiles son perpendiculares al sentido del escurrimiento dentro del embalse. No se considera el embanque producido en la cubeta Alhué por estar fuera del alcance del presente estudio.

Para el cálculo del embanque se superpone cada perfil del año 1968 con su equivalente del año 2010 si este existe. Se calcula la diferencia de las áreas de los perfiles, calculadas hasta la cota 105 que es la cota normal máxima de operación del embalse Rapel. Luego se calcula los volúmenes considerando las distancias entre los perfiles y se obtiene el embanque total. La Figura 4.2 muestra un ejemplo de la comparación entre dos perfiles de los años 1968 y 2010.

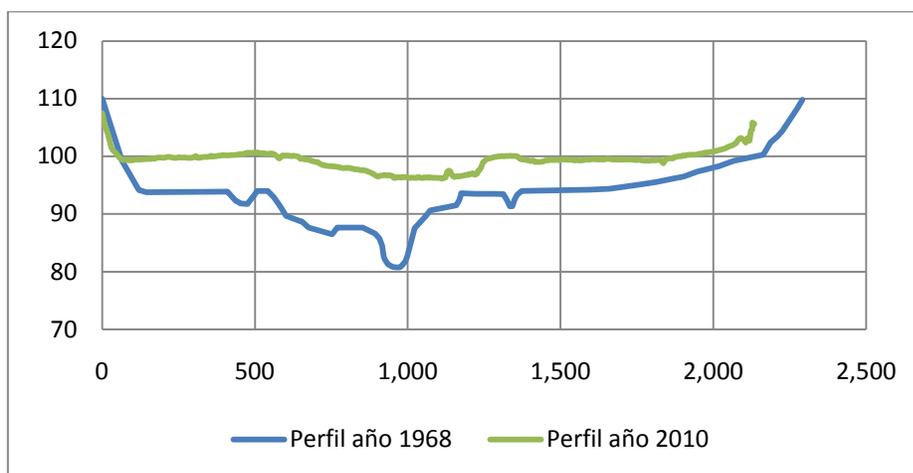


Figura 4.2 Comparación de dos perfiles para el cálculo del embanque. Se calcula el área entre los perfiles.

En caso de que no exista un perfil del año 2010 coincidente con el perfil del año 1968, se estima una altura de embanque entre los dos perfiles de 2010 más cercanos al perfil de 1968, ponderando por la distancia al perfil de 1968 y se calcula la diferencia entre las alturas para obtener un área de embanque. Esto da como resultado un volumen de **18,3 mill. m³** de sedimento entre los km 0 y km 18 y de **159 mill. m³** entre los kilómetros 18 y 33, con el muro de la central como el km 0. Como se explica anteriormente este resultado es solo ilustrativo y está limitado por el supuesto de que los perfiles del año 1968 son paralelos entre sí.

5. Modelación preliminar del embalse Rapel a través de MOSSEM

El objetivo de realizar una modelación preliminar del embalse Rapel es identificar aquellos aspectos a considerar en una modelación detallada del embalse a partir de una situación previa al llenado y comparar los resultados obtenidos del modelo con los medidos en terreno.

5.1.Descripción de MOSSEM

El modelo MOSSEM fue desarrollado por González (2006). Este modelo, simula el flujo en un cauce afluente a un embalse junto al transporte y depositación de sedimentos gruesos y finos en su interior. Para el cálculo del flujo se resuelven las ecuaciones de Saint-Venant discretizadas con un esquema numérico de volúmenes finitos. El esquema numérico es capaz de tratar regímenes transientes de flujos mixtos, subcríticos, supercríticos y cercanos a la crisis, incluyendo la localización automática de resaltos. El transporte y depósito de sedimentos se modela utilizando la ecuación de conservación del sedimento de Exner, con módulos opcionales para el cálculo de arrastre de fondo a partir de cuatro relaciones distintas, incluyendo Meyer Peter & Müller, Parker, Ackers & White y Wilcock & Crowe. El modelo a su vez es capaz de simular corrientes de turbidez, determinando el punto de inmersión de la corriente y la hidrodinámica del fenómeno en una aproximación 1D. El código asume que las corrientes son netamente depositarias y no existe resuspensión del sedimento desde el lecho. Mayor detalle de las consideraciones y ecuaciones propuestas en la realización e implementación de este modelo pueden encontrarse en el trabajo de González (2006) citado en las referencias.

Una de las ventajas de utilizar un modelo computacional como MOSSEM es que se reproducen dos características fundamentales en el fenómeno del arrastre de sedimentos: caracterización de la hidráulica del flujo y distribución de los sedimentos en el embalse. La caracterización de la hidráulica del flujo permite el modelamiento de caudales a nivel diario con condiciones de borde de operación de la central (cota en el muro), pudiendo de esta manera simular el efecto de una crecida u otros como *flushing flows* si se baja bruscamente el nivel del agua en el muro por la operación de la central. MOSSEM reconoce que la geometría del embalse esta en continuo cambio, por lo que es importante representar este cambio en el transporte de los sólidos. Este cambio de la geometría se traduce en el avance del delta de sedimentos hacia aguas abajo.

5.1.Modelo conceptual del embalse

A partir de los perfiles del año 1968, se construyen secciones trapeciales que reflejen de la mejor manera el comportamiento hidráulico de la sección original. Además, se considera que la influencia del flujo desde la cubeta Alhué sobre la hidrodinámica del flujo es despreciable, incluso en las crecidas.

Se utiliza la serie de caudales diarios desde el año 1971 hasta el año 2009. No se considera la estadística de 1968, 1969 ni 1970, puesto que durante estos años ocurrió el llenado del embalse y coincidió con que fueron años especialmente secos (ver Figura 2.15), por lo que el aporte de sedimentos fue prácticamente nulo (Benítez, 1984). Por esto último, se tienen datos de cota en el muro solo a partir del año 1971.

Como condición de borde de aguas abajo se utiliza la estadística disponible en ENDESA de nivel de cota en el muro desde el año 1971 hasta el 2002. Entre los años 2002 y 2010 se utiliza la estadística de la Comisión Nacional de Energía, disponible en su sitio web.

5.2.Simulaciones

Utilizando el código MOSSEM se realiza una simulación preliminar para representar el depósito de sedimentos gruesos producido durante el período de funcionamiento del embalse. Para los efectos de esta simulación se considerará el período comprendido entre el primero de enero de 1971 hasta el 31 de diciembre de 2009.

Para las simulaciones se utiliza los siguientes supuestos:

- Aproximación de las secciones transversales del lecho original por perfiles trapezoidales
- Serie de caudales desde 01-01-1971 hasta 31-12-2009 de los ríos Tinguiririca y Cachapoal
- Serie de cotas en Rapel Muro 01-01-1971 hasta 31-12-2009
- Granulometría del río Cachapoal (Benítez, 1984) (ver Figura 6.3)
- Fórmula de Meyer Peter & Müller para el gasto sólido de fondo (descripción en sección 6.1)

El caudal representativo será el correspondiente a la suma de los caudales de ambos ríos. Se utilizan secciones transversales que van desde la junta de los ríos Tinguiririca y Cachapoal hasta la junta de las cubetas Muro y Alhué. La pendiente del río se aproxima por una línea que sigue la tendencia de los puntos más bajos de cada sección, como se observa en la Figura 5.1.

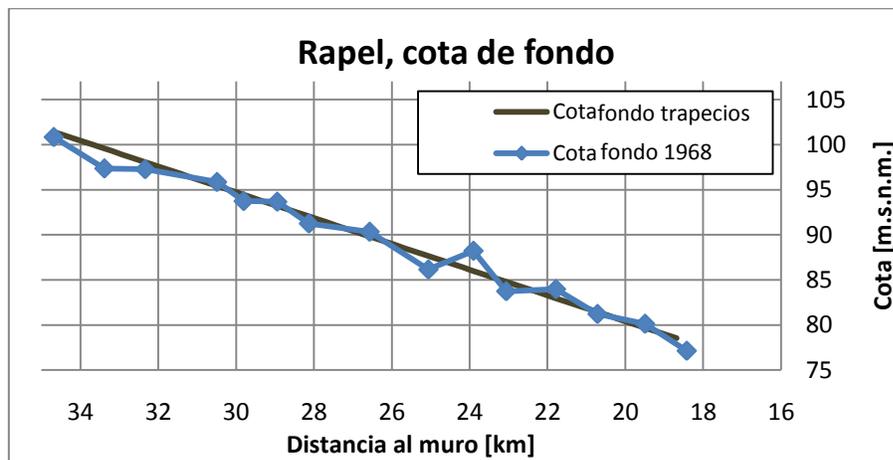


Figura 5.1 Aproximación de la pendiente de fondo en el modelo

En la Figura 5.2 se puede ver la forma de las secciones trapezoidales utilizadas.

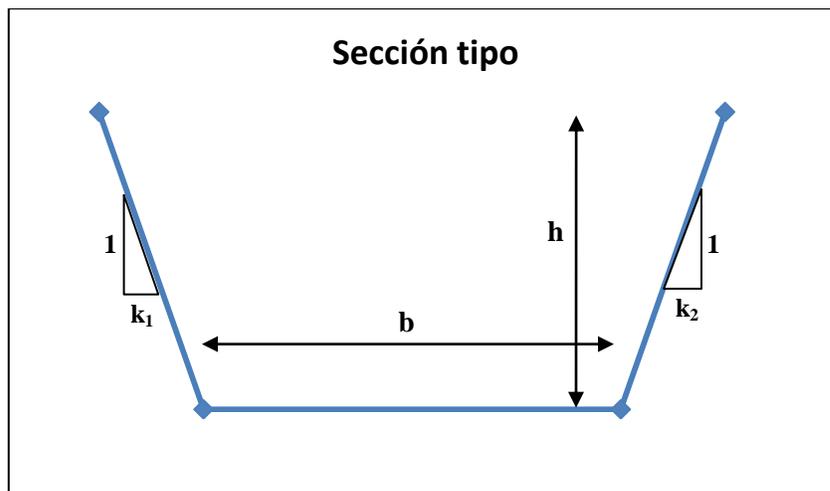


Figura 5.2 Sección tipo de los perfiles trapezoidales

Respecto a los valores de b , h , k_1 y k_2 en las simulaciones, primero se utilizaron valores distintos para cada perfil, de acuerdo al perfil original que representaban. Sin embargo debido a que existen perfiles del año 1968 con ancho superior a los dos kilómetros, el modelo MOSSEM presentaba inestabilidades numéricas para los caudales menores por alturas de escurrimiento muy pequeñas. Por esto se optó por utilizar un ancho fijo en los perfiles. Además, se utiliza un ancho menor al de la caja hidráulica del embalse, utilizando el supuesto de una caja sedimentológica de menor tamaño donde se realiza de manera preferente el arrastre del sedimento.

En la Tabla 5.1 se muestran los principales parámetros de simulación del modelo. La altura h mostrada en la Figura 5.2 depende de la altura de escurrimiento y no se define a priori.

Tabla 5.1 Parámetros del modelo MOSSEM

	# Nodos	Número de Courant	Relación de Gasto Sólido	b [m]	k ₁	k ₂
Valor utilizado	65	0.6	MP&M	200	0.09	0.08

Se utilizan 14243 días como período de simulación, entre el 01 de enero del año 1971 hasta el 31 de diciembre de 2009. Como condición de aguas abajo se utilizan los niveles medidos en el muro de la Central Rapel. Todos los datos de caudales y cota en el muro son ingresados a nivel diario.

5.3. Resultados de la simulación

Los resultados para el período y condiciones indicadas en la Tabla 5.1 se muestran en la Figura 5.3:

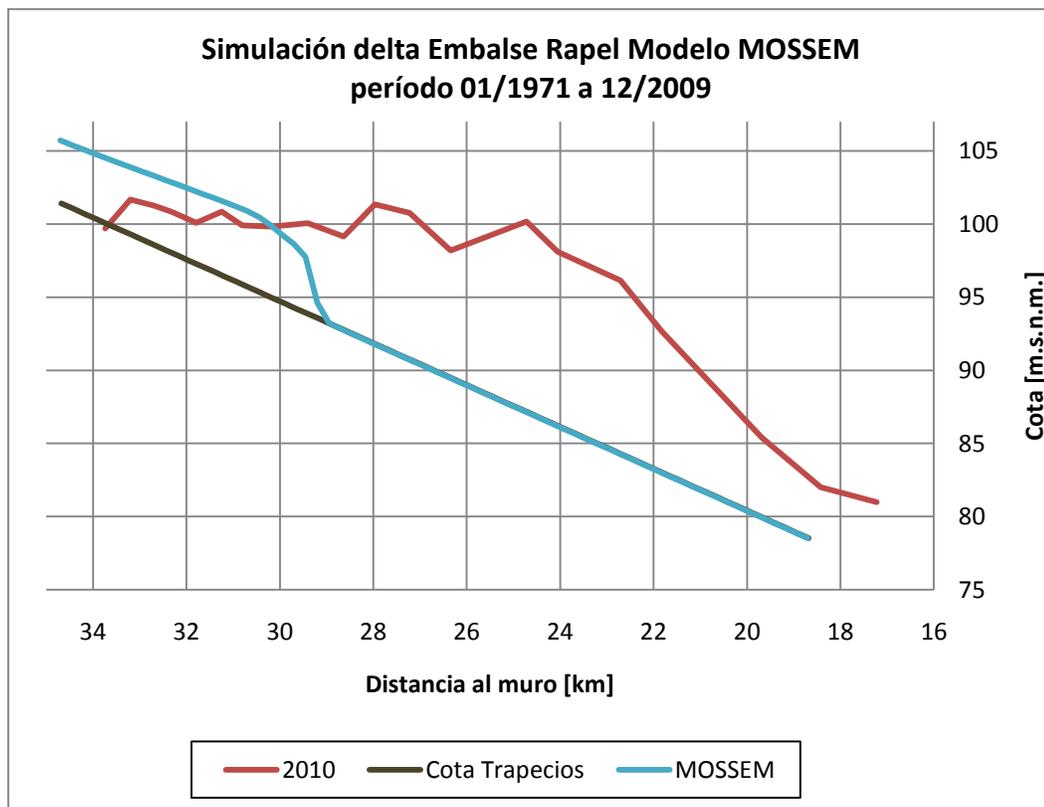


Figura 5.3 Situación medida en terreno el año 2010 y resultado del modelo MOSSEM

Se utiliza un ancho constante en todas las secciones trapeciales. Dado que se ocupa un ancho menor al original en el modelo, no solo es menor la altura o la extensión del delta de sedimentos, sino que el volumen también es menor que el obtenido de las mediciones en terreno (ver Capítulo 4).

Existe una diferencia importante en el avance del delta entre lo modelado y lo medido en terreno, como se aprecia en la Figura 5.3, el delta se desarrolla aproximadamente por unos 6 kilómetros en el modelo MOSSEM, mientras que en las mediciones del año 2010 se identifica un avance de por lo menos 15 kilómetros. Para otras relaciones de gasto sólido de fondo aparte de Meyer Peter & Müller el resultado es un delta con la misma forma del que se muestra en la Figura 5.3 pero menos desarrollado en altura y extensión.

Debido a que la propagación del delta ocurre en ambas direcciones es necesario fijar una condición de borde para el límite del dominio aguas arriba en caso de que el delta alcance este nodo. Según González (2006) la condición ideal es un dominio suficientemente extenso hacia aguas arriba para evitar la influencia del delta en el nodo de aguas arriba, sin embargo esta alternativa es impracticable por el costo computacional (aumentaría la cantidad de nodos) y la falta de información topo batimétrica. La alternativa para la condición de borde adoptada en el modelo es que en caso de que el delta alcance el nodo límite de aguas arriba, el modelo replica las condiciones del interior del dominio hacia aguas arriba para el valor de gasto sólido de fondo del último nodo. En el caso simulado (Figura 5.3) se aprecia que el delta influye en el nodo de aguas arriba, aumentando la cota de fondo de manera uniforme en toda la extensión desarrollada por el delta. En la situación medida en terreno se puede observar que el delta no posee un solo espesor de sedimento depositado, sino que se desarrolla con un espesor variable, disminuyendo hacia aguas arriba su influencia. Aunque se podría fijar la condición de aguas arriba en una cota fija, González (2006) indica que esto genera un efecto que altera la depositación hacia aguas abajo, razón por la que esta condición no es considerada en el modelo final.

6. Estimación del gasto sólido de fondo afluente al embalse

La motivación de este capítulo es utilizar los datos disponibles de granulometría, batimetría de 1968 y caudales para realizar una estimación del gasto sólido de fondo que potencialmente es capaz de entrar al embalse tanto en el río Cachapoal como en el río Tinguiririca. Para esto se realizan los siguientes pasos para cada río por separado:

- confección de curvas de duración del caudal medio diario. Identificación de secciones de entrada.
- Cálculo de ejes hidráulicos para los caudales mencionados anteriormente.
- Cálculo de esfuerzo de corte en las secciones de interés.
- Mediante el uso de fórmulas para el arrastre de fondo calcular el gasto sólido afluente al embalse en el período histórico de operación del embalse.

Las secciones de entrada corresponden a aquellas que se ubican justo aguas arriba del embalse, en una zona donde el embanque sea mínimo durante los años de operación.

Las relaciones a utilizar son las de Meyer Peter & Müller y Wilcock & Crowe. Esto para diferenciar los resultados de una fórmula desarrollada para un tamaño uniforme (MP&M) y otra que considera no sólo un granulometría extendida sino que efectos de sobreexposición y escondimiento en la coraza del río (W&C).

En la Figura 6.1 se muestra la curva de duración del caudal medio diario para el río Cachapoal en la estación Puente Arqueado, mientras que en la Figura 6.2 se hace esto para el río Tinguiririca en la estación Los Olmos.

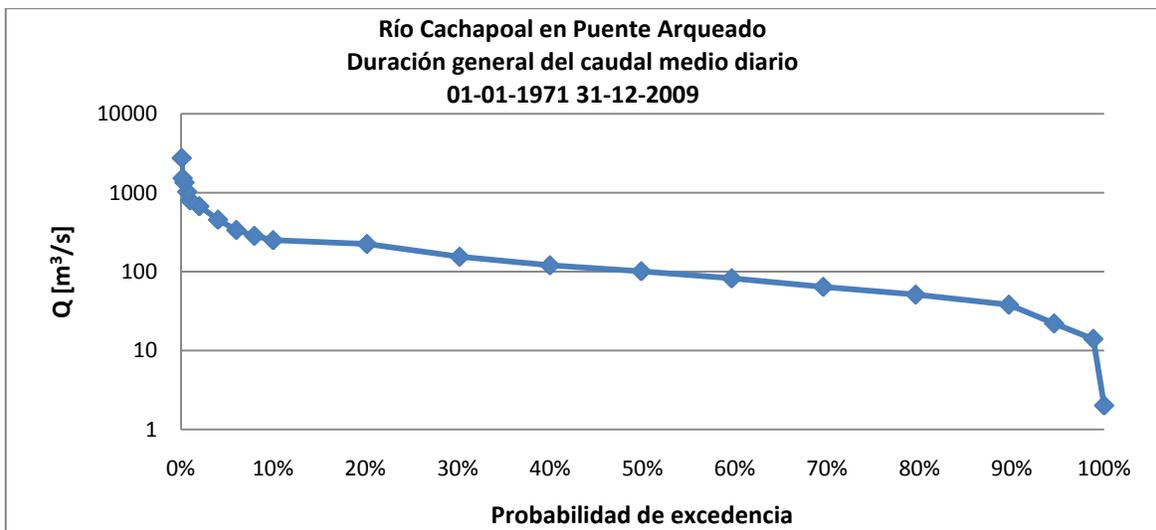


Figura 6.1 Curva de duración del caudal medio diario, río Cachapoal

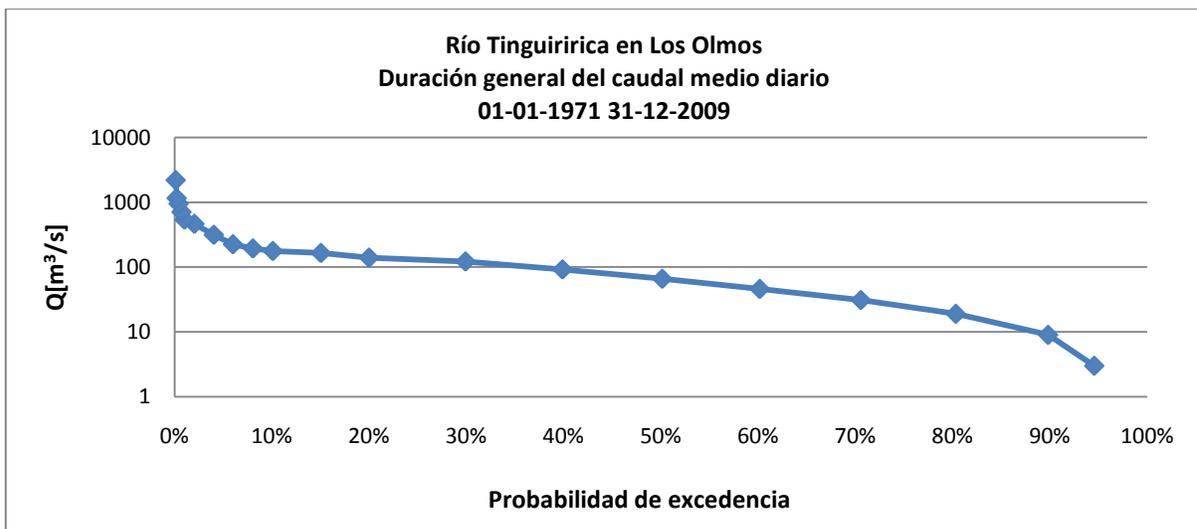


Figura 6.2 Curva de duración del caudal medio diario, río Tinguiririca

En las Figuras 6.3 y 6.4 se muestran los datos de granulometría existente en los ríos Cachapoal y Tinguiririca respectivamente.

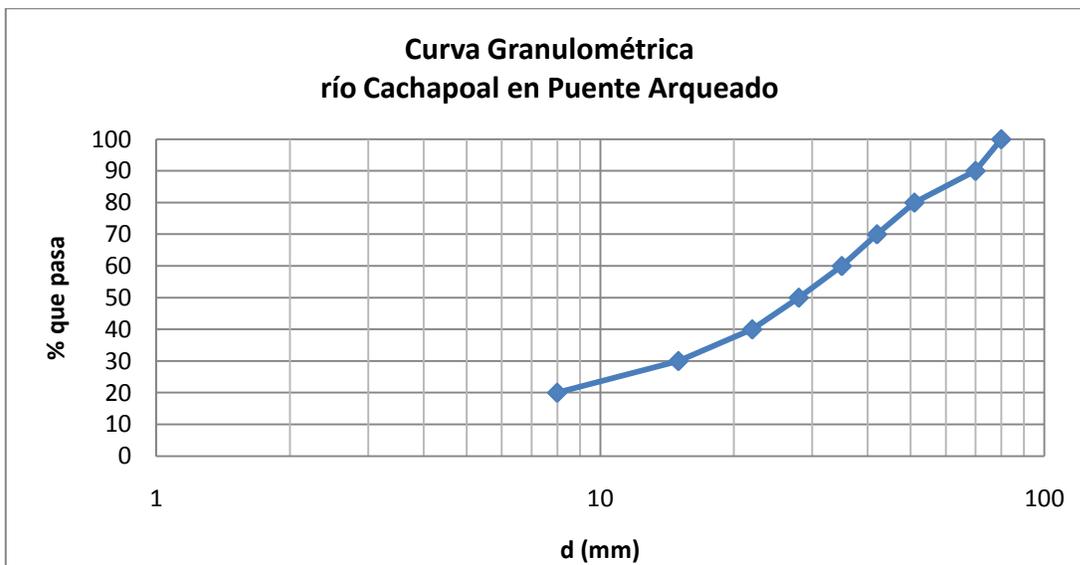


Figura 6.3 Granulometría del río Cachapoal (Benítez, 1984)

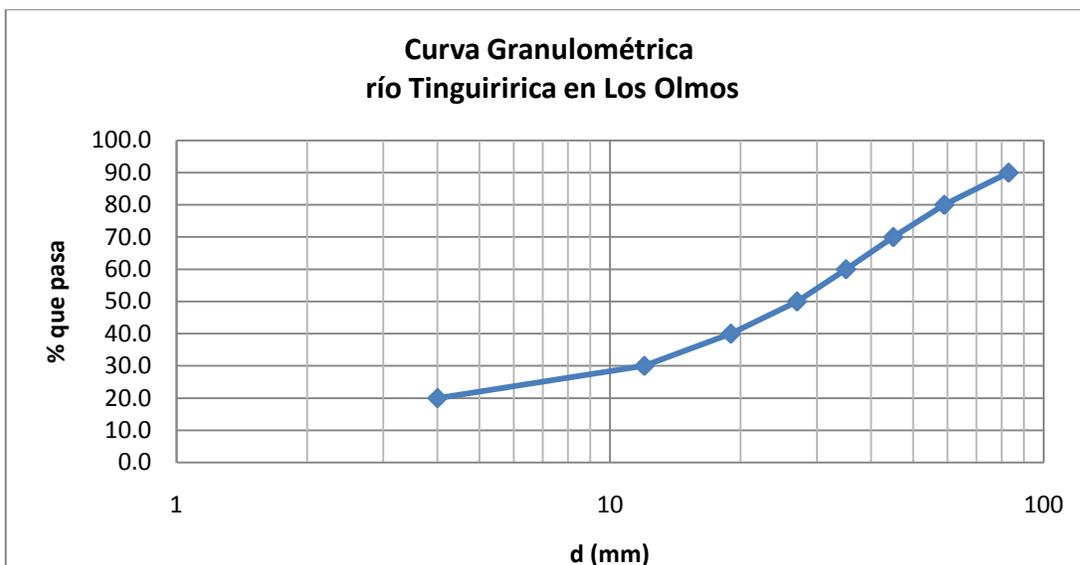


Figura 6.4 Granulometría del río Tinguiririca (Benítez, 1984)

Como se puede ver en las Figuras 6.3 y 6.4 ambos ríos poseen distribuciones no uniformes de granulometría. No existen datos de granulometría para tamaños menores a 8 mm en el caso del río Cachapoal, y de 4 mm para el río Tinguiririca. Esto es importante al analizar el caso del cálculo del gasto sólido mediante la formulación de Wilcock & Crowe, que considera el efecto de las arenas en el arrastre de fondo.

Para el cálculo del esfuerzo de corte y del gasto sólido en las secciones transversales se subdivide esta última en franjas o subsecciones que son representativas del comportamiento hidráulico del río. Para cada franja se obtiene el esfuerzo y el gasto sólido correspondiente, luego se suma en la transversal y se tiene el

valor del gasto sólido en toda la sección. En la Figura 6.5 se muestra un esquema de las subsecciones mencionadas anteriormente.

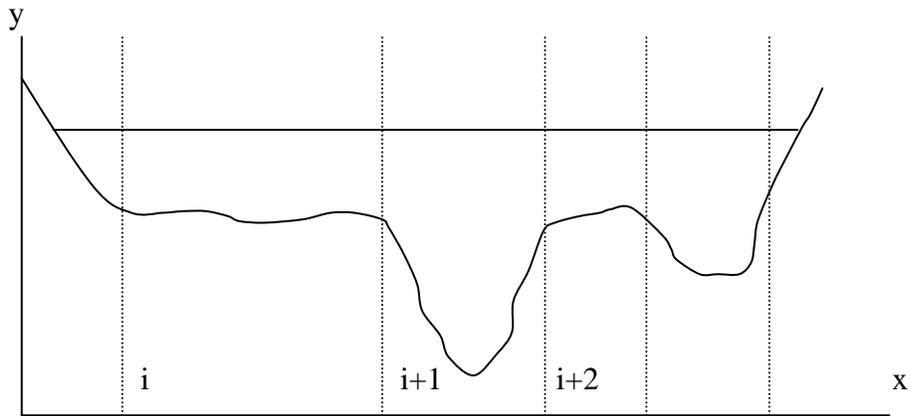


Figura 6.5 Esquema de subsecciones utilizadas en los métodos de Meyer Peter & Müller y Wilcock & Crowe

Esta subdivisión de las secciones transversales se utiliza para los dos métodos utilizados en el cálculo del gasto sólido.

6.1. Cálculo del gasto sólido de fondo utilizando la relación de Meyer Peter & Müller

La fórmula tradicional de Meyer Peter & Müller (1948) considera el gasto sólido adimensional como una función de la diferencia entre el esfuerzo de corte crítico adimensional y un valor de referencia para el cual comienza a producirse el arrastre de los granos:

$$q_s^* = 8(\tau^* - 0.047)^{3/2} \quad (6.1)$$

A su vez el gasto sólido adimensional se escribe como:

$$q_s^* = \frac{q_s}{\sqrt{Rg d_{50}^3}} \quad (6.2)$$

q_s es el gasto sólido por unidad de ancho, g es la aceleración de gravedad y d_{50} es el diámetro medio de la curva granulométrica. R es la relación relativa entre las densidades del sedimento, ρ_s y la densidad del fluido ρ .

(6.3)

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$$

El esfuerzo de corte adimensional se define como:

$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho g R d} \quad (6.4)$$

El esfuerzo de corte τ es función del flujo en la sección:

$$\tau = \rho g R_h S_f \quad (6.5)$$

R_h es el radio hidráulico y S_f la pendiente de la línea de energía.

El gasto sólido en la sección será:

$$Q_s = \sum_i q_{si}^* \sqrt{R g d_{50}^3 b_i} \quad (6.6)$$

q_{si}^* es el gasto sólido adimensional calculado para cada subsección, utilizando la descomposición del perfil transversal como se describe en la Figura 6.5, mientras que b_i es el ancho de la subsección correspondiente.

6.1.1. Caso Río Cachapoal

Para cálculo del gasto sólido potencial en el río Cachapoal se utiliza un tramo del río que comprende desde el km 2.6 hasta el km 5.2 medidos desde la confluencia de los ríos Cachapoal y Tinguiririca (km 0) hacia aguas arriba. Se elige este tramo por disponer de información de la batimetría previa al llenado del embalse, correspondiente a tres perfiles transversales en el sector. Se realiza un ajuste para tener una pendiente promedio en los perfiles aguas arriba de la confluencia y se actualiza la cota de fondo de las secciones transversales a usar. Entre los tres perfiles se interpolan 12 más hasta completar 15 perfiles transversales. Los tres perfiles que poseen información, XsC1, XsC7 y XsC15 se muestran a continuación en la Figura 6.6. El detalle de estos perfiles se puede encontrar en el Anexo IV.

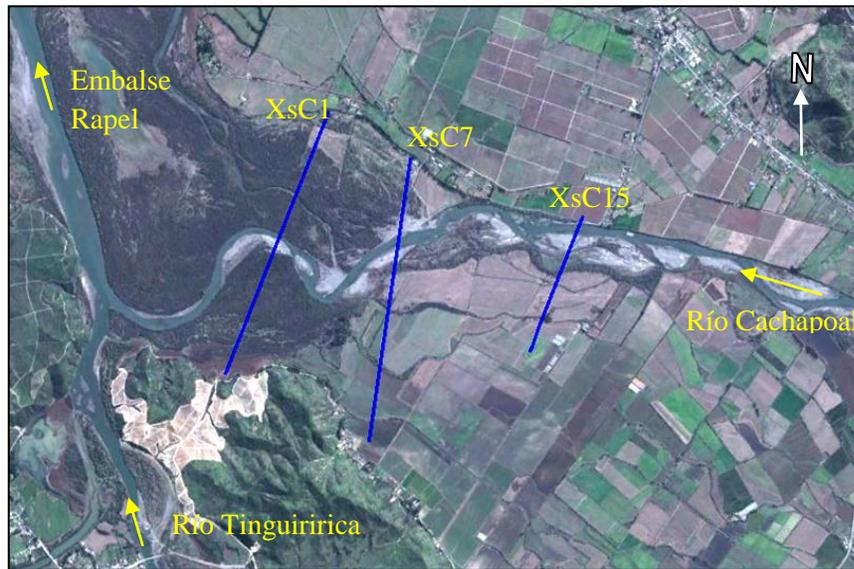


Figura 6.6 Perfiles en el río Cachapoal utilizados para el cálculo del gasto sólido

Se toman 21 valores de caudales representativos de la curva de duración correspondiente al río Cachapoal (Figura 6.1) y se realizan 21 ejes hidráulicos utilizando el programa HEC-RAS 4.1 para las secciones transversales de interés. Como condición de aguas abajo se entrega una pendiente de fondo equivalente a la pendiente de los perfiles, de modo de simular una condición de altura normal en condiciones naturales.

Para cada una de las secciones, se calcula el gasto sólido de acuerdo a MP&M asociado a la serie de caudales modelados utilizando los ejes hidráulicos que entrega el programa HEC-RAS. Como cada uno de estos ejes está asociado a un caudal de la curva de duración, y este a su vez a un porcentaje dentro de la curva (intervalo de ocurrencia), es posible calcular el aporte durante el período de operación del embalse multiplicando el valor del gasto sólido de cada caudal por su porcentaje dentro de la curva de duración. De esta manera, cada caudal queda representado según el porcentaje de tiempo que históricamente ha existido durante los 39 años. La sumatoria de los valores de intervalo de ocurrencia multiplicados por el gasto sólido da como resultado el volumen en sedimento total durante la operación del embalse. Este cálculo se repite para todas las secciones transversales.

A continuación en la Figura 6.7 se muestran los resultados de la estimación del gasto sólido durante la operación del embalse como volumen transportado en mill. m³. En el eje de las abscisas se indican los perfiles transversales en el río Cachapoal, mientras en el eje de las ordenadas se muestra el gasto sólido total en la sección. El km 0 corresponde a la confluencia entre los ríos Cachapoal y Tinguiririca, el kilometraje aumenta en el sentido contrario al escurrimiento. Se utiliza una densidad del sedimento de 2,6 ton/m³ (Benítez, 1984).

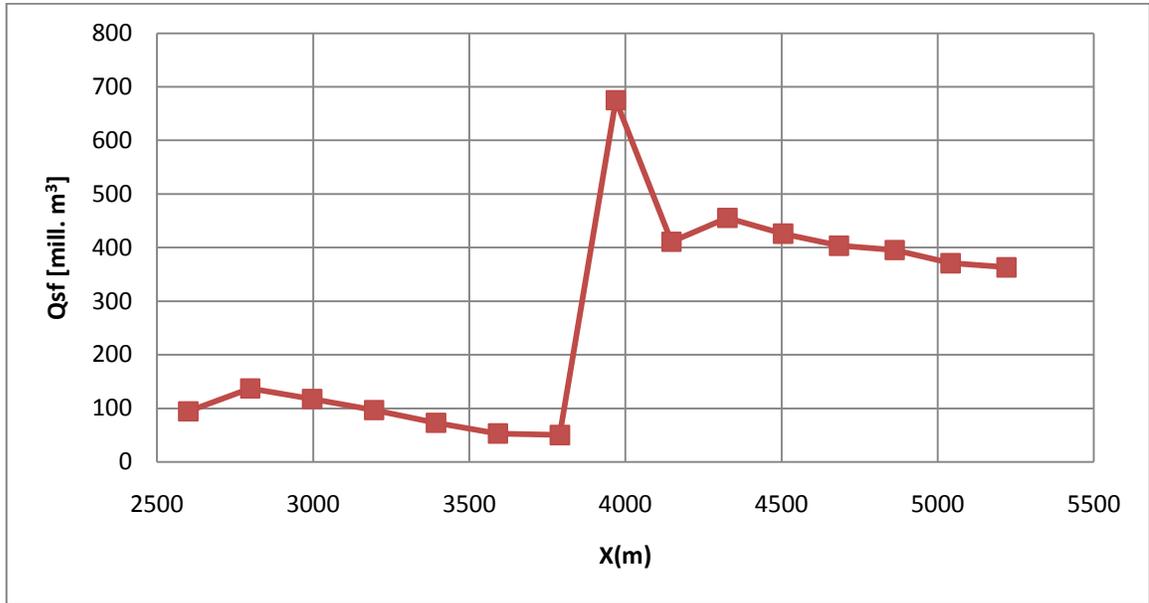


Figura 6.7 Gasto sólido de fondo en volumen transportado en secciones transversales del río Cachapoal utilizando Meyer Peter & Müller

En la Tabla 6.1 se detallan los resultados de la Figura 6.7.

Tabla 6.1 Gasto sólido de fondo como volumen transportado en el río Cachapoal

Sección	x (km)	Q _{sf} (mill. m ³)
XsC1	2.6	94
XsC2	2.8	137
XsC3	3.0	118
XsC4	3.2	97
XsC5	3.4	73
XsC6	3.6	53
XsC7	3.8	50
XsC8	4.0	675
XsC9	4.1	411
XsC10	4.3	455
XsC11	4.5	426
XsC12	4.7	404
XsC13	4.9	396
XsC14	5.0	371
XsC15	5.2	363

Es posible identificar dos sectores claros de tendencias en cuanto a magnitud del gasto sólido, entre los km 2.6 y 3.8 y otra tendencia entre los km 4.1 y 5.2. Esto indicaría que el río no está en equilibrio en este

tramo, y que se está produciendo un embanque entre los km 3.5 y km 4. Sin embargo, esta diferencia en el valor calculado del gasto sólido de estos dos tramos puede explicarse debido a la interpolación de los perfiles transversales realizada mediante el programa HEC-RAS. Existe una similitud entre los perfiles XsC1 y XsC7 como se puede observar en el Anexo IV (Anexo IV.I y Anexo IV.II), sin embargo el perfil XsC15 es distinto al poseer dos secciones preferentes de escurrimiento y un ancho menor al de los otros dos perfiles (Anexo IV.3). Al no poseer mayor información de otros perfiles, y considerando la similitud entre estos, se realiza el supuesto de que el primer tramo, entre las secciones XsC1 y XsC7 es representativo del gasto sólido en el río Cachapoal. Se elige este tramo para representar el gasto sólido potencial afluente al embalse, calculado como volumen transportado en millones de m³.

Se realiza un promedio en el valor de Q_{sf} del primer sector y se obtiene un valor aproximado, que se muestra en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Valor medio de gasto sólido de fondo en secciones del río Cachapoal

Sector	Q_{sf} [mill m ³]
km 2.6 a km 3.8	90

Para poder describir el volumen transportado de sedimento en volumen de sedimento depositado en el embalse es necesario suponer una porosidad en el lecho. Se considera una porosidad del 20%, que corresponde a un valor conservador para un lecho de grava y arena (U.S. Army Corps of Engineers, 1999) entregando el valor de gasto sólido en volumen de embanque que se describe en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Valor de gasto sólido de fondo como volumen embancado en el embalse Rapel aportado por el río Cachapoal

Sector	Vol. Emb. [mill m ³]
km 2.6 a km 3.8	113

La información de la Tabla 6.3 se explica como el volumen embancado de gasto sólido en el embalse Rapel para una operación de 39 años, aportado por el río Cachapoal suponiendo una porosidad del 20%.

A continuación se realiza el mismo tipo de cálculo de gasto sólido para el río Tinguiririca, utilizando la relación de Meyer Peter & Müller.

6.1.2. Caso Río Tinguiririca

Para el río Tinguiririca se utilizan las cuatro secciones transversales disponibles para interpolar 11 secciones hasta tener un total de 15 secciones aguas arriba del embalse. Las secciones se ubican entre los km 1.7 y 5.2 aguas arriba de la confluencia con el río Cachapoal, como se muestra en la Figura 6.8. El detalle de estas secciones se muestra en el Anexo IV.

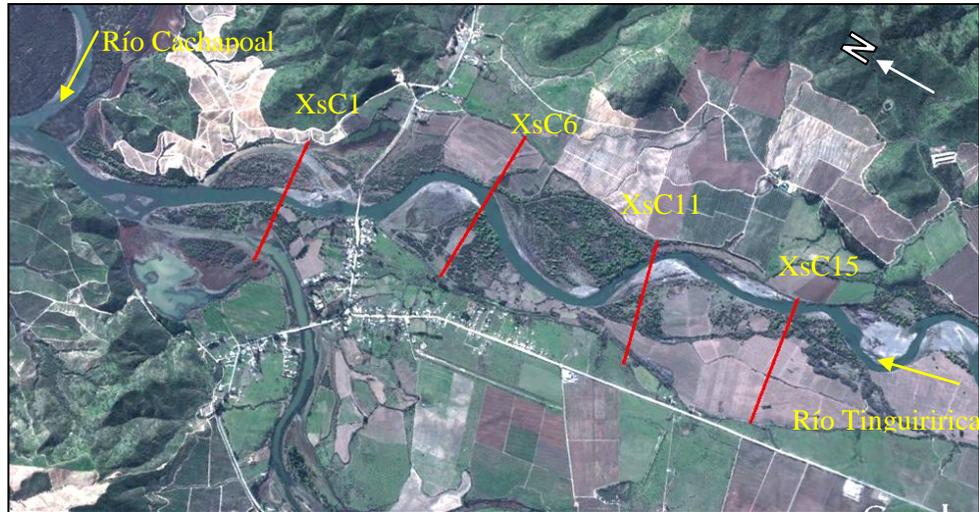


Figura 6.8 Perfiles en el Tinguiririca utilizados para el cálculo del gasto sólido

Utilizando el mismo método descrito para el río Cachapoal se obtienen los valores de gasto sólido como volumen transportado total para las 15 secciones transversales, utilizando los valores de caudales de la curva de duración descrita en la Figura 6.2. En la Figura 6.9 se muestra el gasto sólido de fondo calculado para las secciones en el río Tinguiririca para una condición de aguas debajo de la misma forma que para el caso del río Cachapoal, con una pendiente similar a un escurrimiento normal.

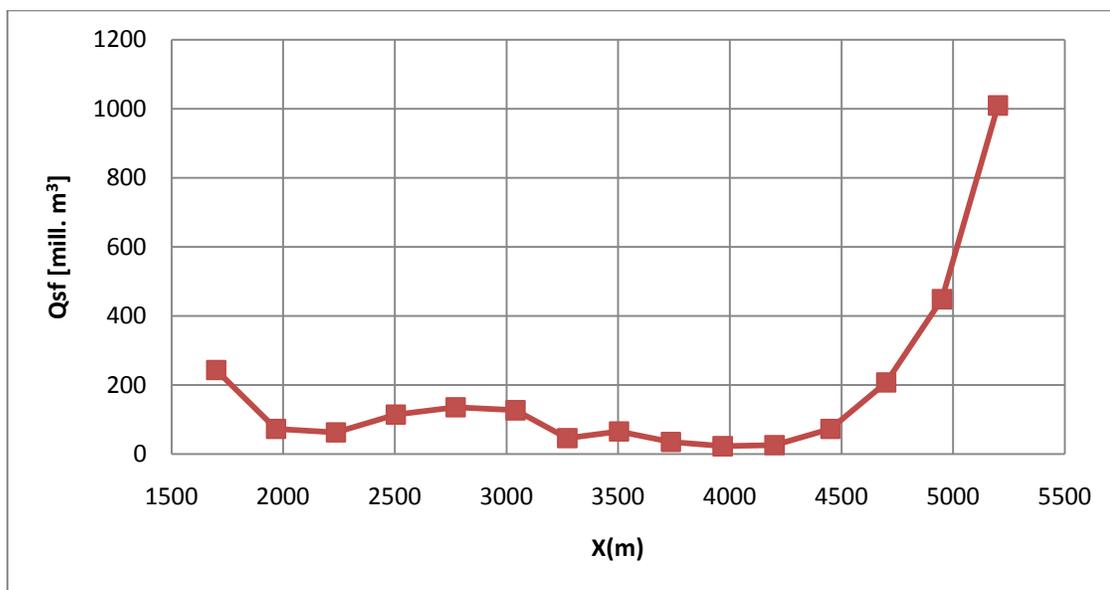


Figura 6.9 Gasto sólido de fondo expresado como volumen transportado en secciones transversales del río Tinguiririca utilizando Meyer Peter & Müller

En la Tabla 6.4 se detallan los resultados de la Figura 6.9.

Tabla 6.4 Gasto sólido de fondo como volumen transportado en río Tinguiririca

Sección	x (km)	Q _{sf} (mill. m ³)
XsT1	1.7	243
XsT2	2.0	73
XsT3	2.2	63
XsT4	2.5	114
XsT5	2.8	135
XsT6	3.0	127
XsT7	3.3	46
XsT8	3.5	66
XsT9	3.7	35
XsT10	4.0	23
XsT11	4.2	26
XsT12	4.5	73
XsT13	4.7	207
XsT14	5.0	448
XsT15	5.2	1009

Al igual que en el caso del río Cachapoal, para el cálculo del gasto sólido en forma de volumen total transportado en el río Tinguiririca existen diferencias importantes en los resultados de las distintas secciones. Aunque la mayoría de las secciones posee un volumen total transportado menor a 200 mill. m³, existen cuatro que poseen valores mayores. Esta diferencia indicaría un desequilibrio sedimentológico que

no se condice con una situación de un cauce natural. Sin embargo, es posible explicar esta diferencia al mirar en detalle la geometría de los perfiles transversales. En el caso de la sección XsT15, tal como se puede ver en el Anexo IV.7, existe un estrechamiento que provoca una aceleración del flujo en este sector y en las secciones interpoladas inmediatamente adyacentes, lo que explicaría el aumento en el valor de gasto sólido calculado para estas secciones (XsT13, XsT14 y XsT15). En el caso de la sección XsT1 (Anexo IV.4), como se aprecia en la Figura 6.8, parte de la sección corresponde a un estero afluente al río Tinguiririca. De acuerdo a lo anterior, se consideran como representativas las secciones ubicadas entre el km 2.0 y el km 4.7. Para estas secciones, que presentan un valor de volumen transportado total similar, se calcula el promedio de este valor, obteniendo el resultado que se muestra en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 Valor medio de gasto sólido de fondo en secciones del río Tinguiririca

Sector	Q_{sf} [mill m ³]
km 2.0 a km 4.7	71

Para poder describir el volumen transportado de sedimento como volumen de sedimento depositado en el embalse es necesario suponer una porosidad en el lecho. Al igual que en el caso anterior se considera una porosidad del 20%, entregando el valor de gasto sólido en volumen de embanque que se describe en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6 Valor de gasto sólido de fondo como volumen embancado dentro del embalse Rapel, aportado por el río Tinguiririca

Sector	Vol. Emb. [mill m ³]
km 2.0 a km 4.7	89

La información de la Tabla 6.6 se explica como el volumen embancado de gasto sólido en el embalse Rapel para una operación de 39 años, aportado por el río Tinguiririca, suponiendo una porosidad del 20%.

6.2. Cálculo del gasto sólido de fondo utilizando la relación de Wilcock & Crowe

El método de Wilcock & Crowe se diferencia de otros métodos como el de Meyer Peter & Müller por incorporar en el cálculo el hecho de que la granulometría del lecho no sea uniforme, con distintos tamaños que interactúan entre sí mediante procesos como los de sobreexposición y escondimiento. A su vez, este

enfocado al problema del arrastre de sedimentos considera que el contenido de arenas induce un importante efecto no lineal en el transporte de las gravas, que no puede ser excluido del análisis.

Mediante experimentos de laboratorio, Wilcock & Crowe (2003) desarrollaron una formulación para el transporte que depende de las fracciones que ocupan los distintos diámetros de la coraza dentro de la curva granulométrica.

El término que relaciona los efectos de escondimiento y sobreexposición es el siguiente:

$$\frac{\tau_{ri}}{\tau_{rm}} = \left(\frac{d_{si}}{d_{sm}} \right)^b \quad (6.7)$$

τ_{ri} es un esfuerzo de corte de referencia calculado para cada diámetro de la curva granulométrica. τ_{rm} es el esfuerzo de corte para el diámetro medio d_{sm} de la muestra y d_{si} es el diámetro de la fracción *i-ésima*. El exponente *b* está dado por:

$$b = \frac{0.67}{1 + \exp(1.5 - d_{si}/d_{sm})} \quad (6.8)$$

El término τ_{rm} en su forma adimensional es $\tau_{rm}^* = \tau_{rm}/(\rho g R d_{sm})$ con el porcentaje de arena presente en la capa superficial, *F_s*, según la siguiente expresión:

$$\tau_{rm}^* = 0.021 + 0.015 \exp(-20F_s) \quad (6.9)$$

La ley de gasto propuesta finalmente es:

$$W_{si}^*(\phi) = \begin{cases} 0.002\phi^{7.5} & \phi < 1.35 \\ 14(1 - 0.894/\phi^{0.5})^{4.5} & \phi \geq 1.35 \end{cases} \quad (6.10)$$

$$\phi = \frac{\tau}{\tau_{ri}} \quad (6.11)$$

τ es el esfuerzo de corte del flujo. La relación entre W_{si}^* y el gasto sólido por unidad de ancho q_{si} es la que sigue:

$$(6.12)$$

$$q_{si} = \frac{W_{si}^* u_*^3 F_i}{Rg}$$

De esta manera, si sumamos sobre los diámetros de la curva granulométrica se obtiene el gasto sólido total.

$$Q_s = \sum_i \frac{W_{si}^* u_*^3 b F_i}{Rg} \quad (6.13)$$

Al igual que en el caso de Meyer Peter y Müller, el cálculo del gasto sólido se realiza mediante franjas o subsecciones que sean representativas del comportamiento hidráulico del cauce (ver Figura 6.5).

La formulación de Wilcock & Crowe utiliza diámetros de arenas entre los 0.5 mm y 2.0 mm. No existe información del porcentaje de arena entre estos diámetros en las curvas granulométricas presentadas en las Figuras 6.3 y 6.4. Debido a esto y de modo arbitrario se adopta tres valores de porcentajes de arenas en las curvas granulométricas de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, 5%, 10% y 15%. Ante la falta de información se realiza una comparación entre usar distintos porcentajes de arenas dentro de la curva granulométrica utilizando este método.

6.2.1. Caso Río Cachapoal

Se utiliza los mismos ejes hidráulicos y secciones transversales descritas en el punto 6.1.1. Para cada sección se calcula el gasto sólido de fondo en la forma de volumen transportado (mill. m³). Los resultados para los distintos porcentajes de arena considerados se presentan en la Figura 6.10.

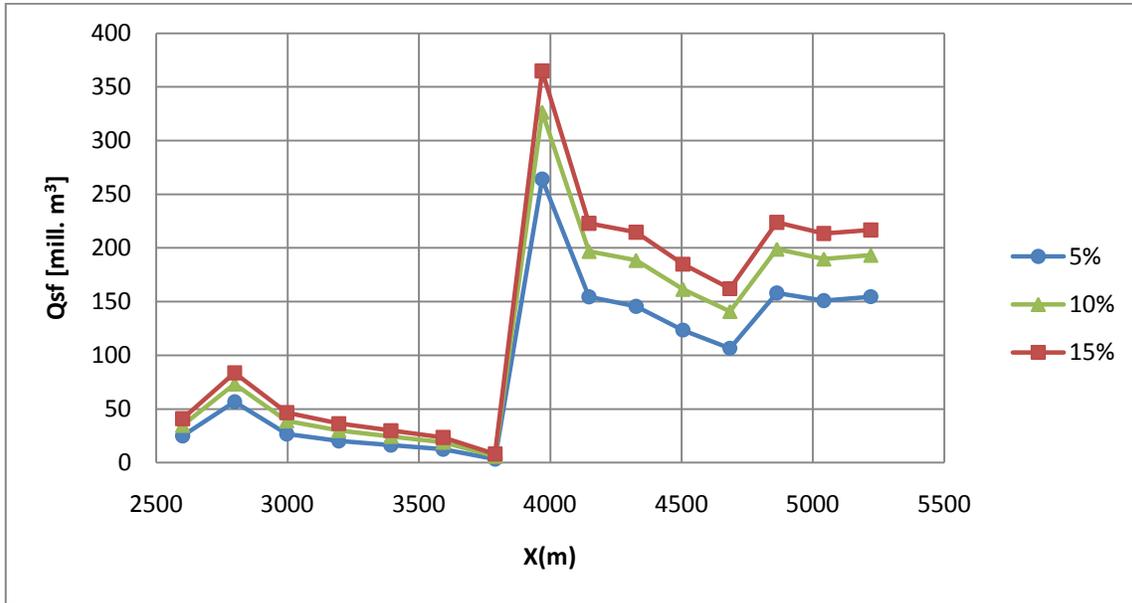


Figura 6.10 Gasto sólido como volumen transportado total en secciones del río Cachapal utilizando Wilcock & Crowe y tres porcentajes distintos de arenas en la curva granulométrica

El detalle de los resultados de la Figura 6.10 se presentan en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7 Gasto sólido de fondo como volumen transportado en secciones del río Cachapal

Sección	x (km)	5%	10%	15%
		Q_{sf} (mill. m ³)	Q_{sf} (mill. m ³)	Q_{sf} (mill. m ³)
XsC1	2.6	25	35	41
XsC2	2.8	57	73	84
XsC3	3.0	27	39	47
XsC4	3.2	20	30	36
XsC5	3.4	16	25	30
XsC6	3.6	13	19	23
XsC7	3.8	3	6	8
XsC8	4.0	264	327	365
XsC9	4.1	155	197	223
XsC10	4.3	146	188	215
XsC11	4.5	123	162	185
XsC12	4.7	107	141	162
XsC13	4.9	158	199	224
XsC14	5.0	151	190	213
XsC15	5.2	155	193	217

Al igual que lo visto en el cálculo del gasto sólido mediante Meyer Peter & Müller, existen diferencias importantes en dos sectores de los perfiles analizados. Se hace el mismo análisis que en el caso anterior,

en el punto 6.1.1, y se considera que la sección representativa del gasto sólido en el río Cachapoal es la que corresponde al tramo entre el km 2.6 y el km 3.8. Para este tramo, la Tabla 6.8 muestra el promedio del gasto sólido total como volumen transportado para cada porcentaje de arenas supuesto en la curva granulométrica.

Tabla 6.8 Valor medio de gasto sólido de fondo como volumen transportado para tres porcentajes de arenas

Q _{sf} [mill m ³]	% de arenas		
	5%	10%	15%
km 2.6 a km 3.8	23	32	38

Se utiliza un valor de 20% de porosidad para describir el gasto sólido de fondo como volumen de embanque en el embalse Rapel, solo para efectos de comparación. Utilizando este valor, en la Tabla 6.9 se muestra el volumen de sedimento embancado que ha sido aportado por el río Cachapoal.

Tabla 6.9 Valor de gasto sólido de fondo aportado por el río Cachapoal como volumen embancado dentro del embalse Rapel

Vol. Emb. [mill m ³]	% de arenas		
	5%	10%	15%
Sector 1	28	40	48

6.2.2. Caso Río Tinguiririca

Se utilizan las mismas secciones descritas anteriormente en el punto 6.1.2.

Utilizando el mismo método descrito para el río Cachapoal se obtiene los valores de gasto sólido total en la forma de volumen transportado de sedimento para las 15 secciones transversales y para los tres porcentajes de arena definidos. Estos resultados se muestran en la Figura 6.11.

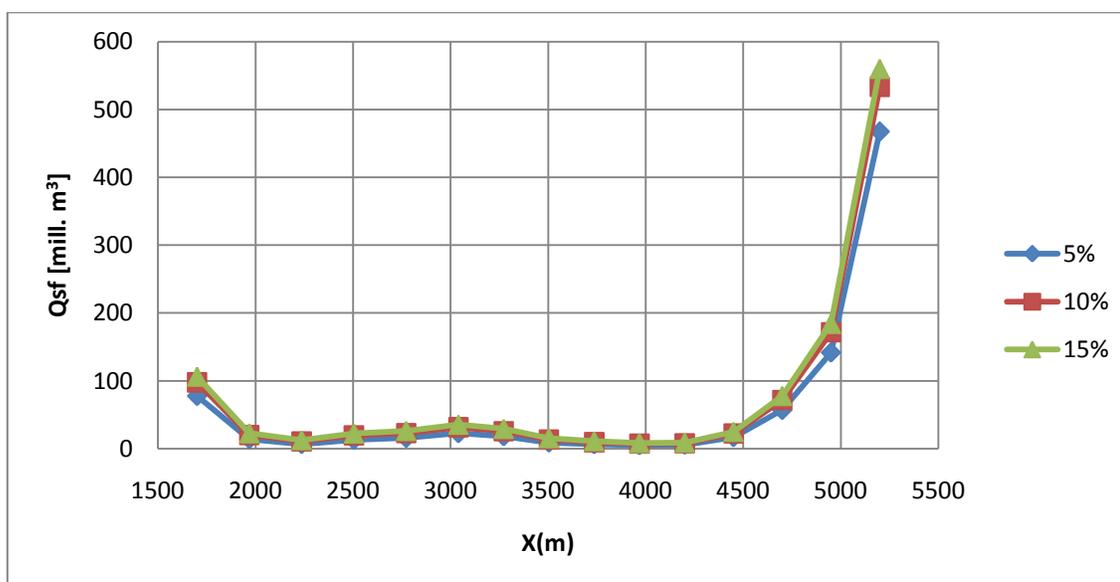


Figura 6.11 Gasto sólido de fondo en secciones del río Tinguiririca utilizando Wilcock & Crowe y tres porcentajes distintos de arenas en la curva granulométrica

El detalle de los resultados de la Figura 6.11 se muestran en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10 Gasto sólido de fondo como volumen transportado en secciones del río Tinguiririca

Sección	x (km)	5%	10%	15%
		Q _{sf} (mill. m ³)	Q _{sf} (mill. m ³)	Q _{sf} (mill. m ³)
XsT1	1.7	78	98	106
XsT2	2.0	14	20	23
XsT3	2.2	7	11	13
XsT4	2.5	13	19	22
XsT5	2.8	16	23	26
XsT6	3.0	23	32	35
XsT7	3.3	18	26	29
XsT8	3.5	9	13	15
XsT9	3.7	6	10	11
XsT10	4.0	5	7	9
XsT11	4.2	6	8	9
XsT12	4.5	17	22	25
XsT13	4.7	57	72	78
XsT14	5.0	142	172	184
XsT15	5.2	467	533	560

Realizando el mismo análisis que en el punto 6.1.2, se observa que el gasto sólido de fondo de las secciones XsT1, XsT14 y XsT15 está por sobre los valores obtenidos en promedio por las otras secciones. Debido a las consideraciones descritas en el punto 6.1.2, se considera que el tramo comprendido entre el

km 2.0 y el km 4.7 es el representativo del aporte de gasto sólido del río Tinguiririca. Los resultados del promedio del

Tabla 6.11 Valor medio de aporte de gasto sólido de fondo como volumen transportado para tres porcentajes de arenas

Q _{sf} [mill m ³]	% de arenas		
	5%	10%	15%
Sector 1	16	22	25

Se considera un valor de porosidad del 20% para describir el gasto sólido de fondo aportante del río Tinguiririca al embalse Rapel como volumen embancado. Los valores calculados para cada porcentaje de arenas considerado se presentan en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12 Valor medio de gasto sólido de fondo aportado por el río Tinguiririca como volumen embancado dentro del embalse Rapel

Vol. Emb. [mill m ³]	% de arenas		
	5%	10%	15%
Sector 1	20	27	31

6.3. Comparación del embanque medido en terreno y el calculado por fórmulas empíricas

Si se considera que los volúmenes de embanque en el embalse Rapel calculados en las secciones 6.1 y 6.2 corresponden a sedimento grueso que ha depositado de manera preferente en el delta de sedimentos descrito en el Capítulo 4, es posible comparar ambos resultados, el embanque medido en terreno y el cálculo realizado mediante las formulaciones empíricas de Meyer Peter & Müller y Wilcock & Crowe, tomando en cuenta los supuestos utilizados, como son la porosidad del embanque, porcentaje de arena, tramos representativos de los ríos Cachapoal y Tinguiririca y la distribución preferente en el delta del sedimento grueso.

A continuación, se compara el gasto sólido como volumen embancado calculado mediante cada formulación empírica.

6.3.1. Volumen de sedimento depositado según relación de Meyer Peter & Müller

Mediante lo expuesto en las Tablas 6.3 y 6.6, el valor total de volumen embancado calculado mediante el método de Meyer Peter & Müller es el que se describe en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13 Valores de volumen de depósito de sedimento

Río	Vol. Embanque (mill. m ³)
Cachapoal	113
Tinguiririca	89
Total embalse	202

6.3.2. Volumen de sedimento depositado según relación de Wilcock & Crowe

Dado que no se dispone de datos de porcentaje de arenas en las curvas granulométricas de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, se utiliza un valor arbitrario de 10% para realizar la comparación entre el volumen de embanque calculado mediante la relación de Wilcock & Crowe y el volumen calculado mediante las mediciones de terreno. El resultado de este cálculo se muestra en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14 Valores de volumen de depósito de sedimento

Río	Vol. Embanque (mill. m ³)
Cachapoal	40
Tinguiririca	27
Total embalse	67

6.3.3. Comparación con volumen de embanque medido en terreno

En la Tabla 6.15 se muestra la comparación del embanque medido en terreno con lo obtenido mediante las fórmulas empíricas de gasto sólido

Tabla 6.15 Comparación de volumen de embanque medido en terreno y relaciones empíricas

Método de cálculo	Vol. Embanque (mill. m ³)
Meyer Peter & Müller	202
Wilcock & Crowe	67
Mediciones de terreno	159

A pesar de la amplia variabilidad en los resultados que resultan del cálculo de gasto sólido mediante relaciones empíricas, los valores entregados en la Tabla 6.15 poseen un rango acotado y definido de magnitud. Es necesario tener en cuenta los supuestos considerados en el cálculo de estos valores para poder analizar estos resultados en perspectiva.

Los valores del volumen de embanque calculado en el Capítulo 4 corresponden al valor geométrico de embanque, donde se incluye el volumen de vacíos del sedimento depositado. En el caso del volumen de embanque calculado mediante las relaciones empíricas este volumen de vacíos es representado por una porosidad del 20%. Este valor debe ser chequeado mediante la extracción de muestras del lecho para una comparación más certera. De igual manera los supuestos utilizados en el Capítulo 4, como la distribución de sedimentos gruesos en el delta y perfiles paralelos para el cálculo del volumen de sedimento depositado, son fuentes de incertidumbre para el cálculo realizado. Otras fuentes de error son el suponer un número discreto de caudales representativos de la curva de duración y un porcentaje de arenas en la curva granulométrica. Todas estas consideraciones es necesario tenerlas en cuenta al momento de analizar los resultados obtenidos.

7. Conclusiones

7.1. Conclusiones generales

En la presente memoria se analizaron algunas aristas de la sedimentación en el embalse Rapel. En la primera etapa se recopilaron antecedentes de batimetría del embalse previa a su llenado y actualizada, caudales líquidos y gasto sólido en suspensión, descripción de la hidrografía y el régimen sedimentológico de los ríos afluentes al embalse. Utilizando los valores de caudales y gasto sólido en suspensión disponibles de las estaciones fluviométricas de Cachapoal en Puente Arqueado y Tinguiririca en Los Olmos se proponen una serie de ajustes potenciales entre caudal y GSS dependiendo si se trata de períodos nivales o pluviales. Estas relaciones pueden ser de utilidad para futuros trabajos de investigación en el embalse.

En la segunda etapa se realizó un trabajo de terreno utilizando una ecosonda, mediante la cual se hizo un perfil actualizado de la cota de fondo del embalse en toda su longitud, complementando las mediciones realizadas por ENDESA el año 2010. Utilizando estas mediciones y lo recopilado en la primera etapa se estimó los volúmenes de sedimento acumulado en el embalse Rapel.

En una tercera etapa se utiliza un modelo numérico (MOSSEM) para la estimación del gasto sólido afluente al embalse y para modelar el avance de un delta de sedimentos para el período de operación del embalse. Se hacen recomendaciones y alcances sobre la aplicabilidad de este método en el embalse Rapel.

En una cuarta etapa se realiza una estimación del gasto sólido afluente al embalse mediante las relaciones de Meyer Peter & Müller y Wilcock & Crowe. Para esto se identificó tramos y secciones naturales aguas arriba del embalse donde se analizó el gasto sólido de equilibrio. Se explican las diferencias entre los resultados de estas dos relaciones y se recomienda el uso de una de ellas. Además se realiza una comparación entre el valor de volumen de embanque medido en terreno y las relaciones que gasto sólido permite hacerse una idea de la variabilidad que poseen estos valores. De esta manera, se puede estimar el rango de confianza que tienen las estimaciones, basados en lo observado en un embalse como Rapel que posee más de 40 años de operación a la fecha.

7.2. Situación actual de depósito de sedimentos en el embalse Rapel

Considerando los perfiles batimétricos del año 1968 y del año 2010, se calculó un valor aproximado de 159 mill. m³ de sedimento grueso y de 18 mill. m³ de sedimento fino. El cálculo de estos valores incluye el supuesto teórico de que se espera que el sedimento fino de manera preferente se movilice hacia el muro y no permanezca sobre el delta ni en su talud de aguas abajo. Así mismo, teóricamente el sedimento grueso no sería capaz de moverse más allá del pie del delta.

Las mediciones efectuadas mediante el equipo de ecosonda BATHY muestran diferencias en la distribución de los sedimentos en los perfiles transversales lo largo del embalse. En la Figura 3.12 se puede apreciar en el perfil que el lecho es plano. Si se compara este perfil con la Figura 3.9 que corresponde a un perfil transversal cercano al muro (donde es más probable que solo existan sedimentos finos) se puede ver la diferencia en el patrón de depósito. Es posible que esta diferencia en la forma del lecho indique la presencia de sedimento fino o grueso, sin embargo, es necesaria la extracción de muestras del lecho a lo largo del embalse para discriminar cuando comienza a predominar uno u otro tipo de depósito.

A pesar de que existen mediciones de depósito de sedimentos en el embalse Rapel efectuadas por ENDESA en los años 1984 y 1998 no es posible hacer un seguimiento de la evolución histórica de volúmenes de embanque dentro del embalse. Dada la escasa cantidad de datos y las diferentes metodologías utilizadas en cada estudio estos valores son solo de referencia y no representan un seguimiento metódico que permita concluir acerca de una tasa de embanque general.

7.3. Cálculo preliminar utilizando un modelo computacional (MOSSEM)

En la aplicación de MOSSEM en el embalse Rapel se identificaron aspectos que requieren mayor análisis en estudios futuros. Entre estas se puede mencionar que no se puede definir una sección trapezoidal que represente el escurrimiento en el río Rapel. Esto debido a que existen zonas con un ancho que supera los dos kilómetros, con la consecuente aparición de numerosos brazos y canales preferentes de flujo. La utilización de una sección trapezoidal para todo el ancho es una simplificación que condiciona el resultado de la modelación. Es necesario distinguir además entre la sección hidráulica y la sección donde se produce en mayor parte el transporte de sedimento e incluir esta diferencia en futuras modelaciones y trabajos.

La Figura 7.1 muestra la diferencia que existe en el flujo dentro del embalse Rapel para dos condiciones distintas de caudal. Esta diferencia en el ancho de la sección a considerar hace del embalse Rapel un sistema especialmente difícil para modelar mediante una única sección trapezoidal.

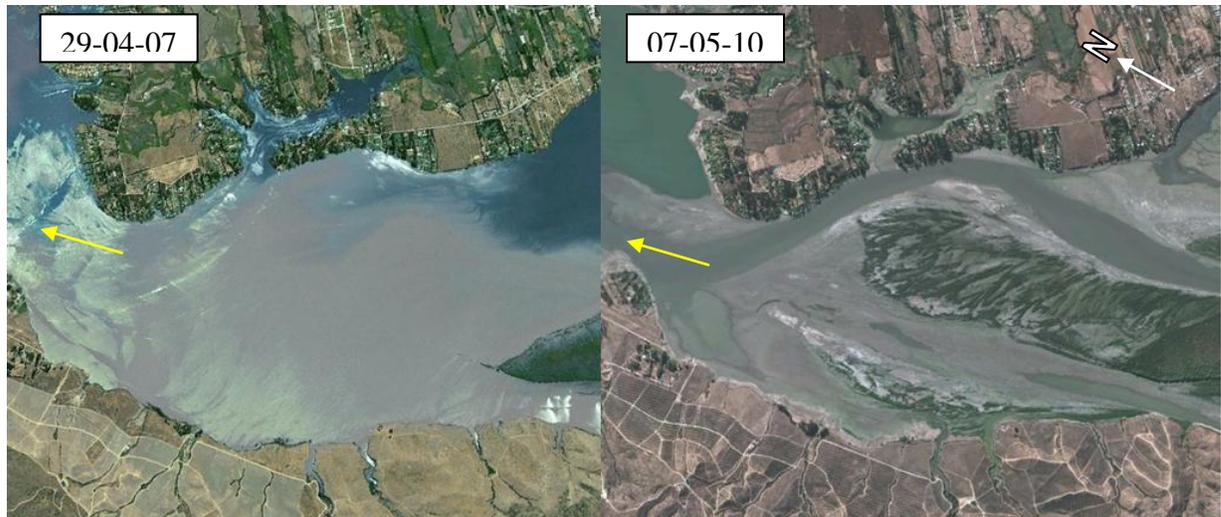


Figura 7.1 Para dos condiciones de caudal distintas, el escurrimiento ocurre por una sección de 2 km o 200 m

Entre los aspectos más importantes a considerar en trabajos futuros se encuentran la forma de tratar la condición de borde de aguas arriba, realizando análisis que entreguen indicios de condiciones especiales de depósito o condiciones de borde para el problema. Además de esto es de especial importancia la relación de gasto sólido utilizada, el uso de la caja sedimentológica del río en lugar de la caja hidráulica y la representatividad de la granulometría. De estos aspectos, la condición de borde de aguas arriba parece ser la que influye de mayor manera en el desarrollo del delta. Por último, la modelación de un período extenso como son los 39 años de operación del embalse Rapel lleva a que las fuentes de incertidumbre y error asociadas a los supuestos magnifiquen su peso relativo en los resultados de la simulación.

7.4. Estimación del gasto sólido de fondo afluente al embalse

La principal limitación de los métodos empíricos de estimación de gasto sólido o arrastre de fondo es la amplia dispersión de los resultados. Esto lleva a una amplia incertidumbre en la magnitud del valor por adoptar. Esto se debe a que las relaciones de gasto sólido son estimadas mediante la realización de ensayos de laboratorios o ríos que pueden no corresponder a la realidad de los ríos chilenos.

Es importante contar con datos de batimetría confiable que permita aislar fenómenos locales de pendiente o geometría que alteran los resultados. Con este fin se utilizan tres secciones en el caso del río Cachapoal y cuatro en el Tinguiririca para el cálculo del gasto sólido aguas arriba del embalse.

La estimación del gasto sólido por los métodos de Meyer Peter & Müller (MP&M) y Wilcock & Crowe (W&C) permite contrastar dos relaciones que difieren en la manera de afrontar el problema del arrastre de los sedimentos. MP&M es ampliamente utilizado por su simplicidad, supone una granulometría del lecho uniforme, dejando de lado el efecto de interacciones entre partículas de diferentes tamaños (sobreexposición y escondimiento). W&C por otra parte si considera estos efectos, entregando resultados generalmente distintos a los entregados por el método de MP&M.

Al realizar el cálculo del gasto sólido para los ríos Cachapoal y Tinguiririca es necesario discriminar cuales son las secciones que son representativas del escurrimiento natural del río. Esto se hace mediante el análisis de los perfiles transversales, disponibles en el Anexo IV, donde se descartan aquellas secciones que poseen singularidades que hagan variar de manera importante el escurrimiento del río. Debido a que las relaciones de MP&M y W&C son proporcionales al valor del esfuerzo de corte, y este a su vez de la pendiente de la línea de energía, las singularidades hidráulicas, como el estrechamiento del cauce o la división del flujo principal hacen que el gasto sólido sea mucho mayor en estas secciones que en el resto. Esto hace necesario el análisis detallado de las secciones y ejes hidráulicos que permitan determinar cuáles son los tramos representativos de cada río. Sin duda esta discrecionalidad en la elección de dichos tramos trae como consecuencia una fuente de incertidumbre a la estimación del volumen de depósito en el embalse Rapel.

La relación de Meyer Peter & Müller produce un gasto sólido mayor que la relación de Wilcock & Crowe. Esta última tiene una dependencia directa con el porcentaje de arenas presentes en la curva granulométrica, la que es sensibilizada para valores de 5, 10 y 15%. De los dos métodos, el de MP&M entrega los resultados más aproximados al embanque medido en terreno, con un 27% de diferencia por sobre el valor medido en terreno. Sin embargo, debido a la gran cantidad de supuestos utilizados no es posible concluir acerca de este resultado.

Con el objetivo de reducir la incertidumbre en el cálculo del gasto sólido mediante formulaciones empíricas, es necesaria la utilización de la mayor cantidad posible de secciones, con el objetivo de aislar los errores producidos por singularidades hidráulicas y encontrar tendencias en los valores de gasto sólido en los tramos de ríos analizados.

Aunque entregue buenos resultados, el método de MP&M para el cálculo del gasto sólido no representa físicamente las condiciones naturales de los ríos chilenos, por ejemplo, la granulometría extendida. Es por esto que se recomienda el uso de métodos actualizados como el de W&C que incluyen las interacciones entre las partículas propias de una granulometría extendida en la coraza del río.

7.5. Comentarios finales

El espíritu del presente trabajo es ofrecer un enfoque en varios frentes acerca de la sedimentación en el embalse Rapel. Debido a la complejidad del problema existen muchos supuestos utilizados que impiden obtener resultados precisos, especialmente en lo que respecta al cálculo del volumen de depósito en el embalse. Sin embargo, es posible obtener algunos resultados que son de utilidad para su utilización en trabajos futuros en el embalse. Dentro de estos resultados se destaca la relación entre caudal líquido y gasto sólido en suspensión, que actualiza el trabajo de Benítez (1984) ampliando la estadística de caudales utilizada. En la misma línea, la actualización de la cota de fondo del embalse mediante la complementación de los datos obtenidos por ENDESA en la cabecera del embalse por los datos medidos en terreno utilizando una ecosonda serán sin duda de beneficio para otros trabajos que puedan desarrollarse a futuro en el Rapel.

La utilización de modelos numéricos para la representación de sistemas fluviales es de una amplia utilización hoy en día. Es necesario un entendimiento cabal de los fenómenos involucrados al realizar estas modelaciones para comprender sus resultados y evaluar posibles correcciones. En el caso del modelo MOSSEM, a pesar de representar el avance del delta, es necesario ajustar algunos parámetros como la condición de borde de aguas arriba para que este avance sea similar al que presenta el delta en el embalse Rapel. La utilización de secciones trapezoidales de ancho único también parece ser una limitante del modelo, que sin duda puede ser corregido para una modelación futura, utilizando los antecedentes recogidos en este trabajo.

La utilización de relaciones empíricas para el cálculo del volumen embancado es una técnica que es posible utilizar para una estimación rápida del gasto sólido afluente al embalse. Sin embargo, dada la cantidad de supuestos utilizados en este cálculo es necesario guardar las proporciones de su precisión. Teniendo en consideración esto último, la utilización de un método como el de Wilcock & Crowe es recomendada debido a su representación física de los fenómenos involucrados en el transporte de sedimentos.

De los trabajos pendientes en el embalse Rapel, la extracción de muestras del lecho a lo largo del embalse en forma de testigos permitiría evaluar la porosidad del sedimento depositado y la distribución de granulometría, lo que serviría para una caracterización de la manera en que se distribuyen los sedimentos finos y gruesos dentro del embalse, reduciendo en gran parte la incertidumbre en los cálculos de volúmenes de sedimento depositado.

Referencias

ASTUDILLO J., TAMBURRINO A. 2005. La modelación numérica como herramienta hidrofluvial. Análisis del modelo 1D MIKE11. XVII Congreso Chileno de Hidráulica.

BENITEZ, A. 1984. Estimación de la sedimentación en el embalse Central Rapel, Endesa

CNE, Cotas y Energía de Embalses. 2010. Pagina web de la Comisión Nacional de Energía www.cne.cl

DE LA FUENTE, A., NIÑO, Y. 2008. Pseudo 2D ecosystem model for a dendritic reservoir. Journal of Ecological Modelling Vol213, pp. 389-401.

DGA, CADE-IDEPE 2004. Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Rapel. Ministerio de Obras Públicas.

EMMETT, W.W., 1980. A Field Calibration of the Sediment Trapping Characteristics of the Helley-Smith Bed Load Sampler. Geological Survey Professional Paper 1139, Washington, USA.

ENDESA, División de Estudios Hidrológicos 1990. Estimación de la sedimentación en la Central Ralco.

GAJARDO, M., 2003. Estudio del Manejo de Sedimentos en el Embalse Puntilla del Viento, Cuenca del Río Aconcagua, V Región, Mediante el Uso de dos Softwares. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

GONZÁLEZ, J. 2006. Sedimentación en embalses considerando el efecto de corrientes de turbidez: desarrollo e implementación de un modelo matemático y numérico. Memoria de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

INBAR, M. 1992. Rates of Fluvial Erosion in Basins with a Mediterranean Type Climate. CATENA, vol.19, pp. 393-409, Cremlingen, Alemania.

ENDESA, 2010. Informe Técnico. Estudio Embarque Sector Llallauquén.

MEYER-PETER. E., & MÜLLER, R. 1948. Formulas for Bedload Transport., Proceedings, 2nd Congress I.A.H.R., Stockholm.

NIÑO, Y. 2005. Mecánica Fluvial y Transporte de Sedimentos, Curso Transporte Hidráulico de Sólidos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2005.

SCHUMM AND MEYER. 1979. "Morphology of Alluvial Rivers of the Great Plains". Great Plains Agricultural Council Publication 91, pp 9-14.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1999. Engineering and Design Groundwater Hydrology. Engineer Manual 1110-2-1421, pp 2-6.

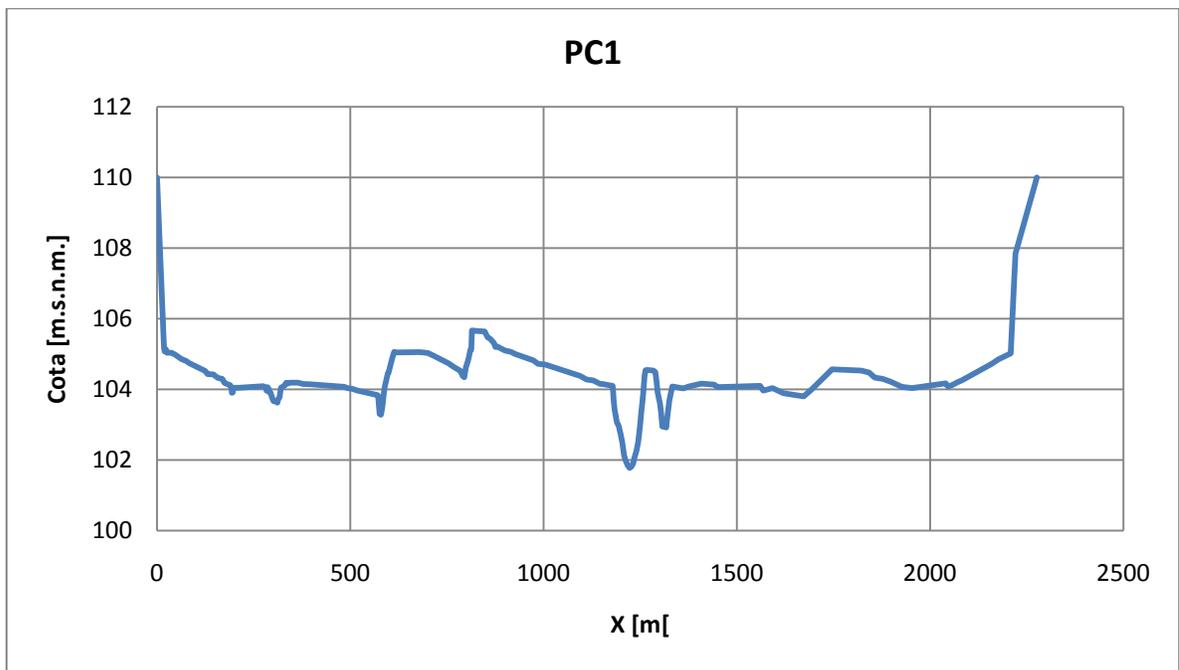
WILCOCK, P., & CROWE, C. 2003 "Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment."

Anexo I
Perfiles año 1968, ENDESA

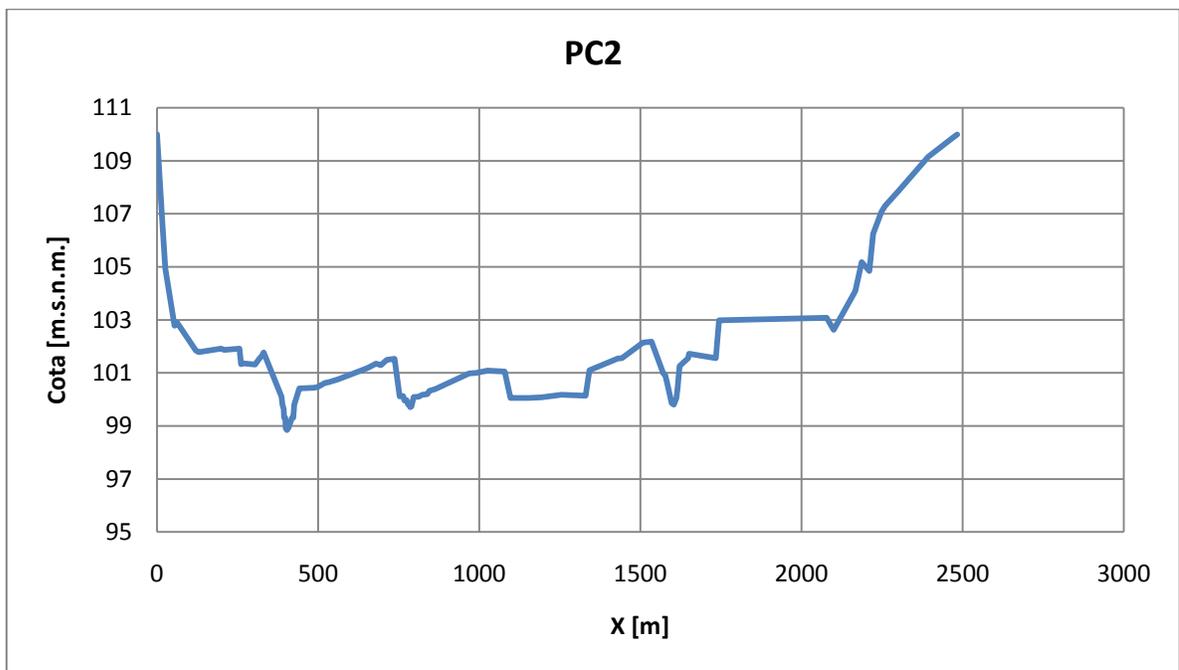
Anexo I: Perfiles año 1968, ENDESA

Anexo I.1 Tabla con numeración de perfiles año 1968

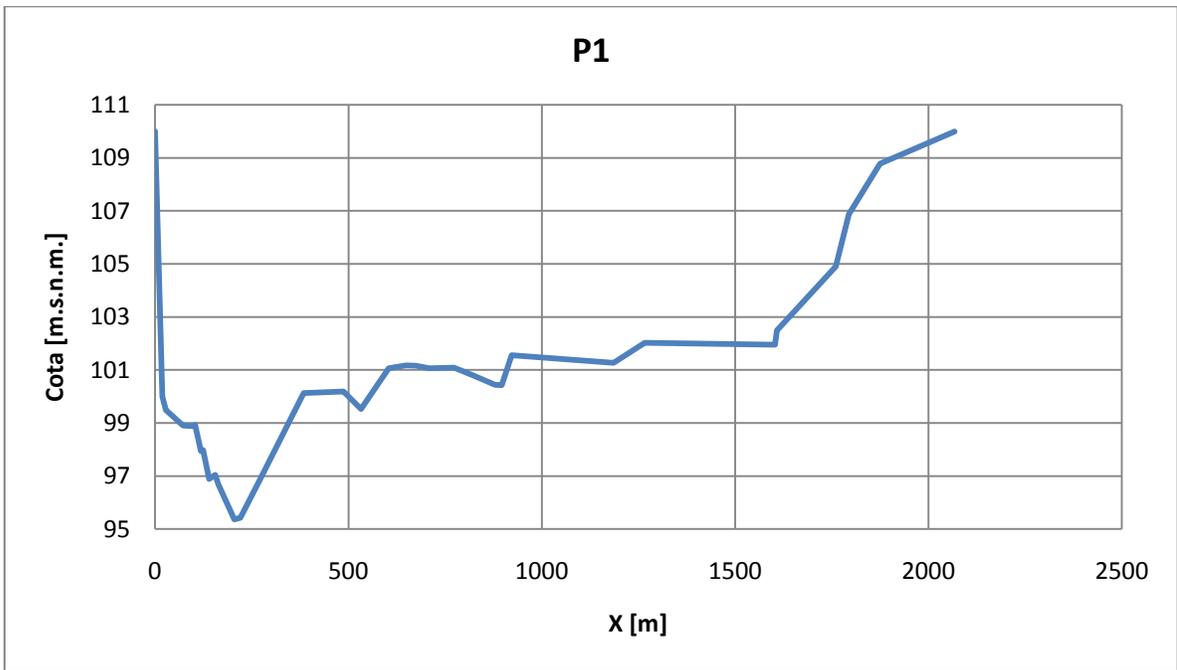
Perfil	Cota inferior	km
PC1	102	35.9
PC2	99	34.7
P1	95	33.4
P2	94	32.3
P3	93	30.5
P4	91	29.8
P5	90	28.9
P6	87	28.1
P7	86	26.6
P8	84	25.1
P9	84	23.9
P10	81	23.1
P11	81	21.8
P12	79	20.7
P13	78	19.5
P14	75	18.4
P15	72	16.4
P16	72	15.2
P17	70	14.1
P18	69	13.0
P19	64	11.5
P20	61	10.1
P21	53	9.0
P22	46	8.1
P23	48	7.1
P24	43	6.2
P25	40	5.2
P26	35	3.9
P27	28	2.9
P28	30	2.0
P29	21	1.0
P30	16	0.0



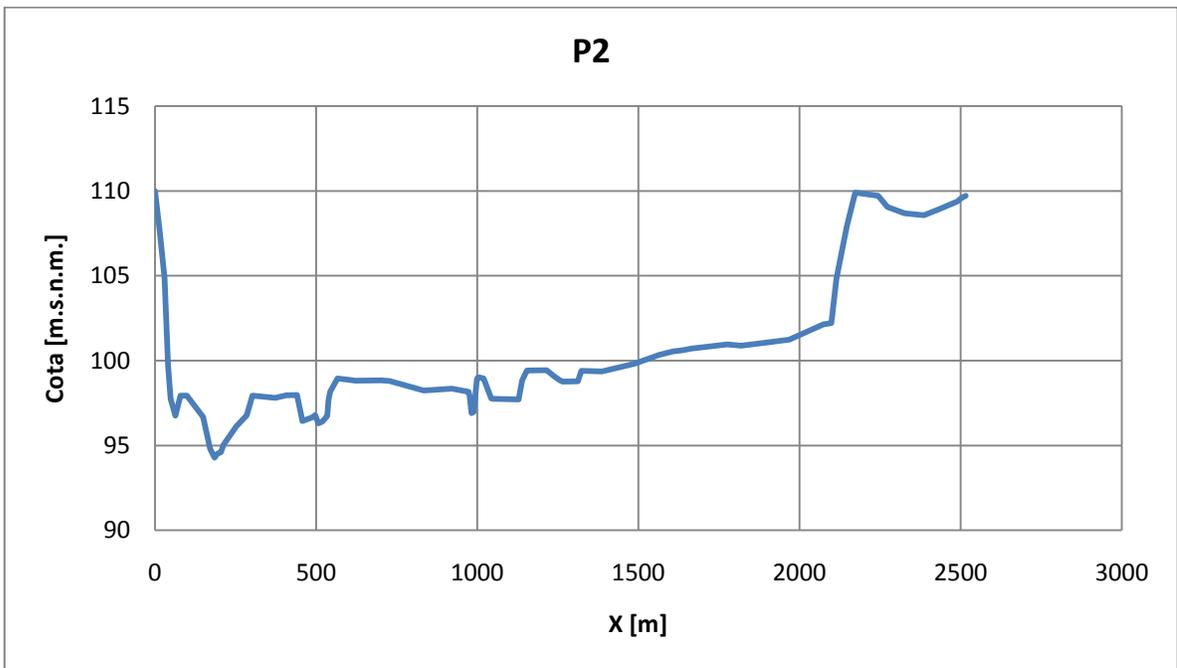
Anexo I.2



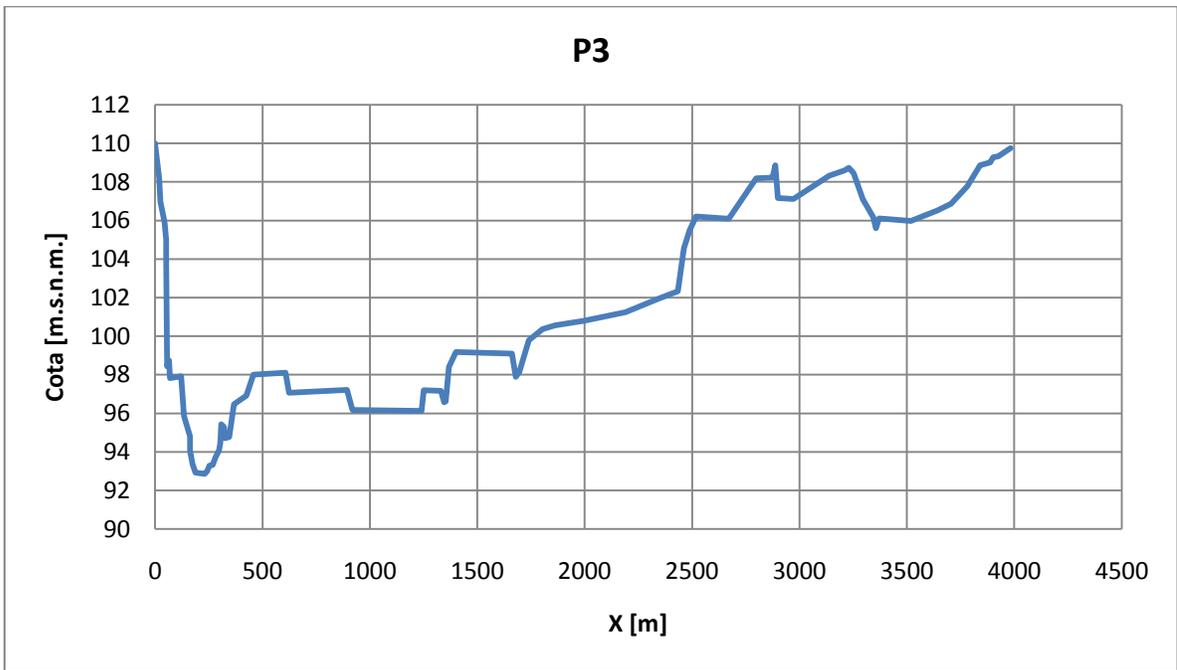
Anexo I.3



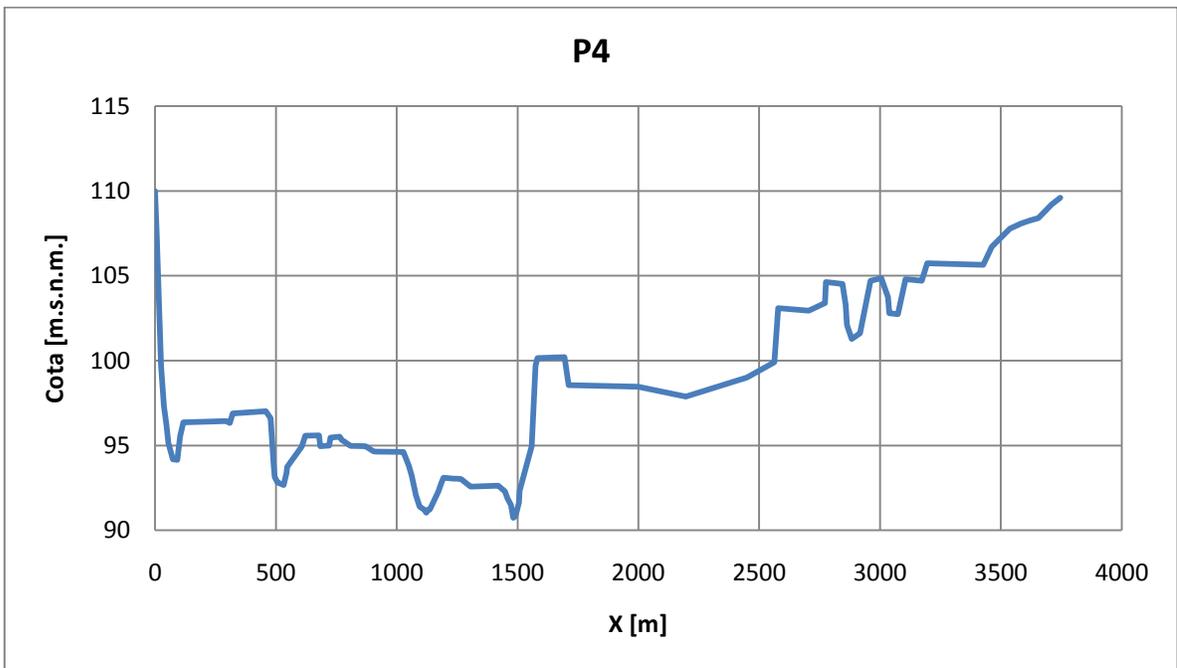
Anexo I.4



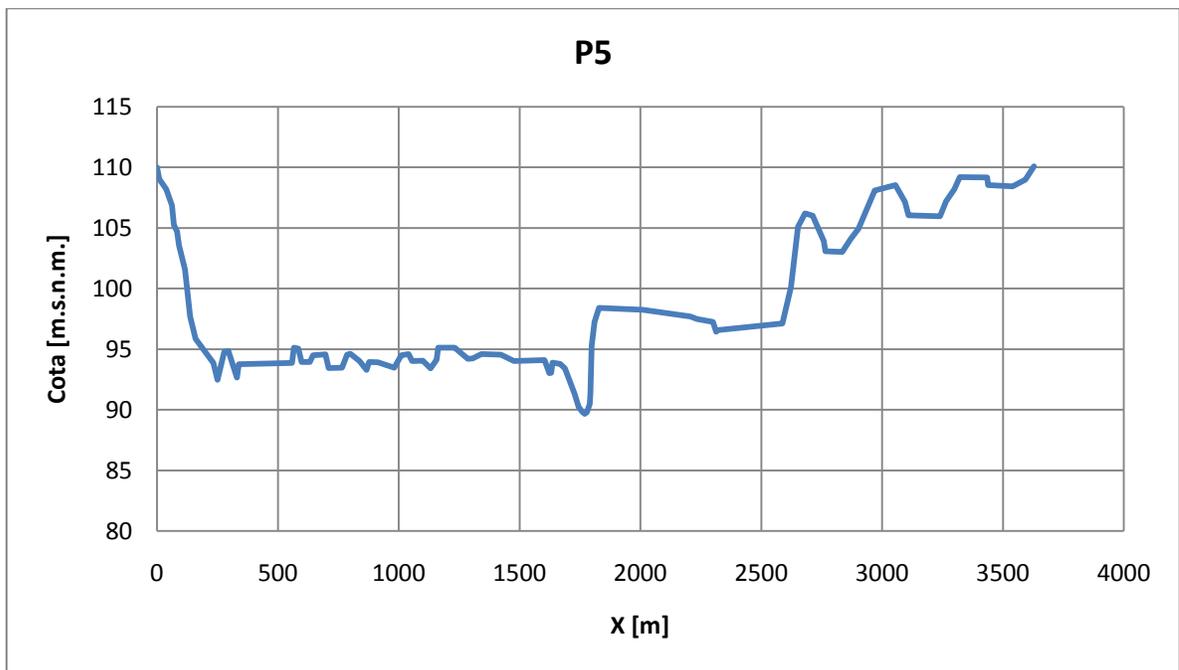
Anexo I.5



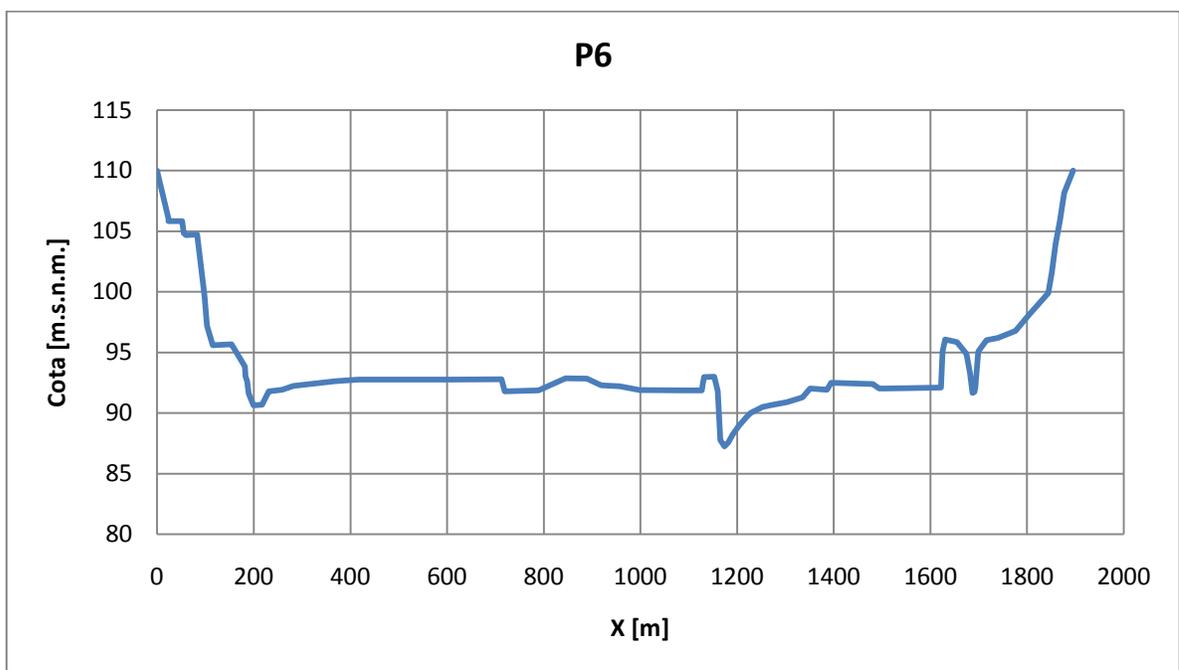
Anexo I.6



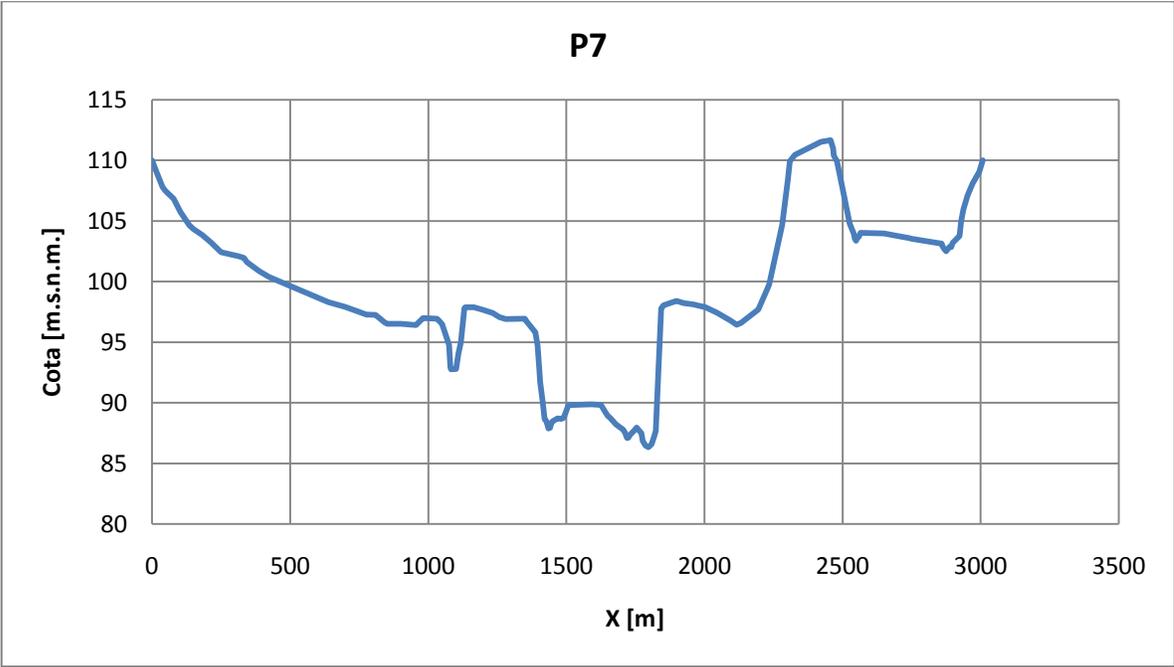
Anexo I.7



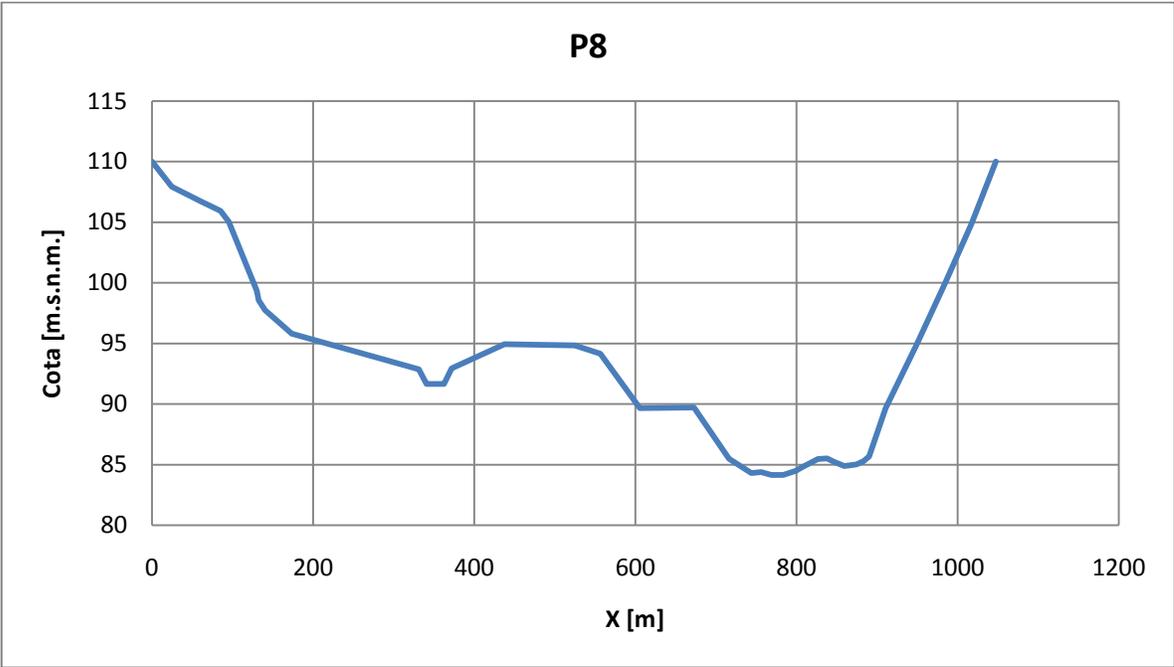
Anexo I.8



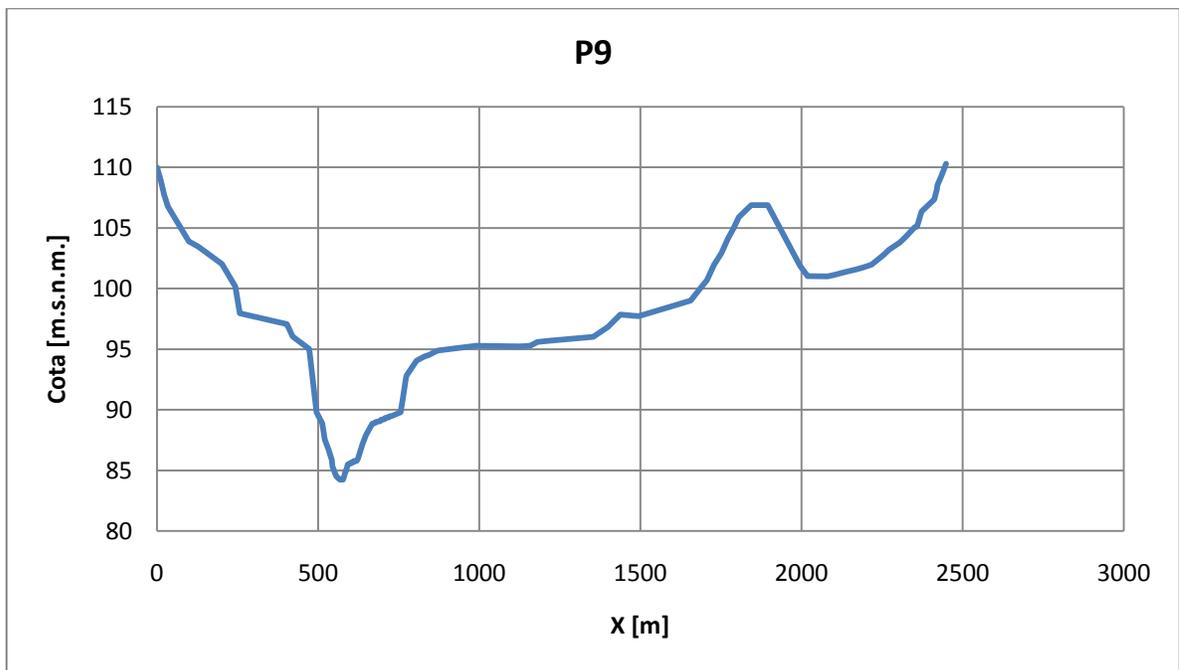
Anexo I.9



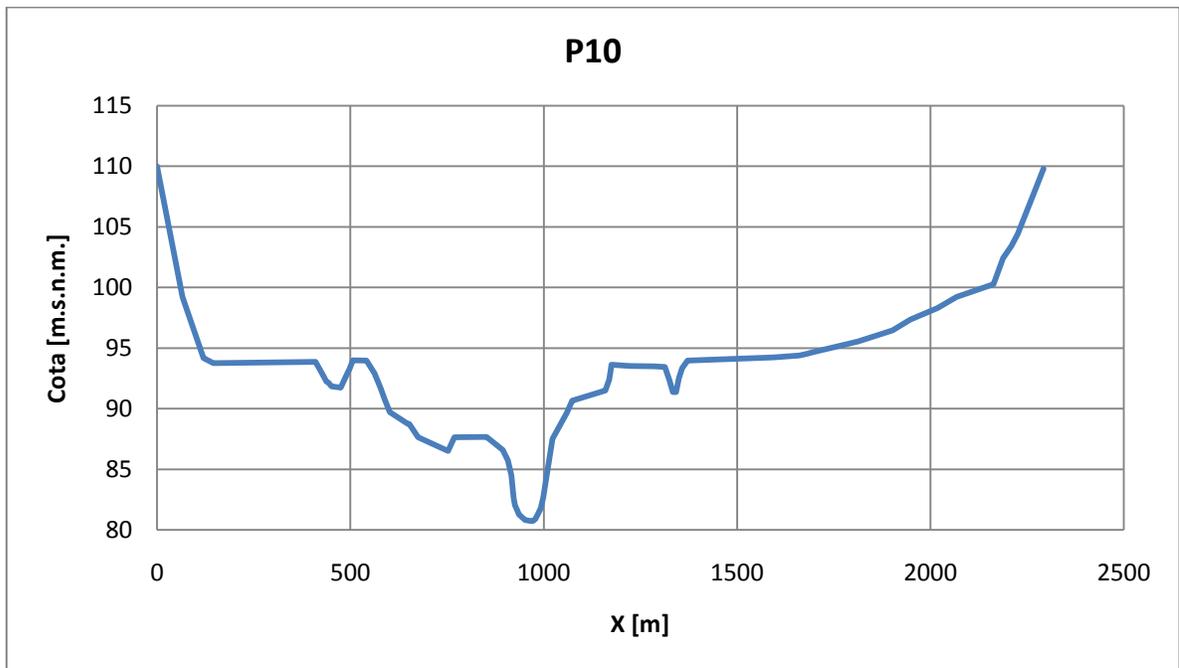
Anexo I.10



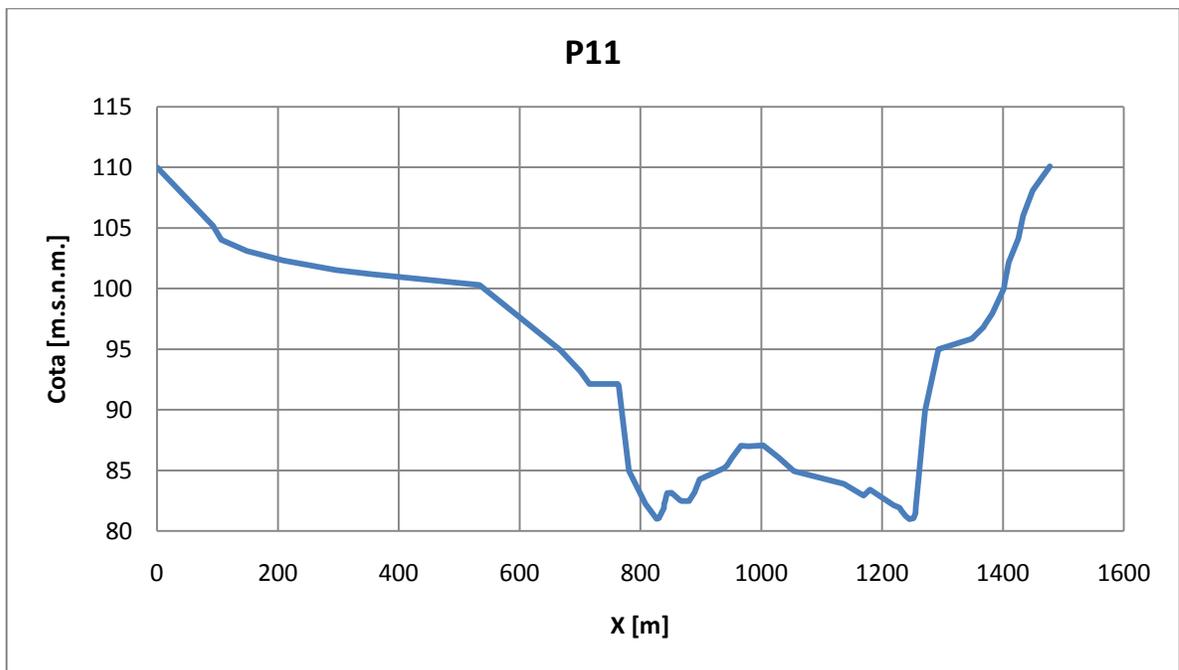
Anexo I.11



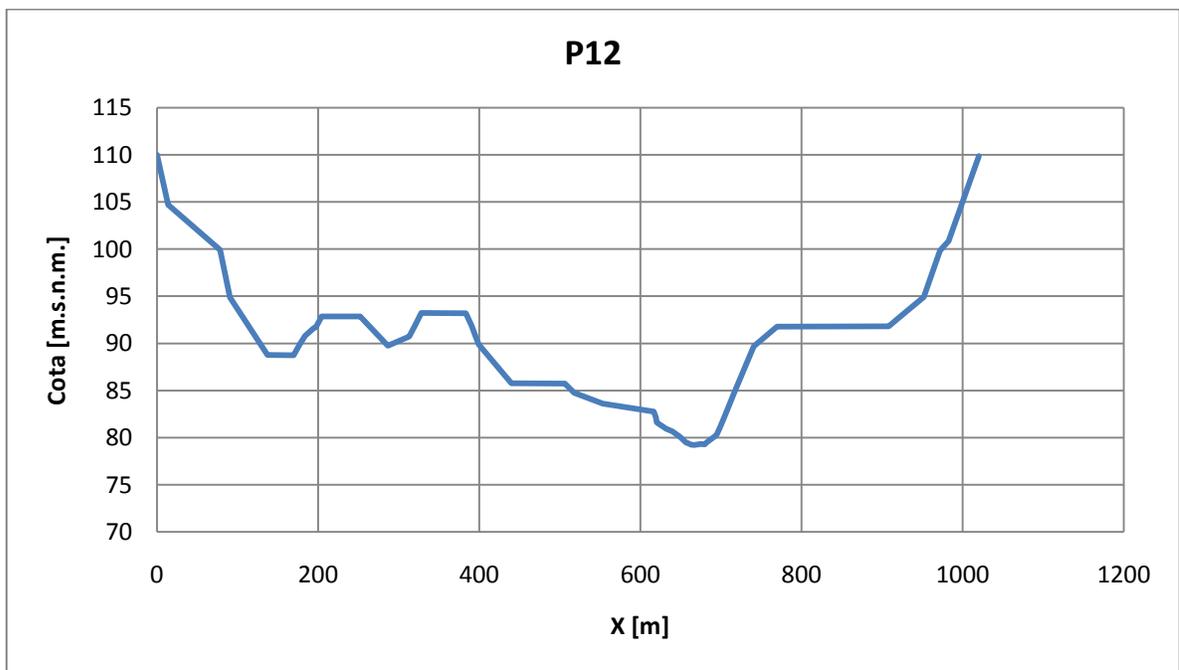
Anexo I.12



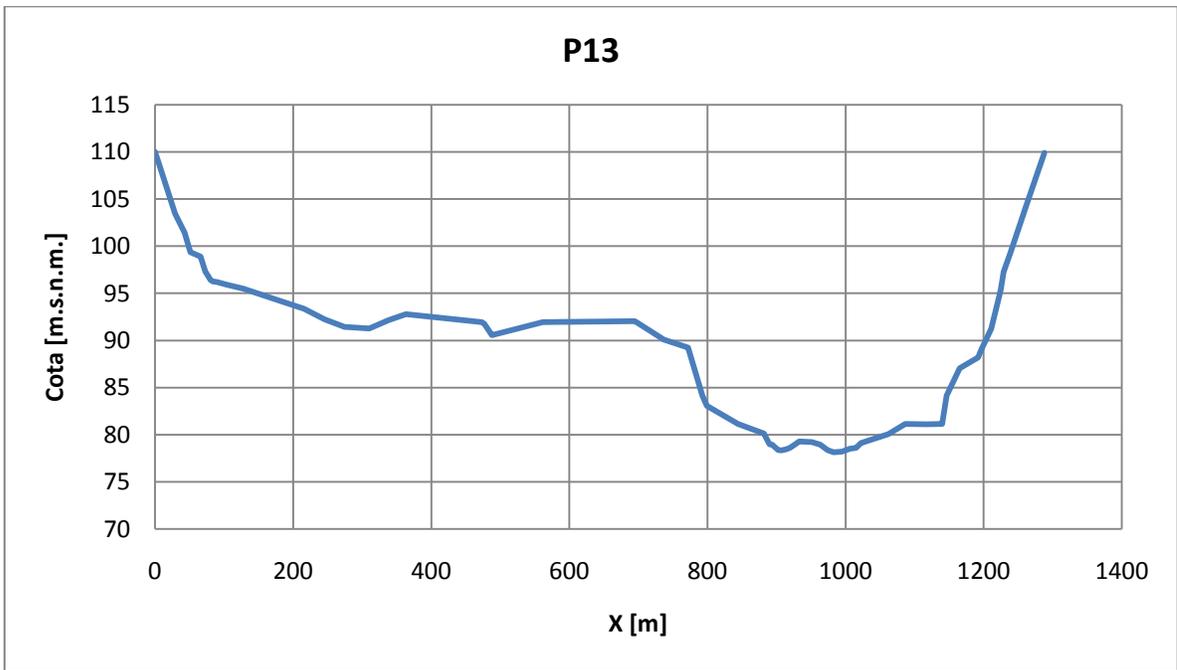
Anexo I.13



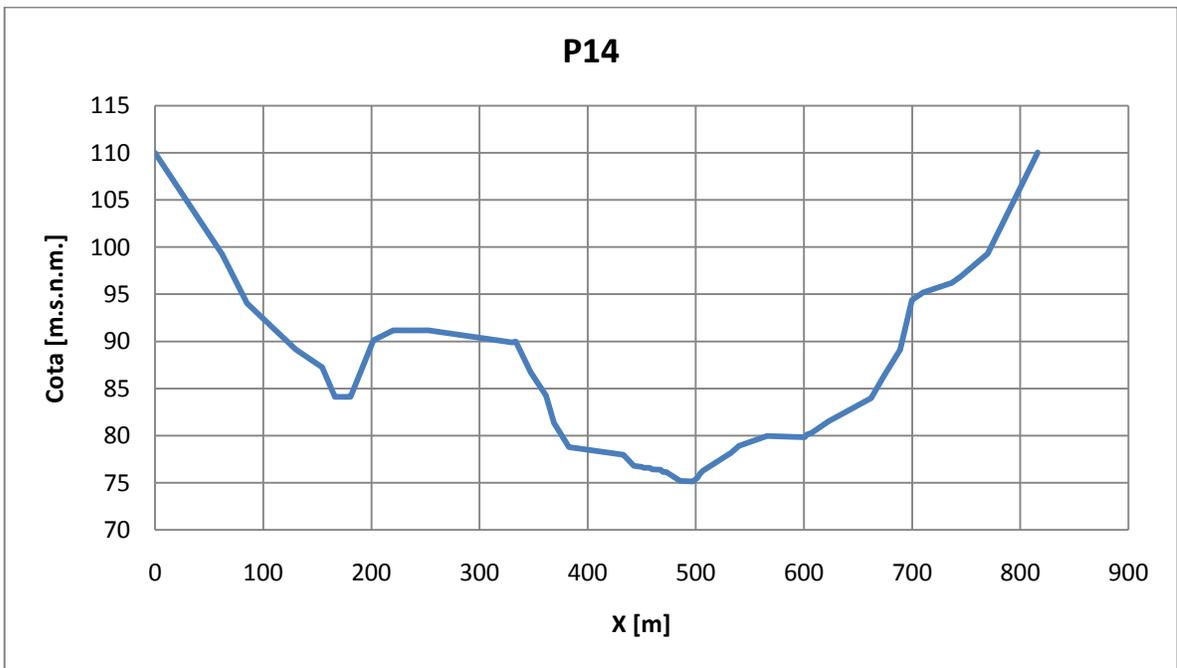
Anexo I.14



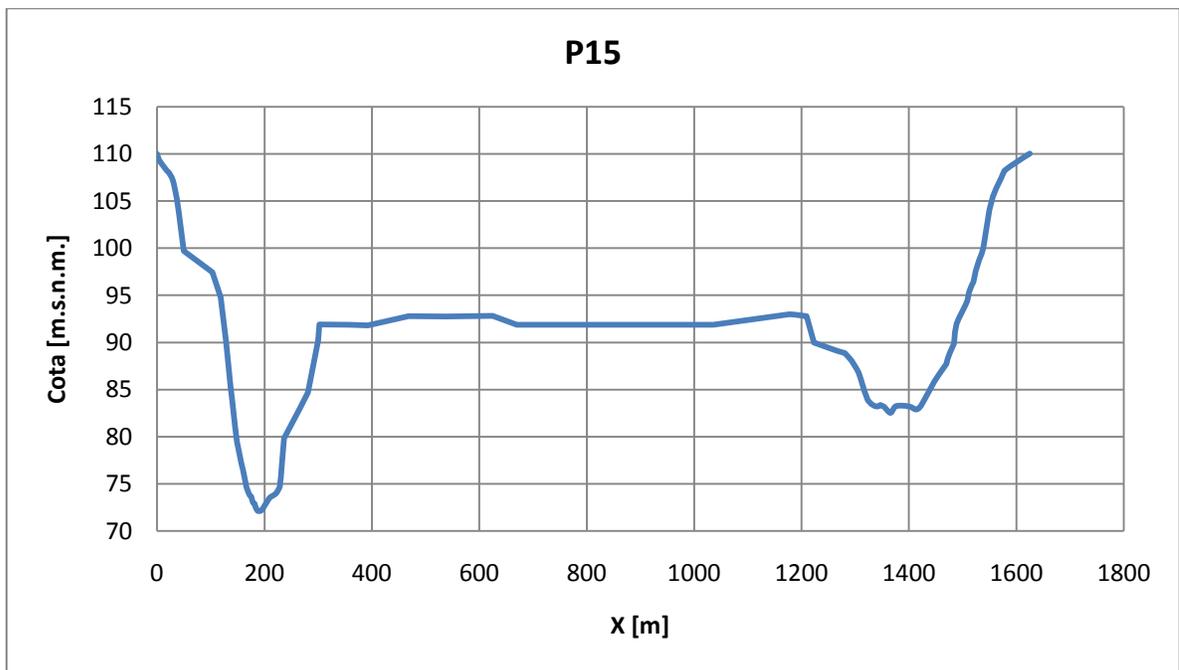
Anexo I.15



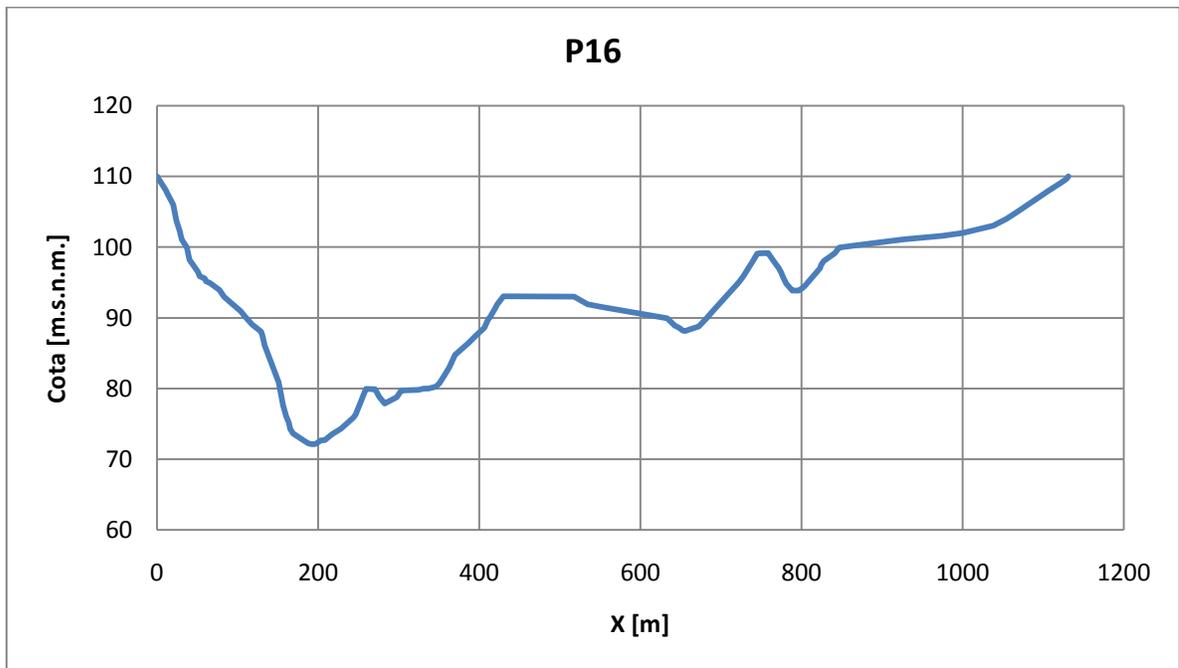
Anexo I.16



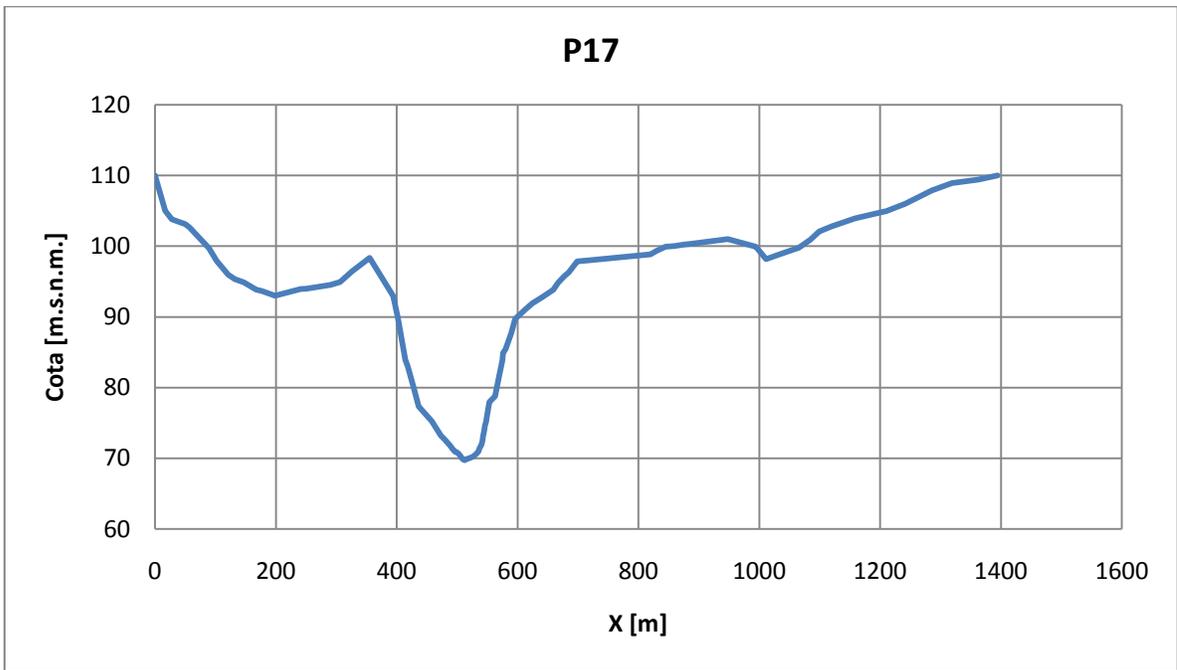
Anexo I.17



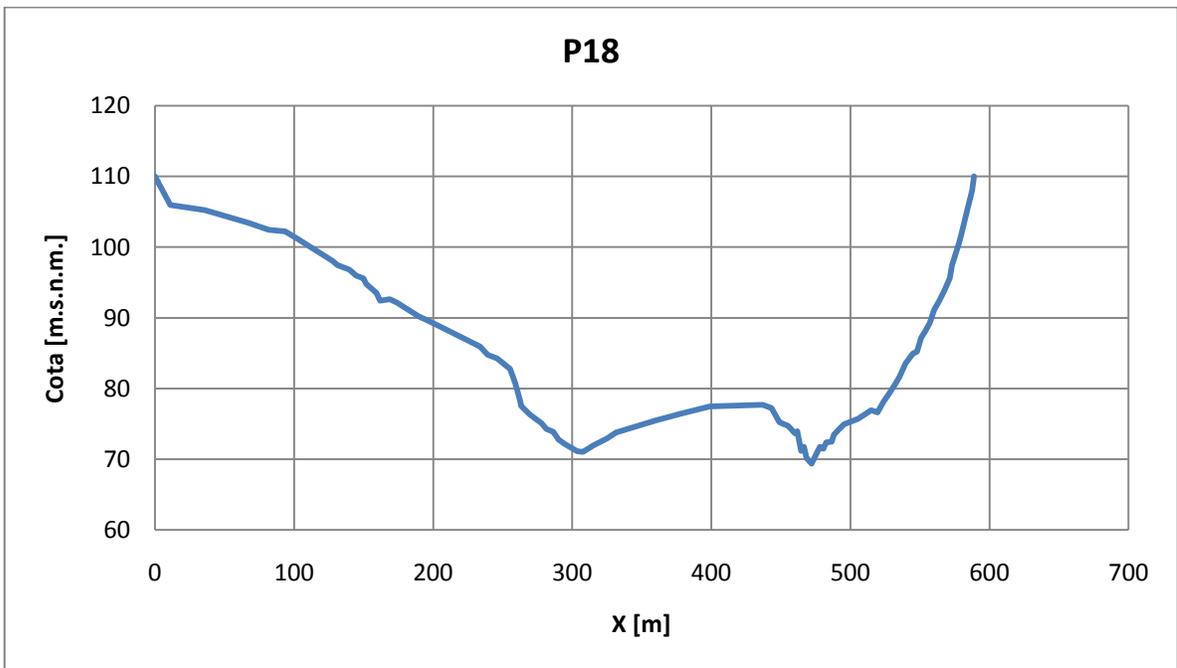
Anexo I.18



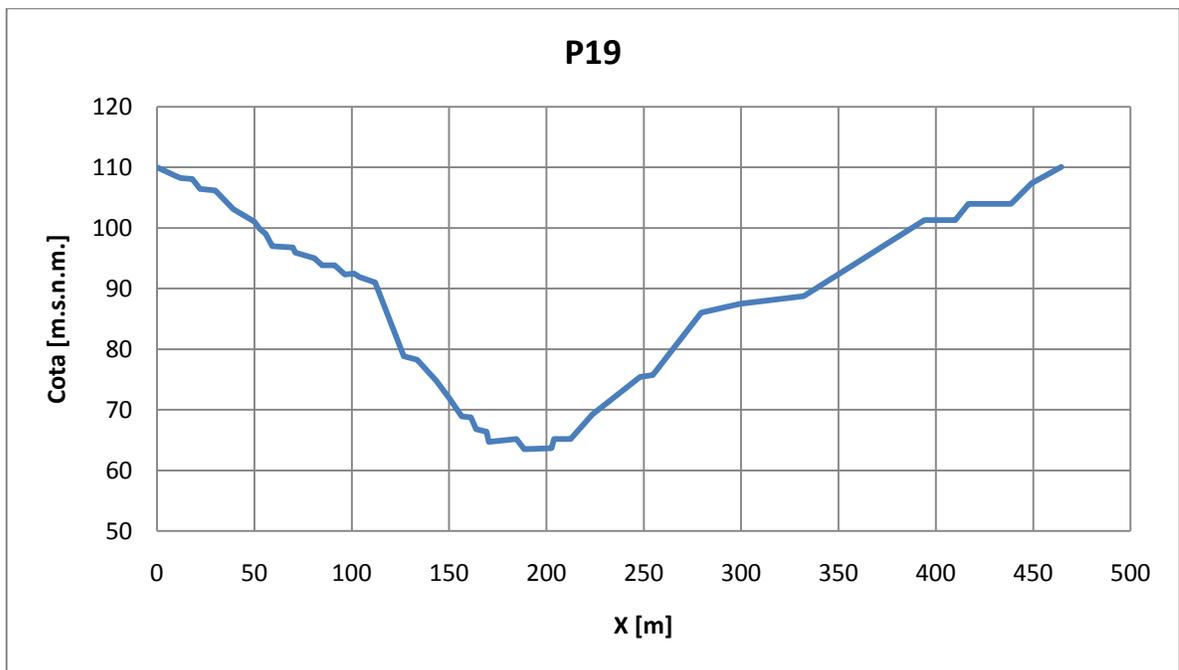
Anexo I.19



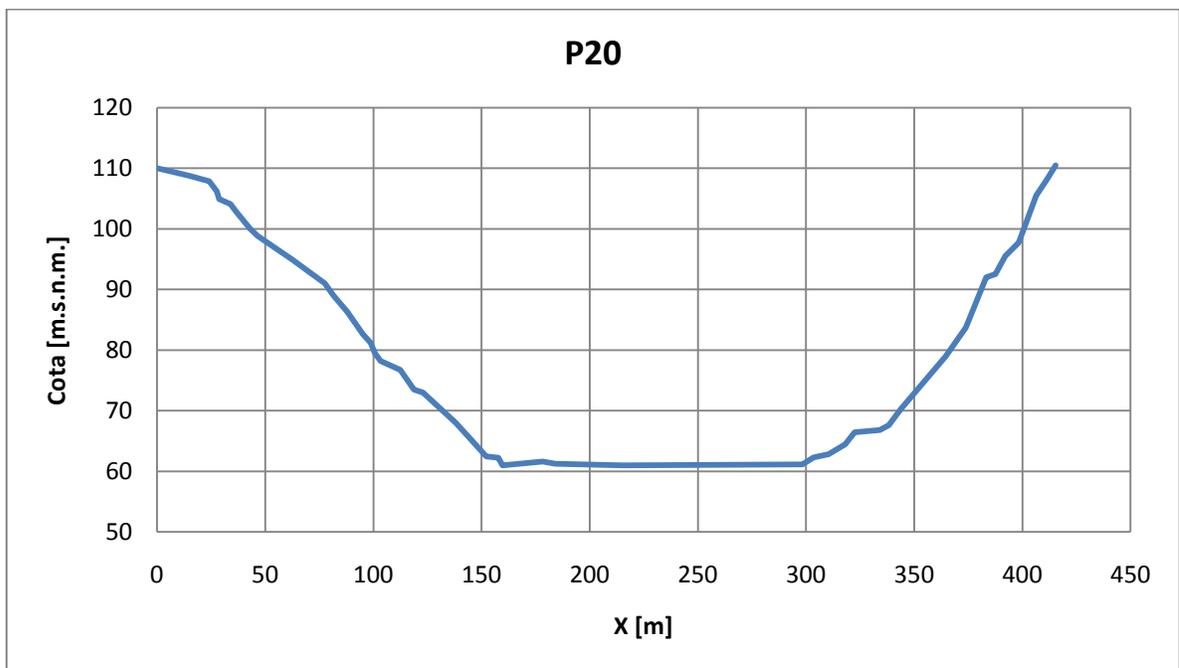
Anexo I.20



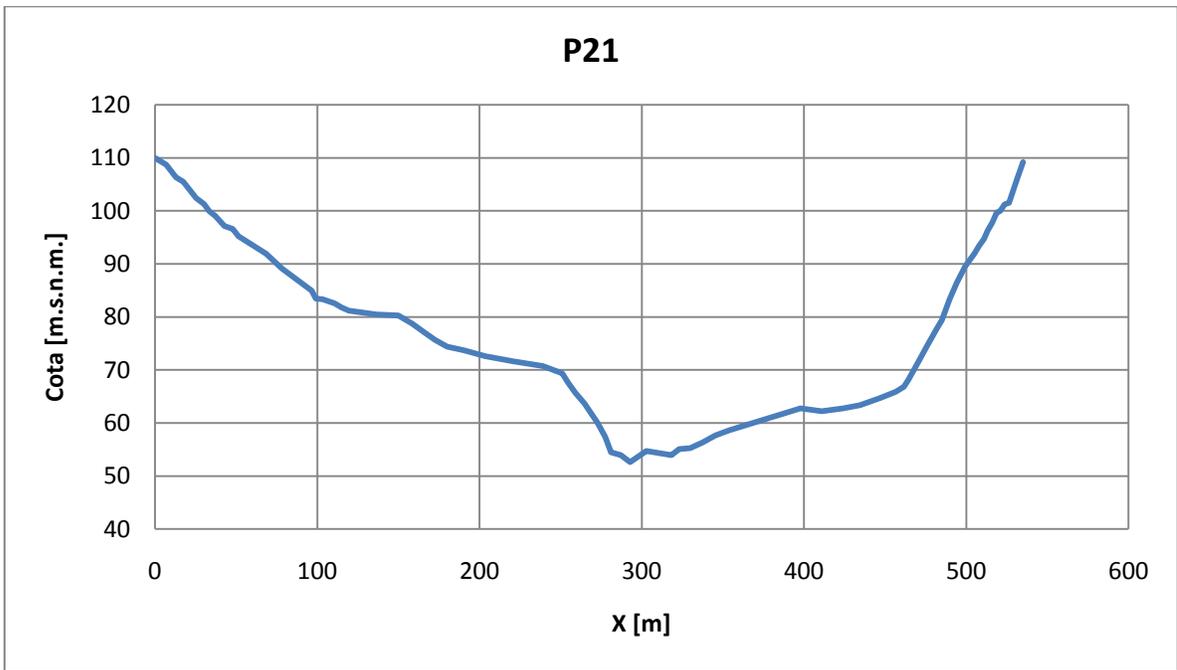
Anexo I.21



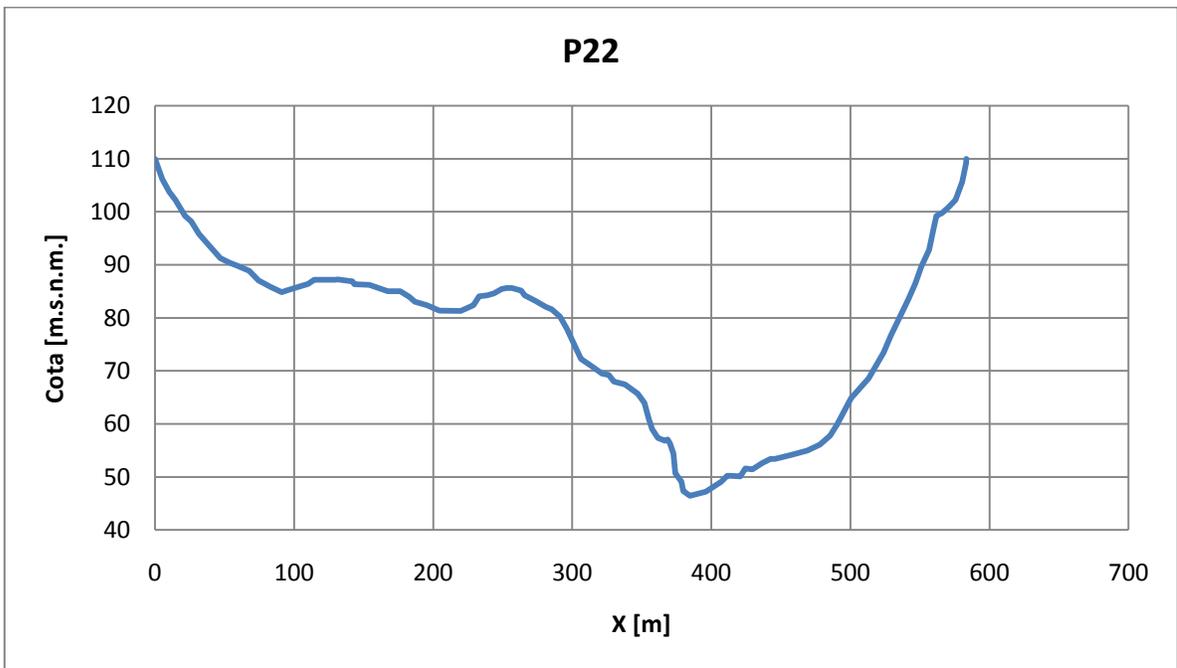
Anexo I.22



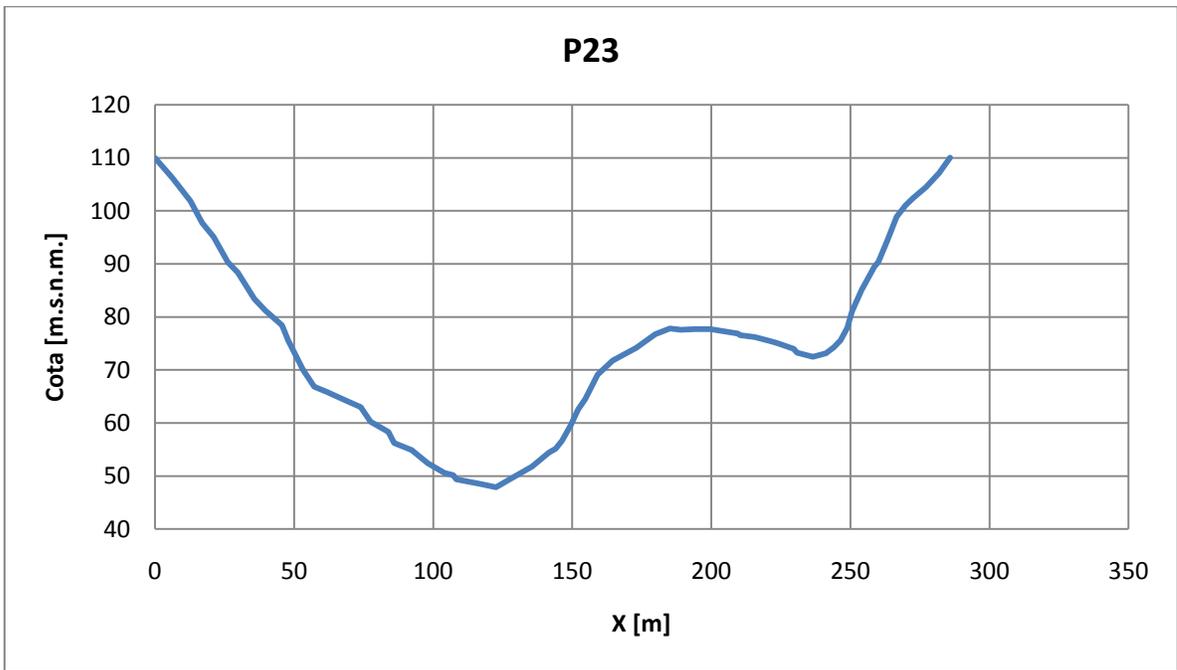
Anexo I.23



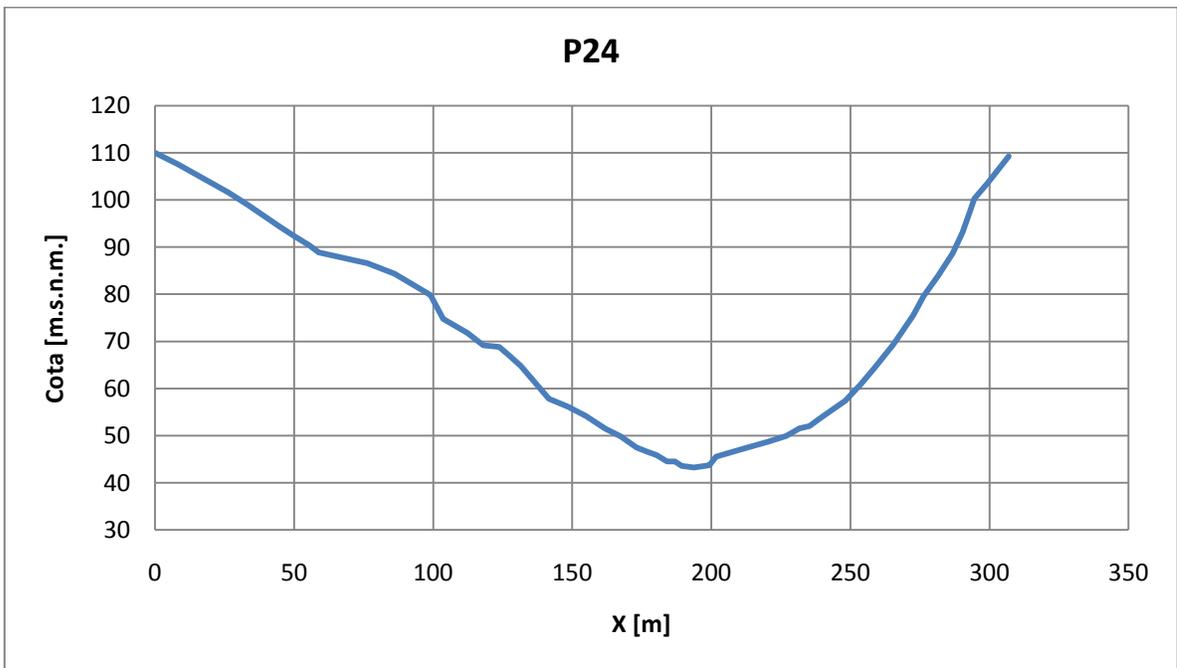
Anexo I.24



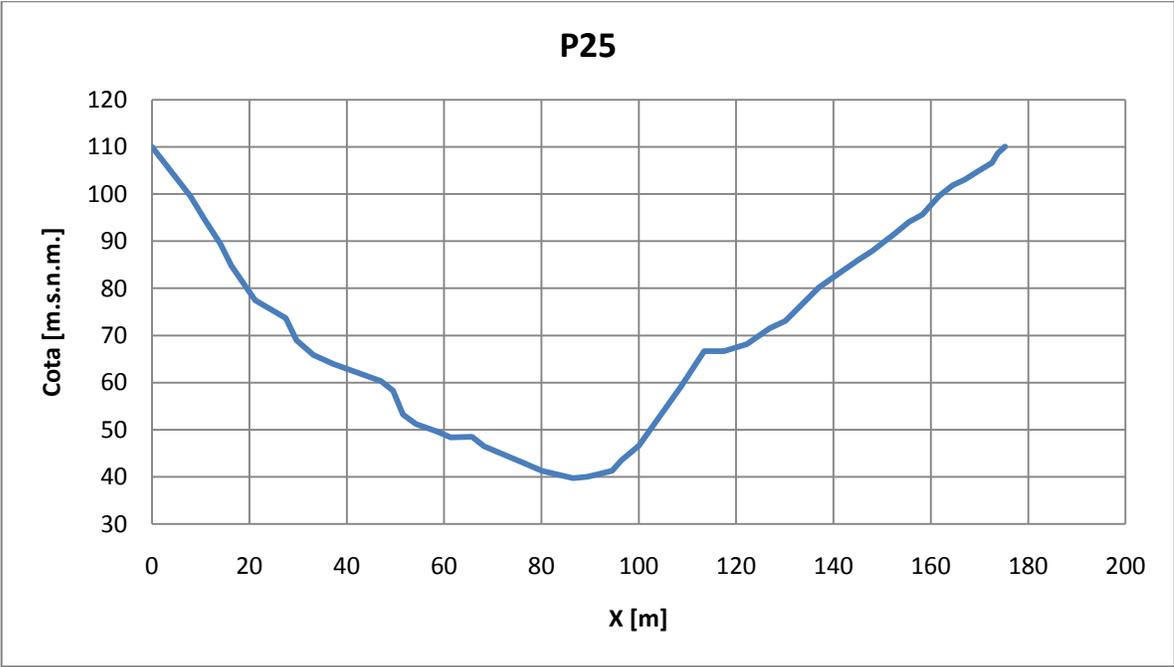
Anexo I.25



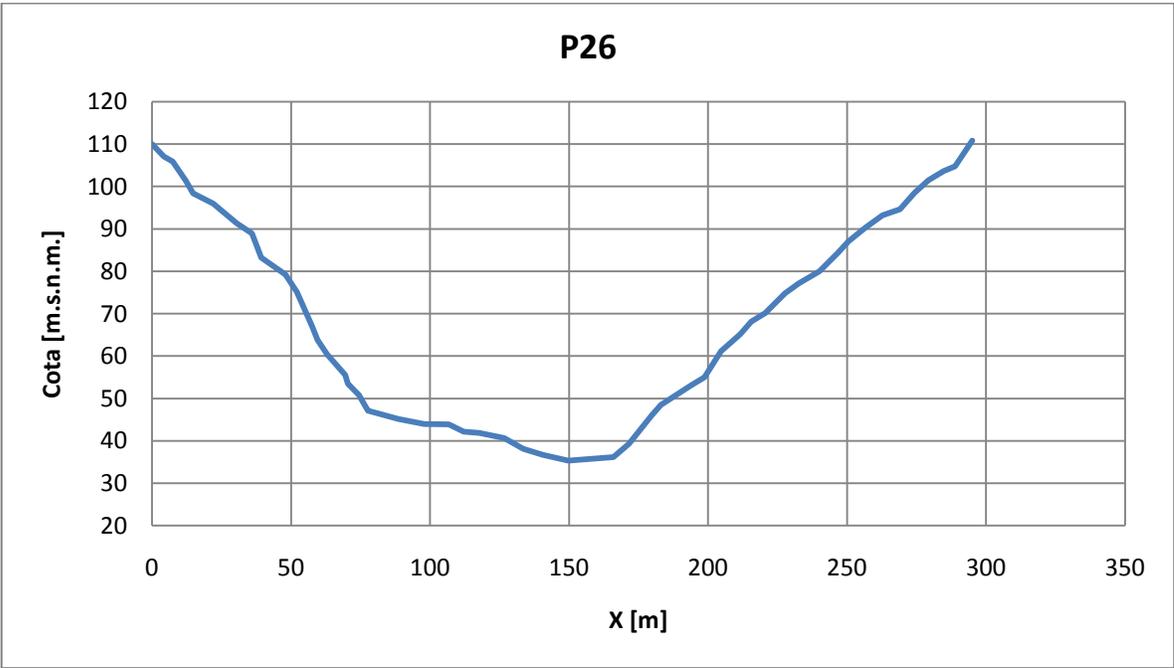
Anexo I.26



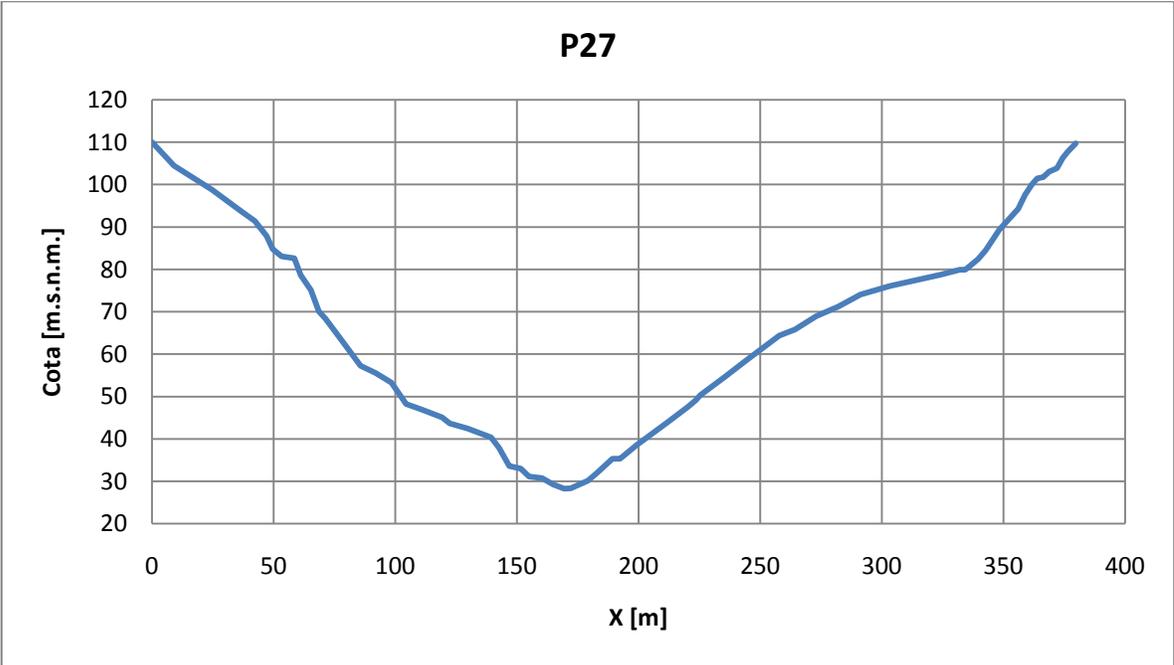
Anexo I.27



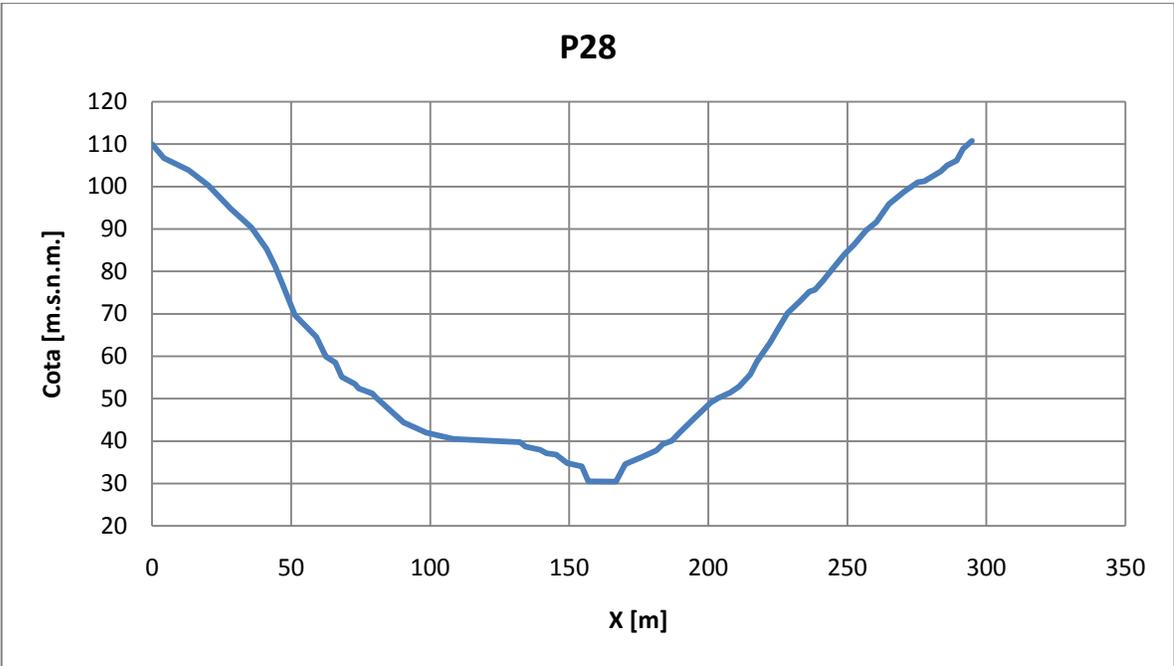
Anexo I.28



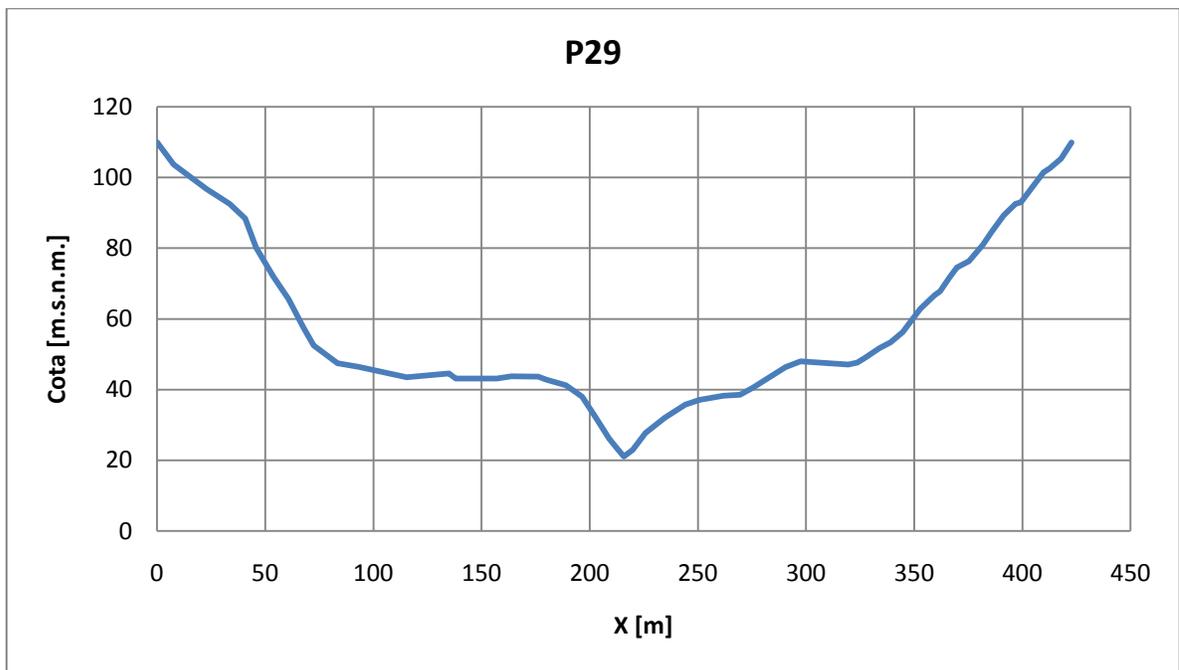
Anexo I.29



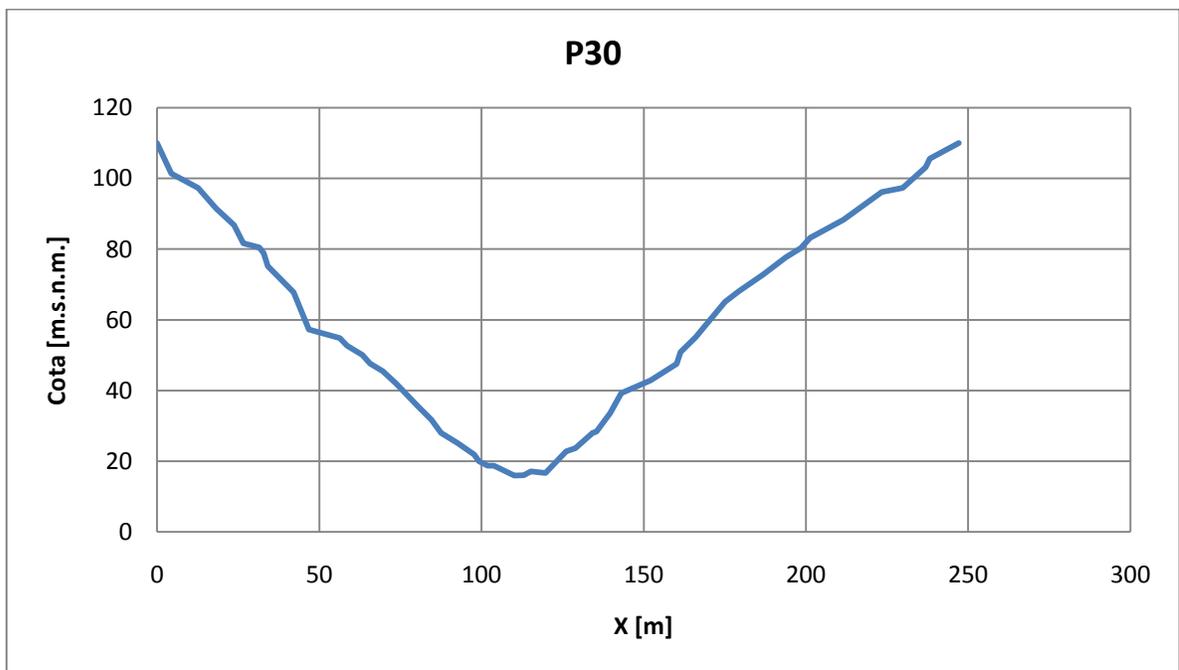
Anexo I.30



Anexo I.31



Anexo I.32



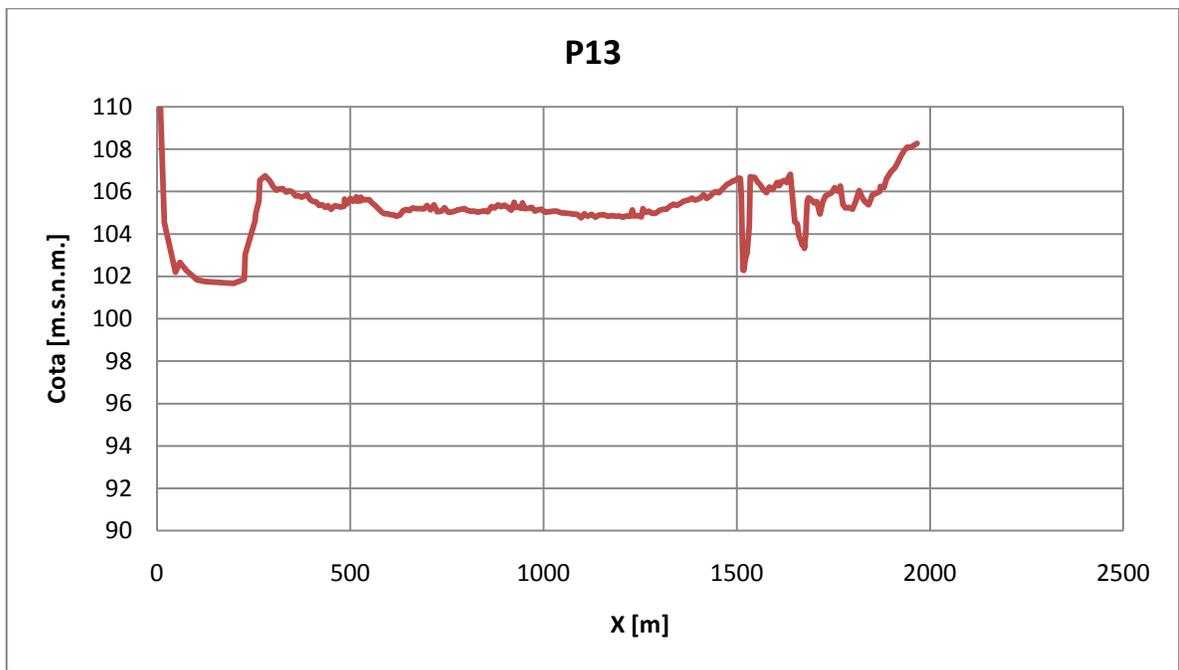
Anexo I.33

Anexo II
Perfiles año 2010, ENDESA

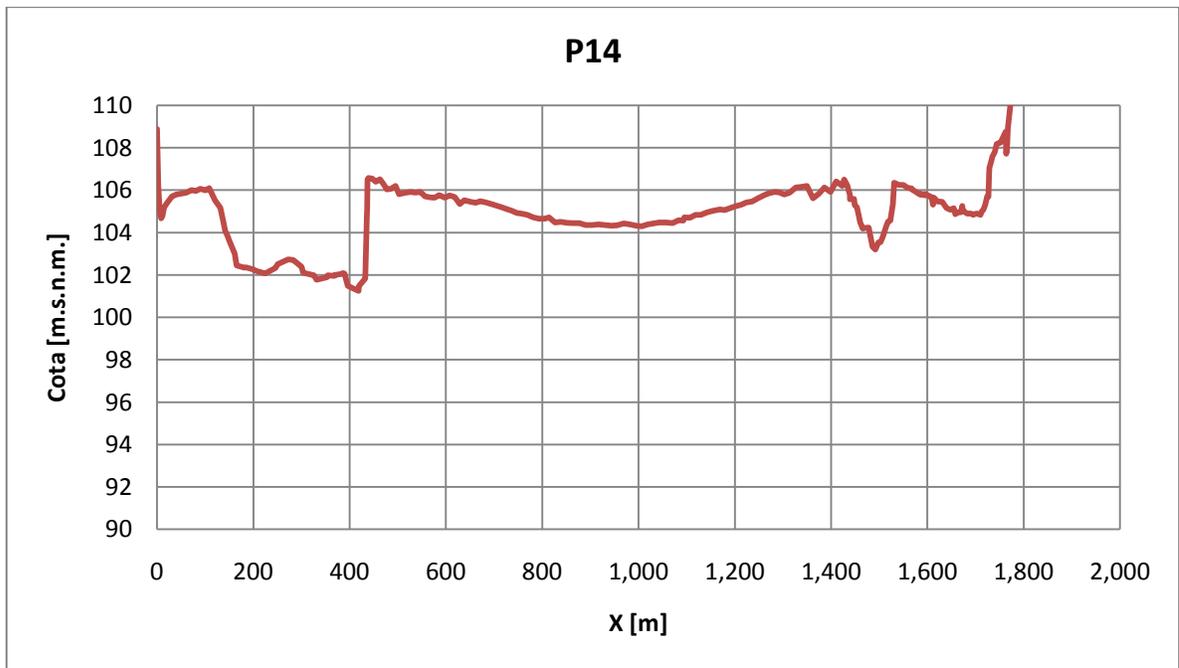
Anexo II: Perfiles año 2010, ENDESA

Anexo II.1 Tabla con numeración de perfiles del año 2010 medidos por ENDESA

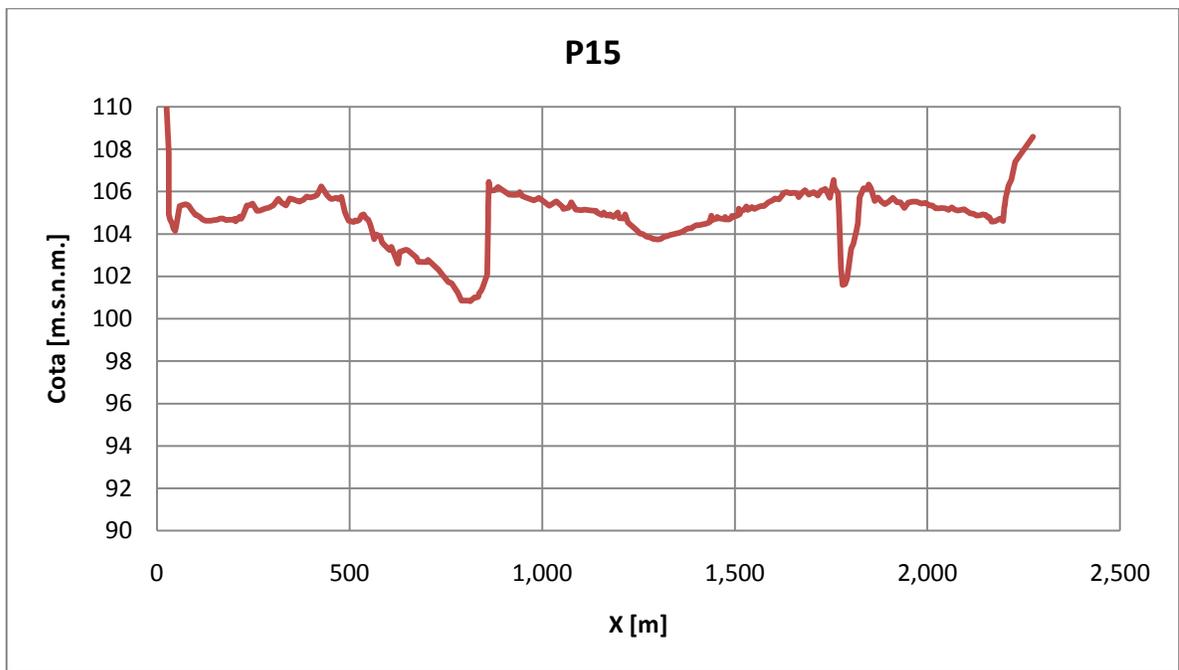
Perfil	Cota inferior	km
P10	102	34.9
P11	102	34.3
P12	100	33.7
P13	102	33.2
P14	101	32.7
P15	101	32.3
P16	100	31.8
P17	101	31.2
P18	100	30.8
P19	100	30.2
P20	100	29.4
P21	99	28.6
P22	101	28.0
P23	101	27.2
P24	98	26.3
P25	100	24.7
P26	98	24.1
P27	96	22.7
P28	93	21.8
P29	85	19.7
P30	82	18.4
P34	81	17.2



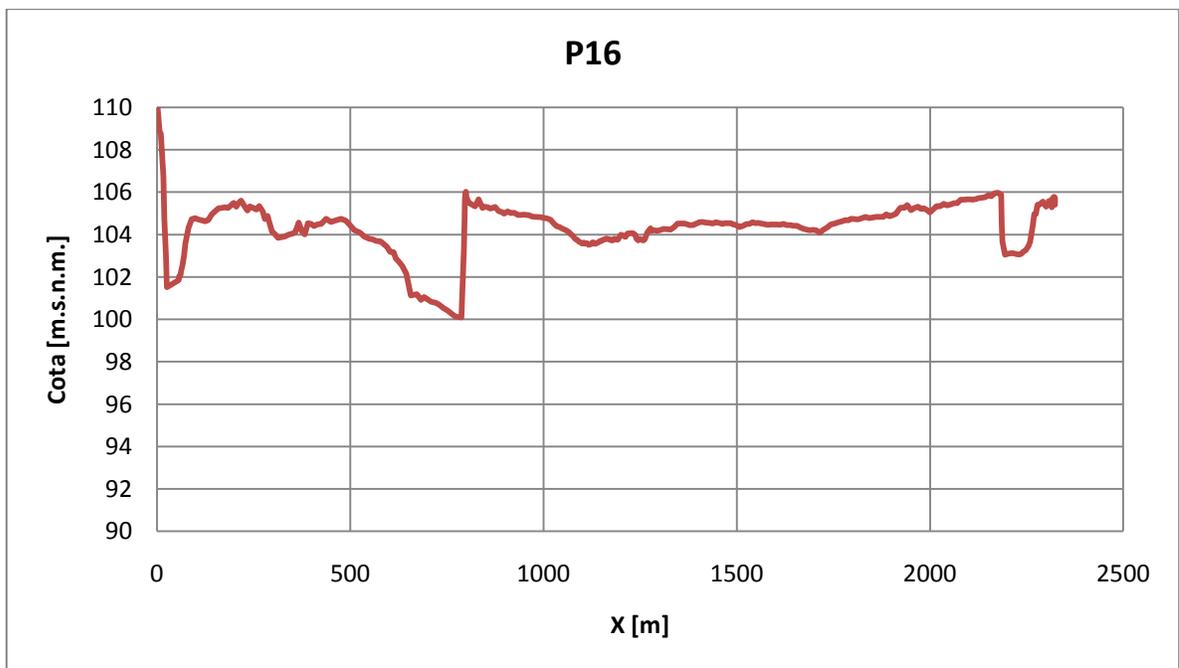
Anexo II.2



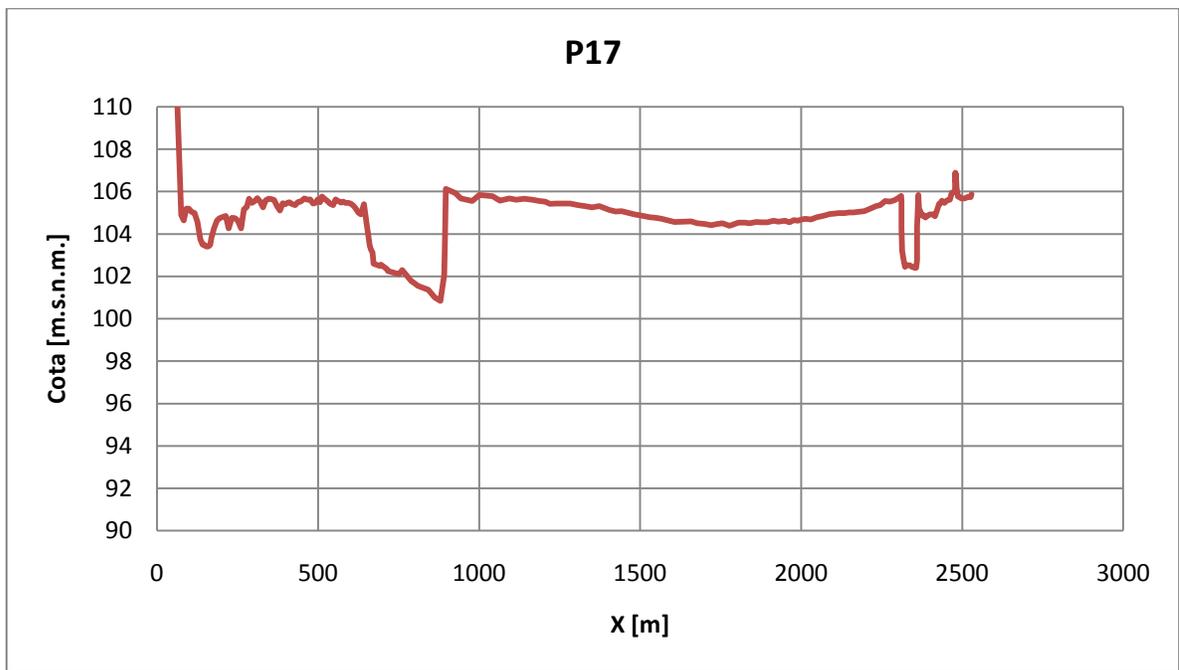
Anexo II.3



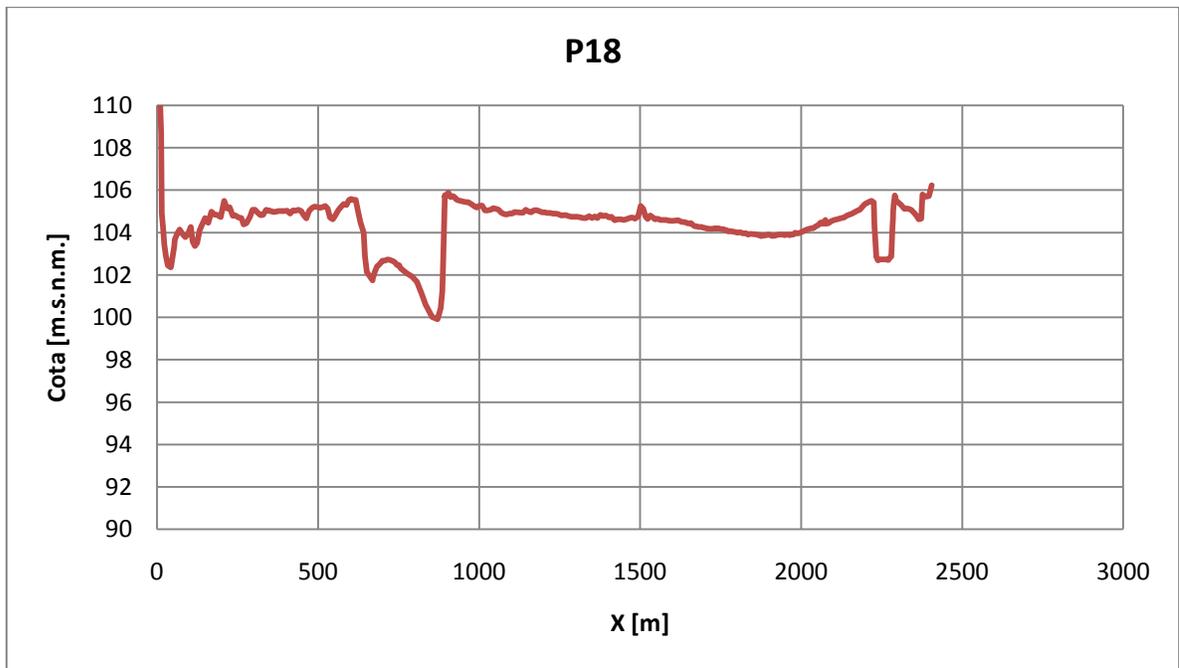
Anexo II.4



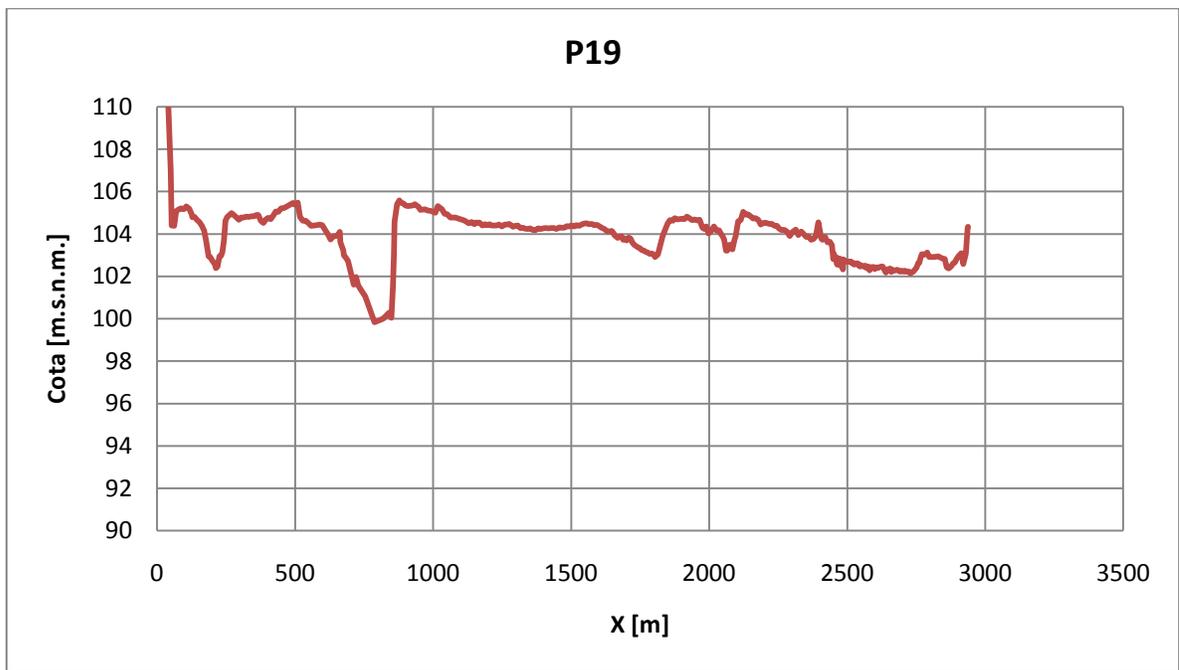
Anexo II.5



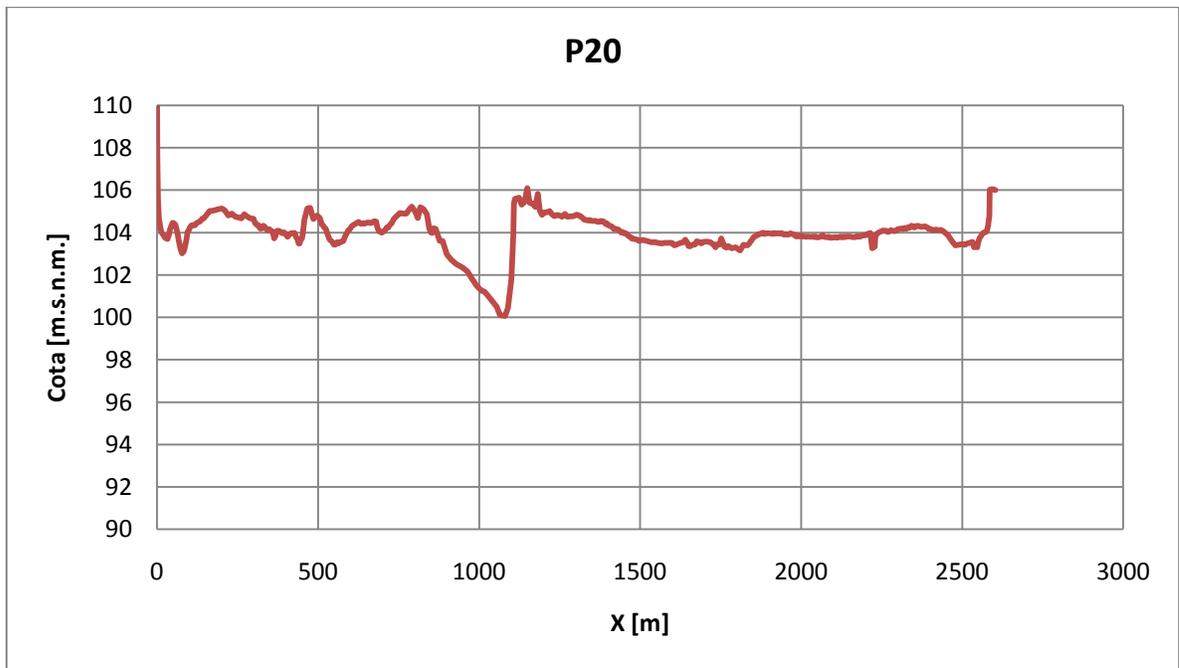
Anexo II.6



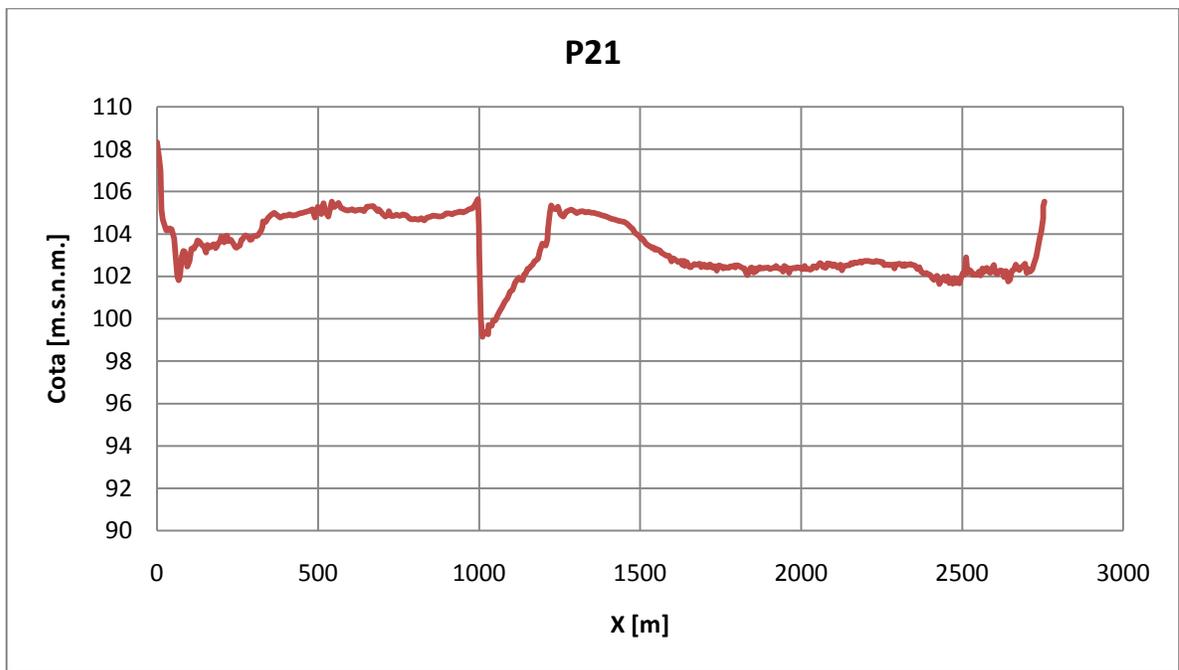
Anexo II.7



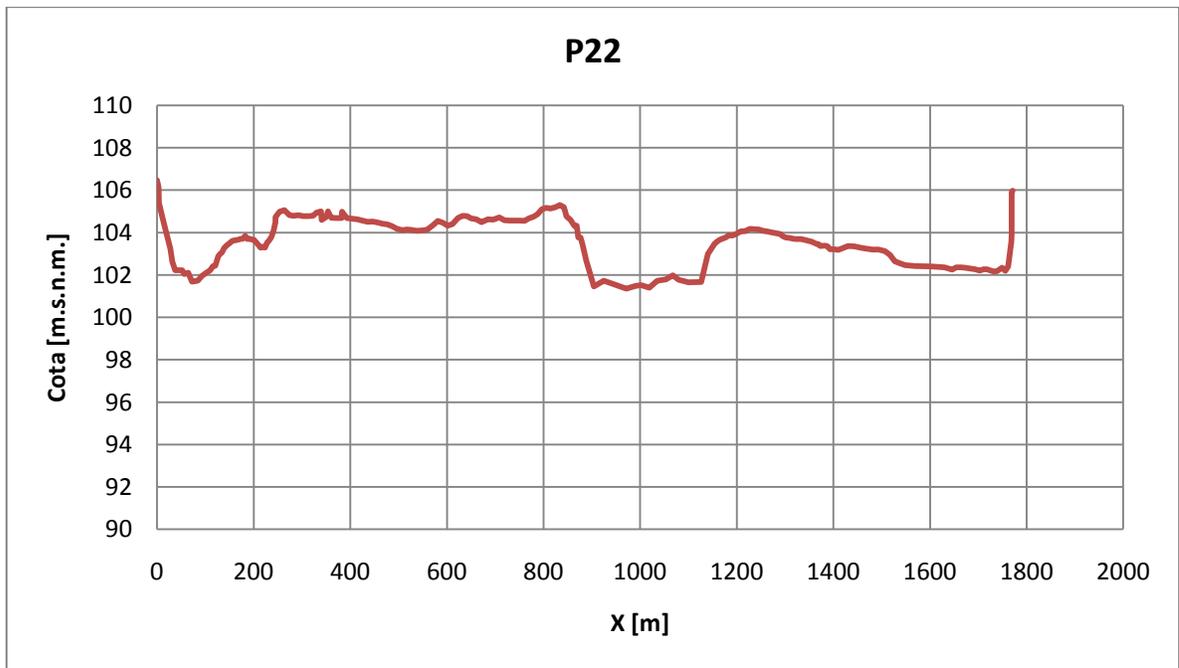
Anexo II.8



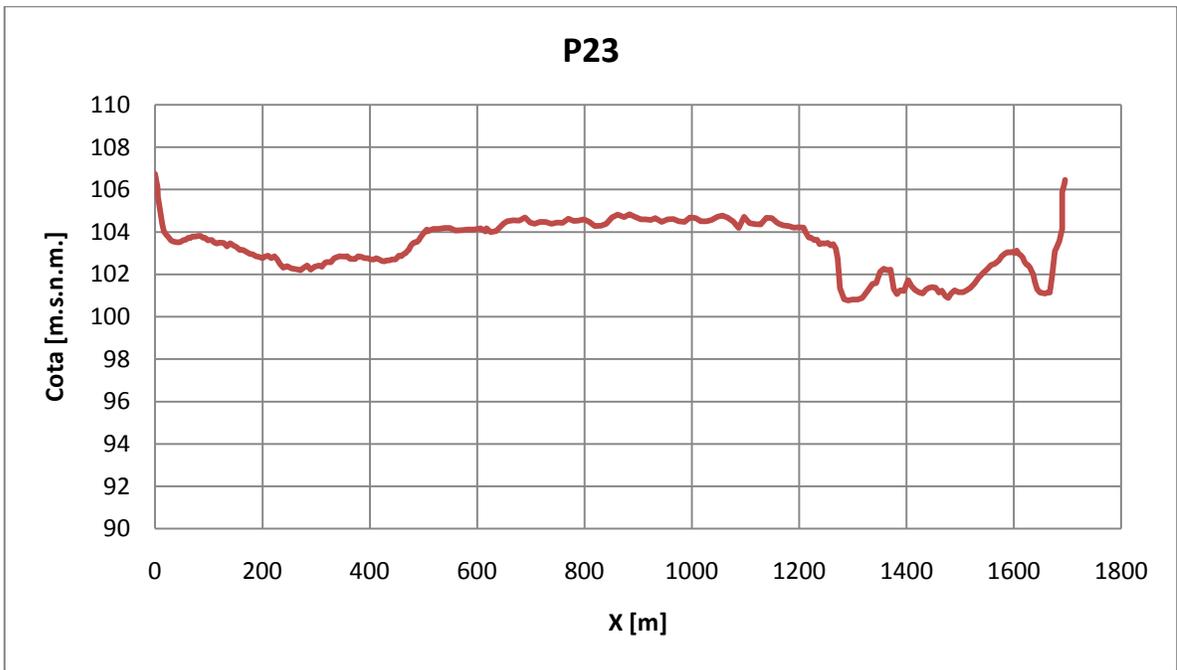
Anexo II.9



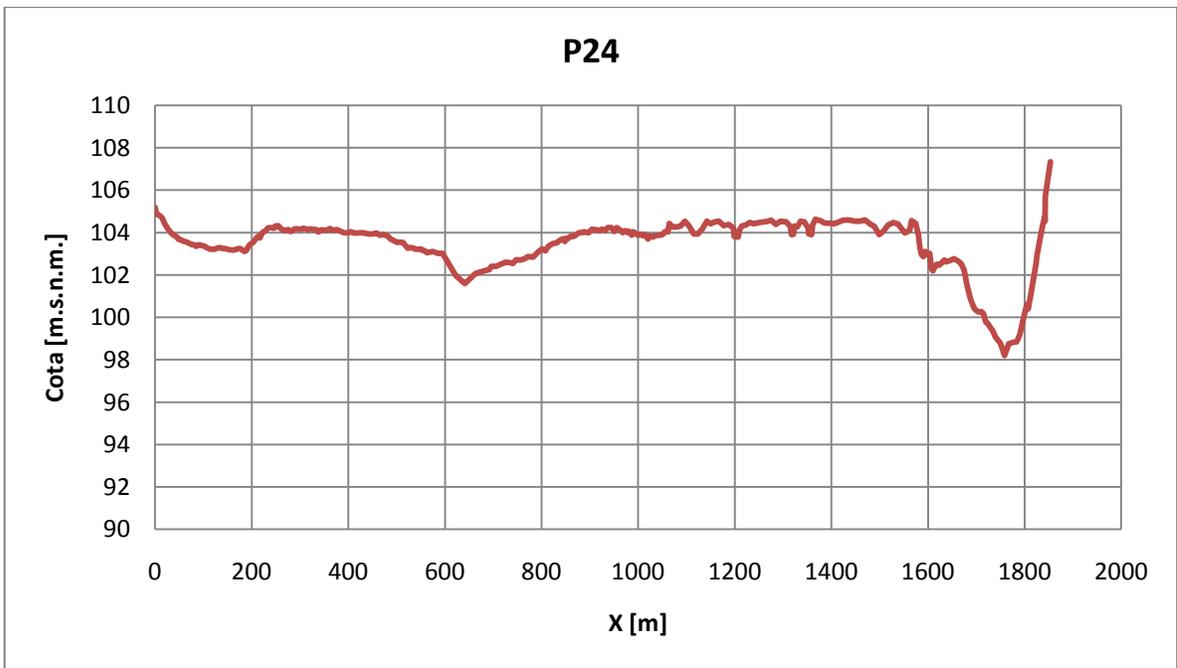
Anexo II.10



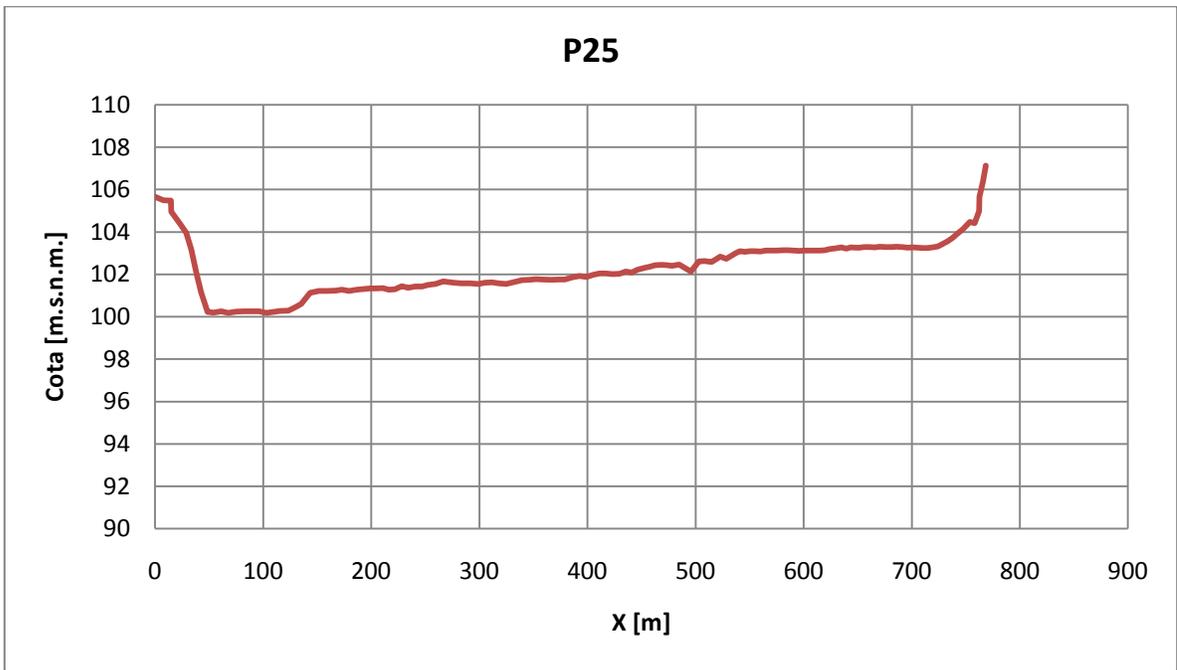
Anexo II.11



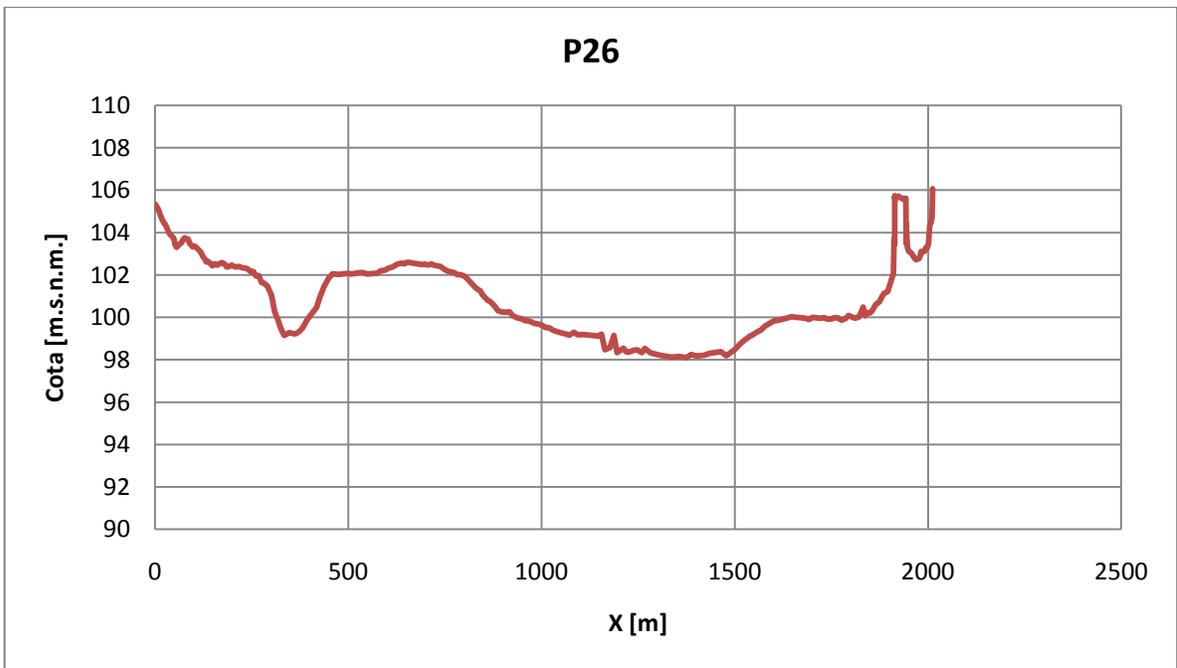
Anexo II.12



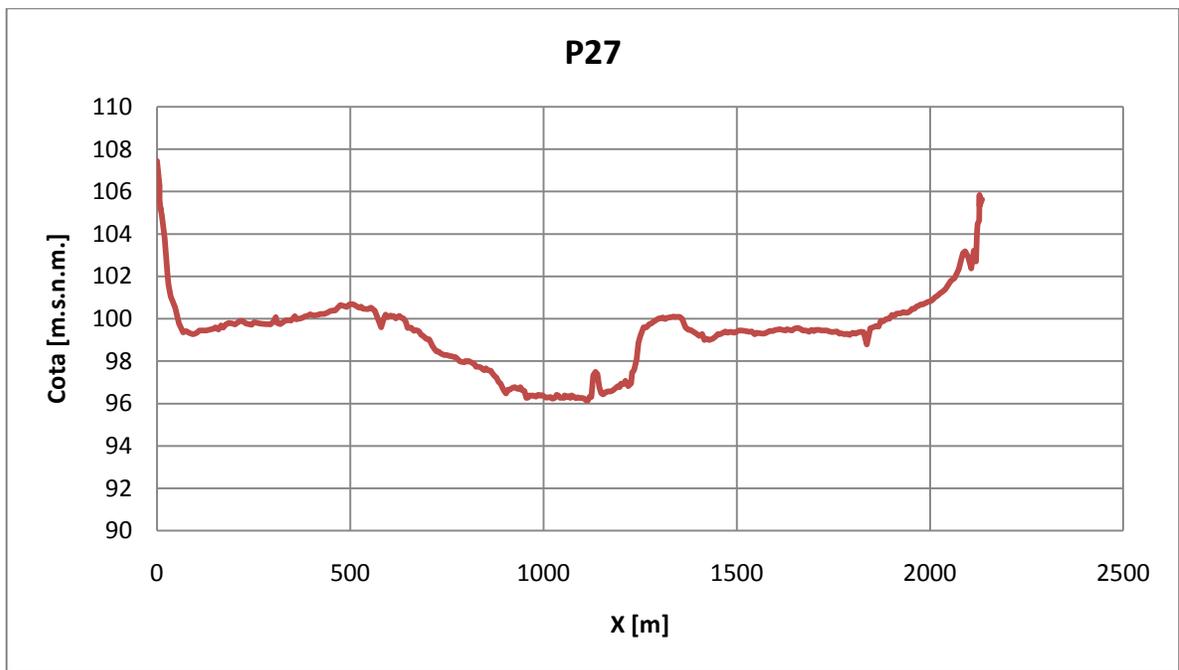
Anexo II.13



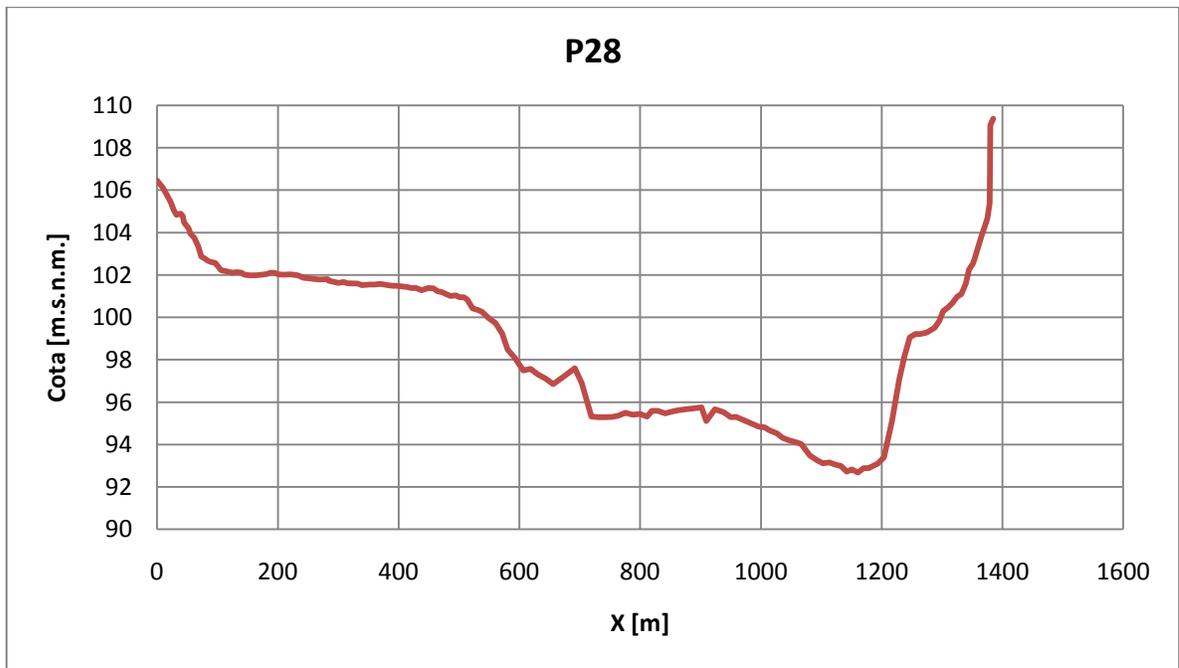
Anexo II.14



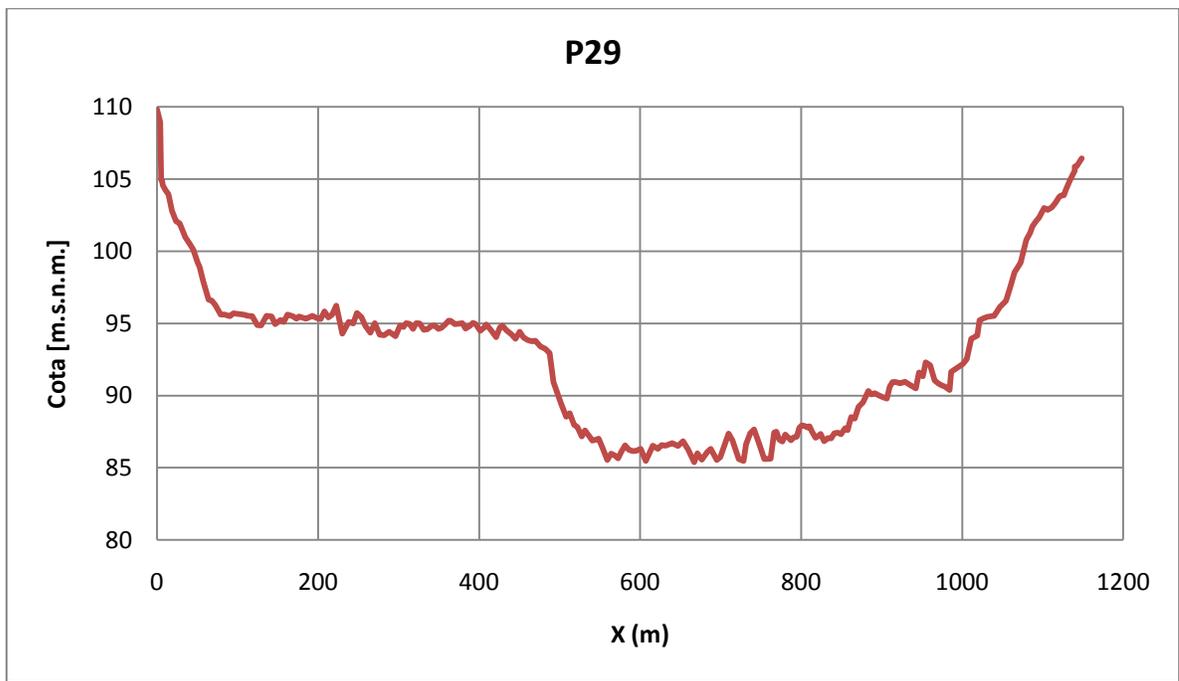
Anexo II.15



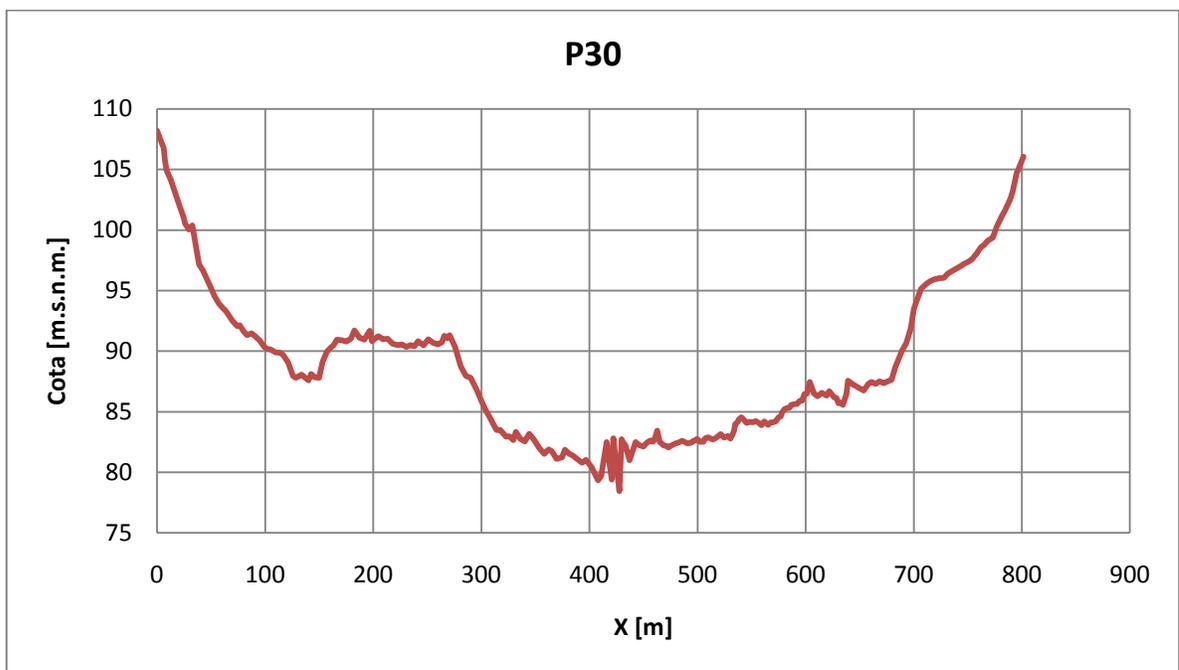
Anexo II.16



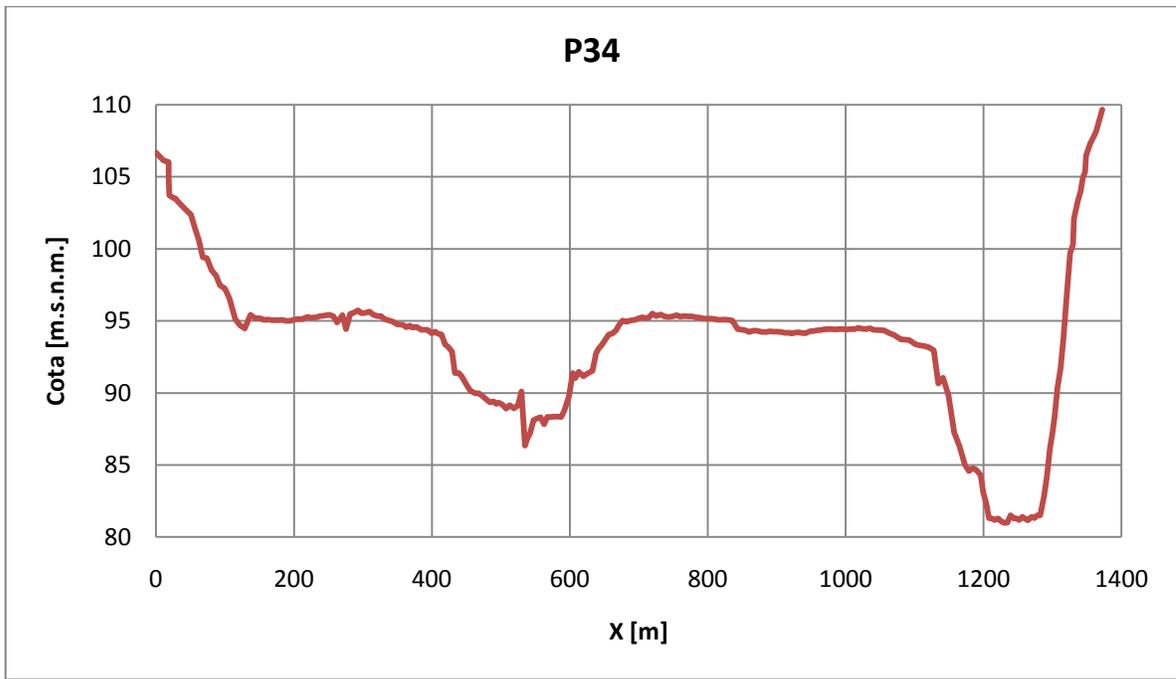
Anexo II.17



Anexo II.18



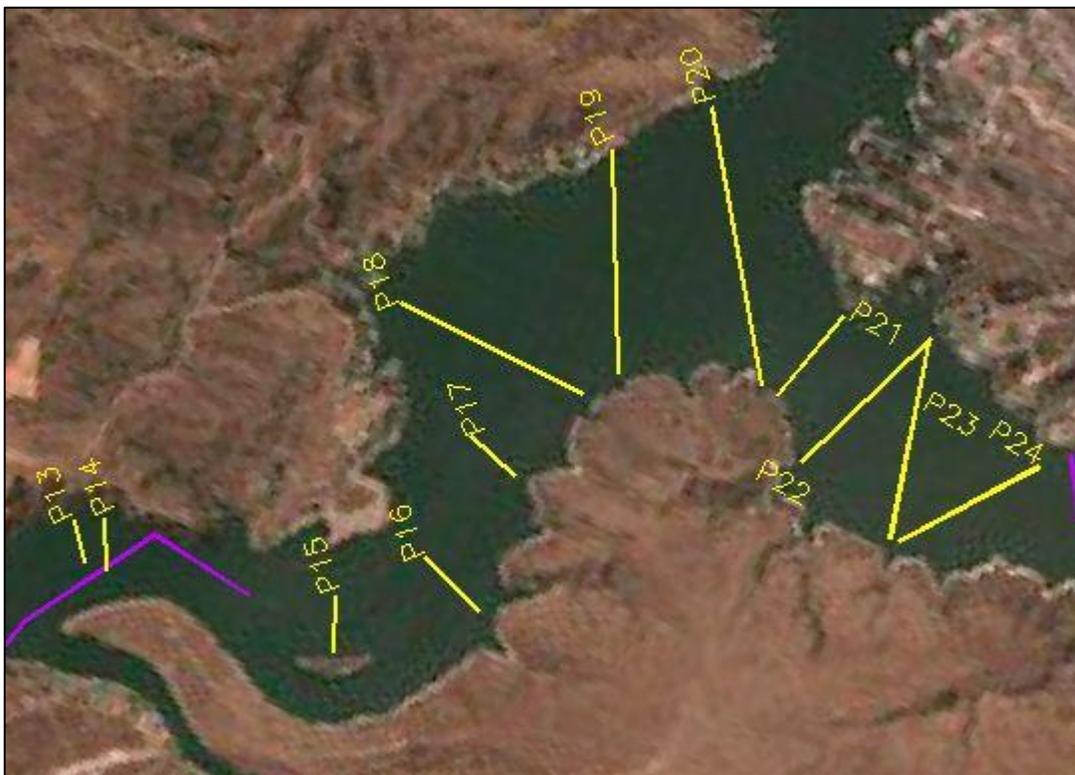
Anexo II.19



Anexo II.20

Anexo III
Perfiles Ecosonda BATHY

Anexo III: Perfiles ecosonda Bathy



Anexo III.1 Se muestra los perfiles transversales obtenidos en las mediciones de terreno

Anexo III.21 Tabla con ubicación de los perfiles transversales

Perfil	Índice Bathy	Coordenada inicial		Coordenada final	
		S	W	S	W
1	35435	34°02.694'	71° 35.041'	34°02.628'	71° 34.962'
2	35723	34°02.634'	71° 34.941'	34°02.756'	71°34.974'
3	35950	34°02.777'	71°34.946'	34°02.862'	71°34.751'
4	40345	34°02.879'	71°34.748'	34°03.006'	71°34.936'
5	40758	34°03.022'	71°34.927'	34°03.084'	71°34.730'
6	41126	34°03.098'	71°34.730'	34°03.135'	71°34.810'
7	41533	34°03.290'	71°34.773'	34°03.342'	71°34.652'
8	41926	34°03.460'	71°34.746'	34°03.535'	71°34.837'
9	42340	-	-	-	-
10	45622	34°05.394'	71°32.547'	34°05.511'	71°32.579'
11	50914	34°05.991'	71°32.052'	34°06.102'	71°32.153'
12	51441	-	-	-	-
13	71847	34°06.975'	71°30.743'	34°07.040'	71°30.939'
14	72653	34°07.002'	71°30.958'	34°06.875'	71°30.783'
15	75336	34°07.817'	71°30.888'	34°07.762'	71°30.662'
16	80400	34°07.987'	71°30.391'	34°08.206'	71°30.506'
17	81827	34°08.139'	71°29.963'	34°07.971'	71°29.892'
18	83152	34°07.583'	71°29.532'	34°08.245'	71°29.567'
19	84924	34°08.316'	71°29.418'	34°08.101'	71°28.637'
20	91234	34°08.252'	71°28.336'	34°08.752'	71°29.254'
21	94320	34°08.817'	71°29.269'	34°08.913'	71°28.872'
22	95751	34°08.967'	71°29.467'	34°09.193'	71°28.819'

Perfiles Ecosonda Bathy

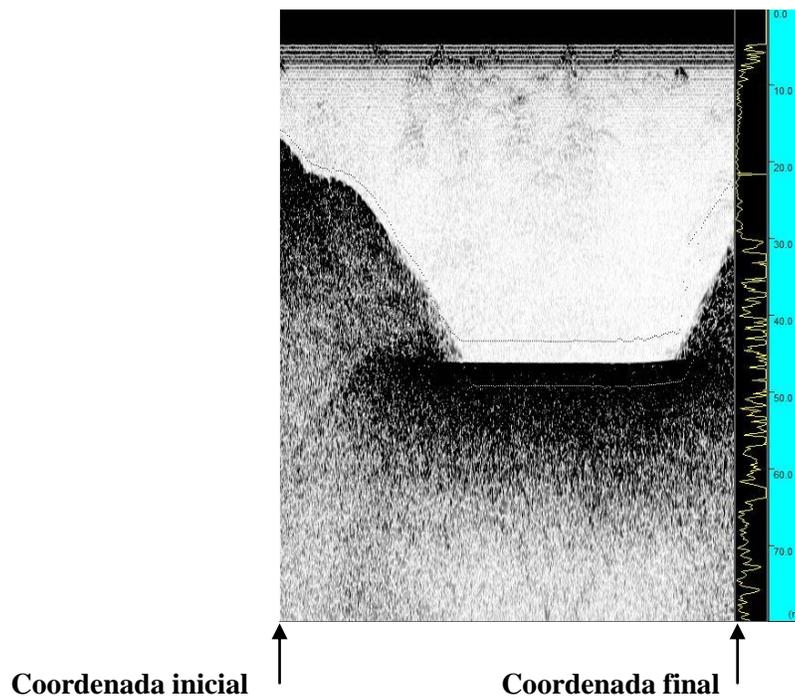
Se muestra los perfiles obtenidos mediante el uso de la ecosonda.

Correcta lectura de las imágenes:

La escala al lado derecho de las imágenes corresponde a la altura relativa entre el instrumento y el fondo del embalse. Dado que en el día de medición en el embalse había una cota de 100.5 m.s.n.m.. Como el instrumento se ubica aproximadamente un metro por debajo de la superficie del agua, el origen en la escala de las imágenes se encontraría aproximadamente en la cota 99.5 m.s.n.m..

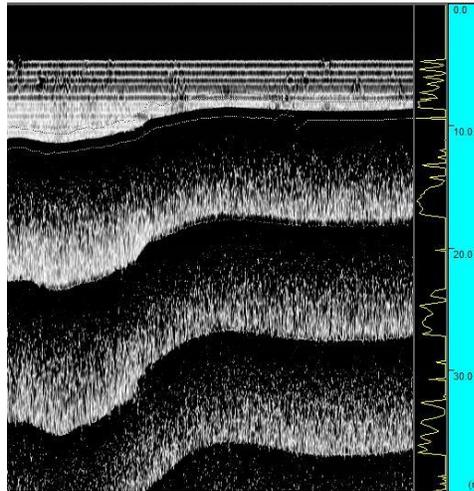
Para obtener el valor de la cota de fondo se resta el valor que entrega la regla a la derecha del perfil a la cota de referencia 99.5, entregando el valor real de cota en el fondo del embalse.

Cuando el perfil es lo suficientemente pequeño para que quepa en una sola imagen, la coordenada inicial corresponde al punto extremo izquierdo de la imagen, mientras que la coordenada final es el punto extremo derecho de la imagen.

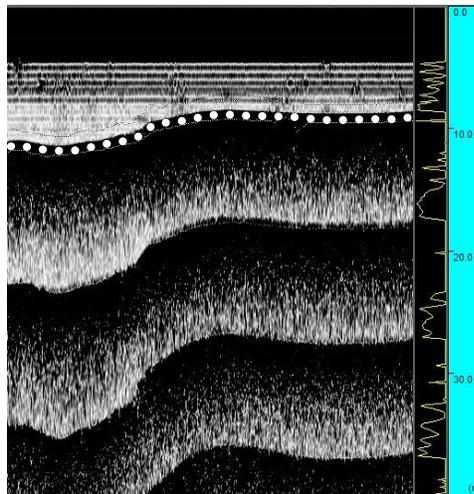


Si el perfil es demasiado largo para incluirse en una sola imagen, se continúa debajo de la imagen anterior hasta completar la longitud del perfil. En este caso la coordenada inicial se ubica en el extremo izquierdo de la primera imagen, mientras que la coordenada final corresponde al punto extremo derecho de la última imagen.

Al estar en aguas muy someras el instrumento produce eco que es recogido por el mismo en forma de fondos falsos, como en este ejemplo:



El sector superior de color negro es una zona donde la ecosonda no puede medir por ser de muy poca profundidad. Luego de superada la barrera mínima de profundidad (5 m) el instrumento atraviesa la columna de agua, que se ve de color blanco en la imagen. El sedimento o fondo del embalse corresponde a la primera barrera de color negro bajando desde la superficie. En la imagen siguiente se marca con puntos el contorno del fondo:



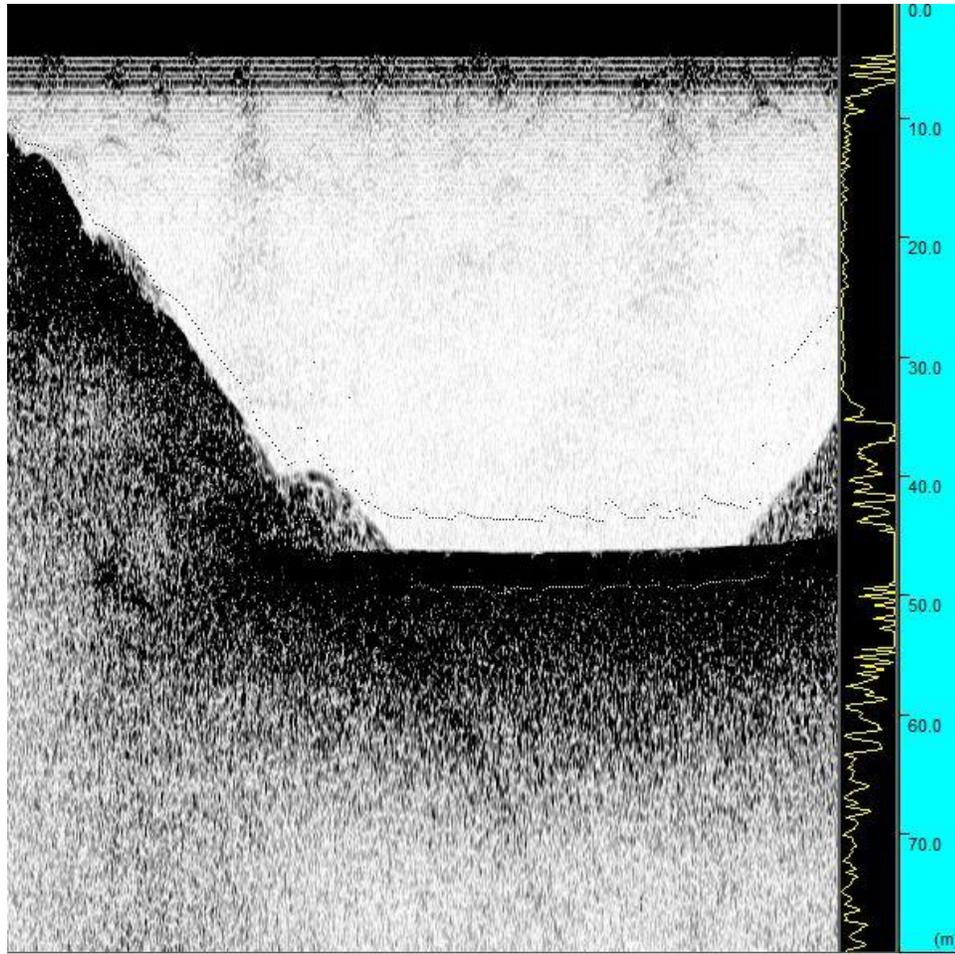
Estos ecos no deben ser tomados en cuenta y no representan ninguna ubicación física real.

Perfil 1



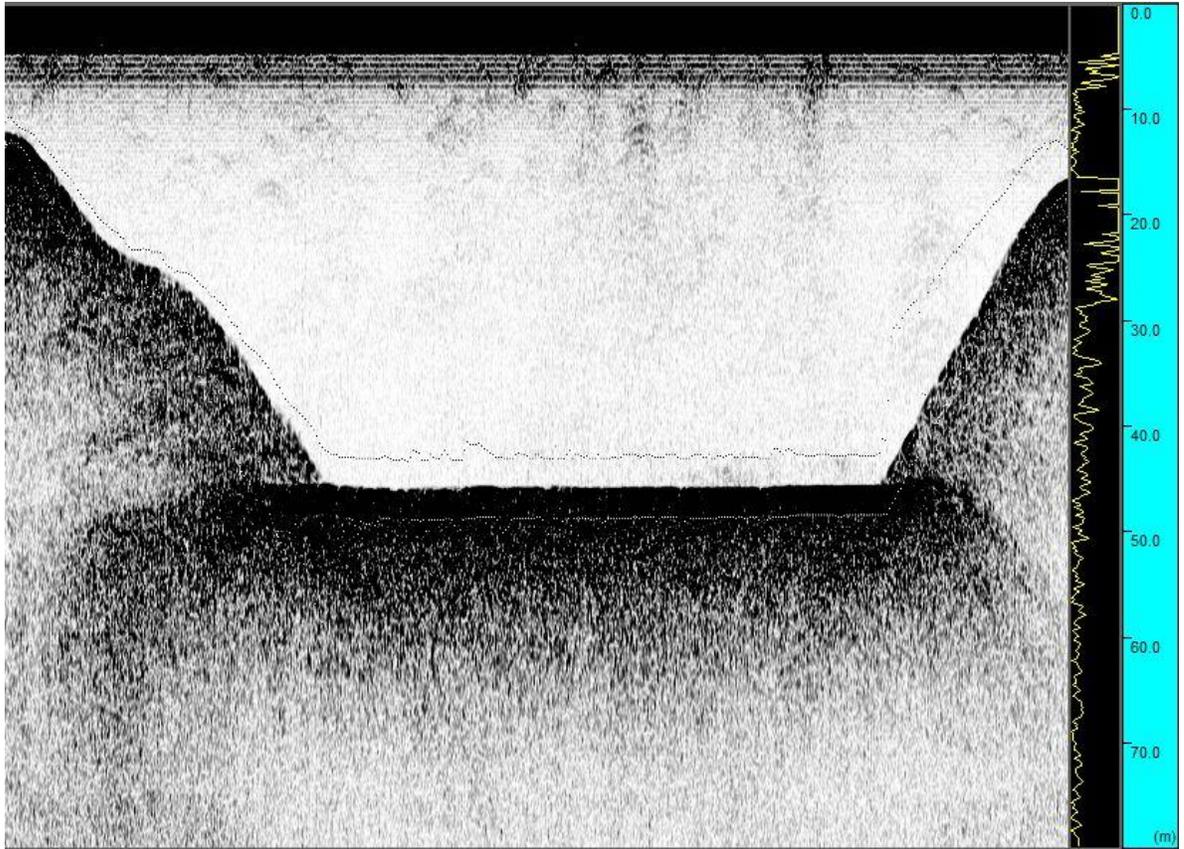
Anexo III.2 Perfil 1

Perfil 2



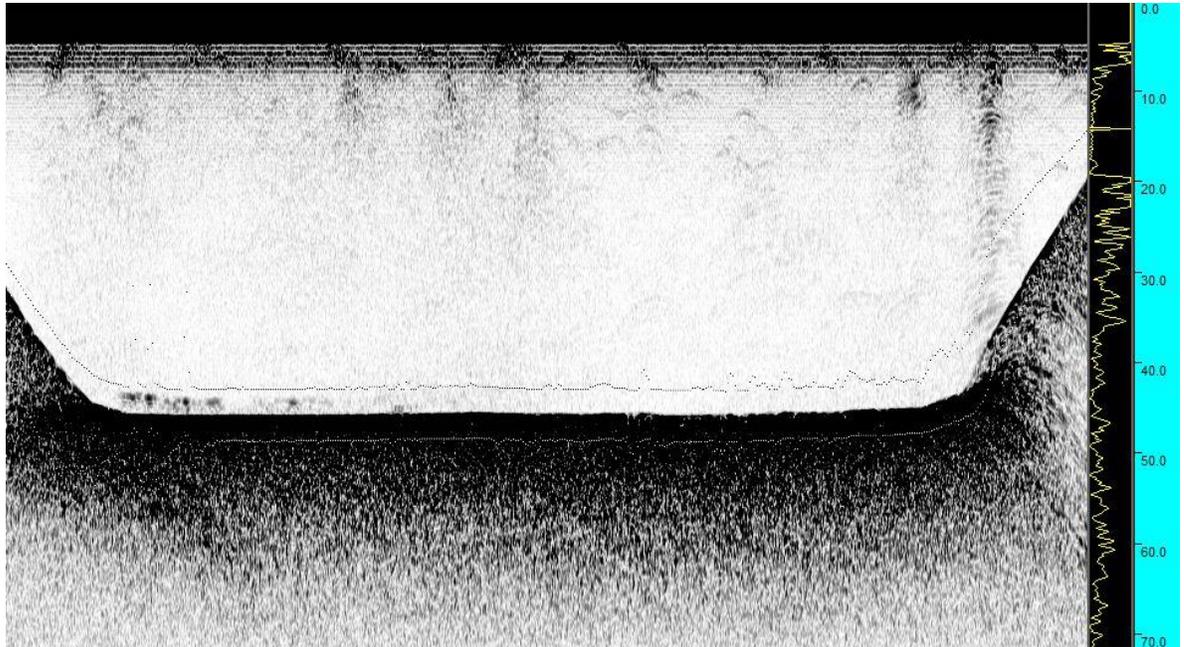
Anexo III.3 Perfil 2

Perfil 3



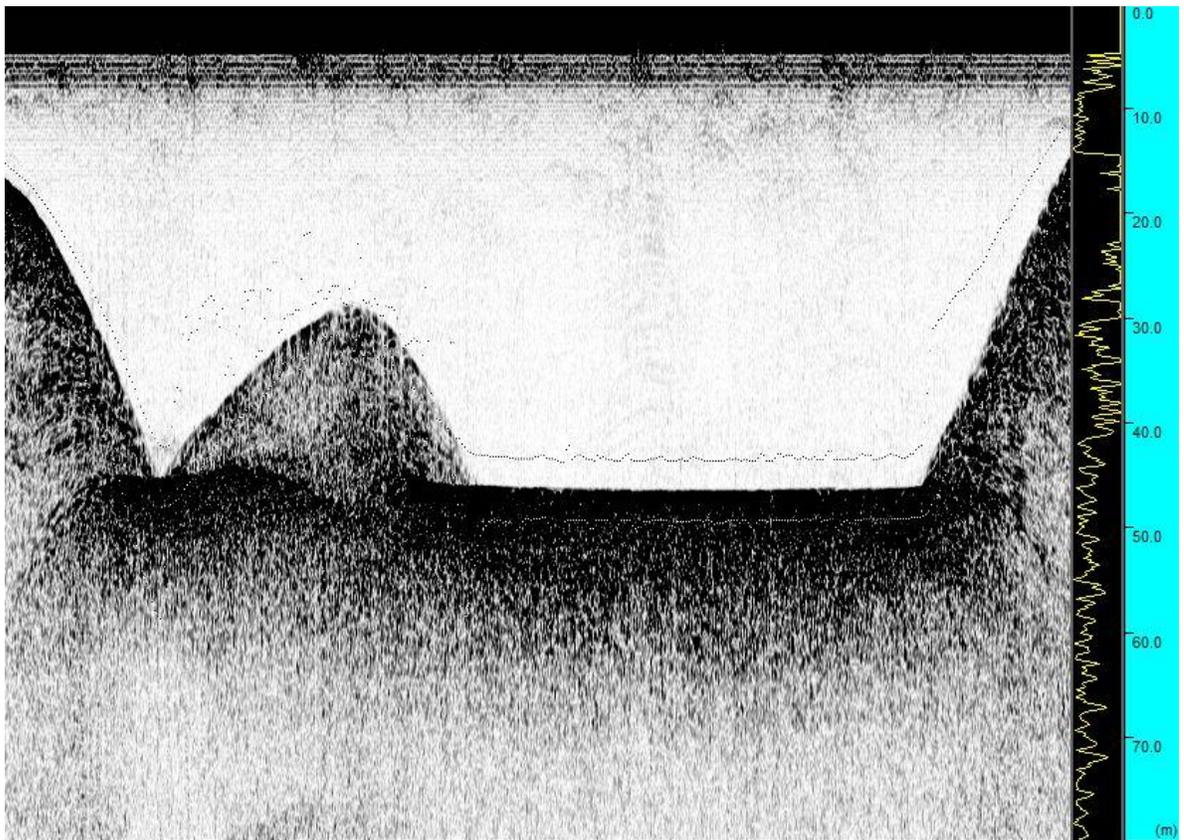
Anexo III.4 Perfil 3

Perfil 4



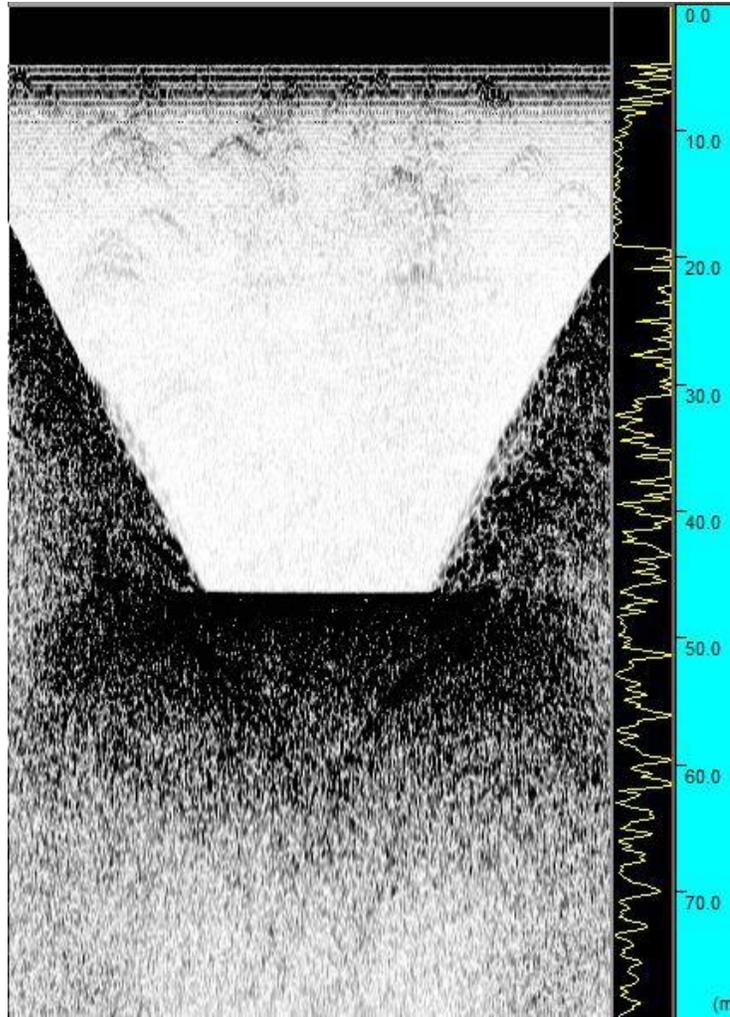
Anexo III.5 Perfil 4

Perfil 5



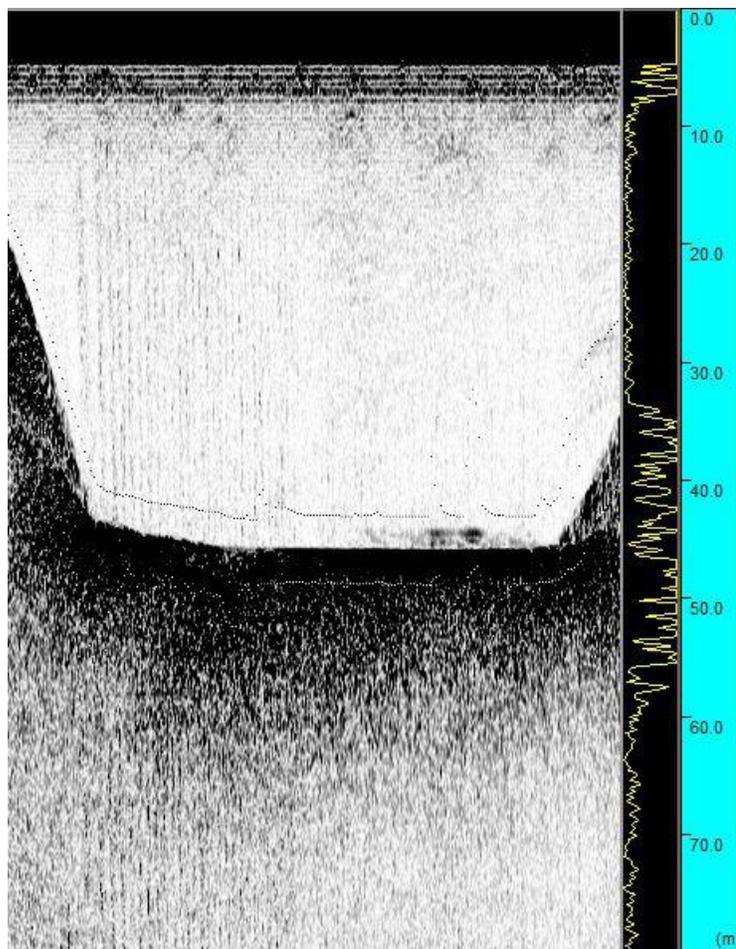
Anexo III.6 Perfil 5

Perfil 6



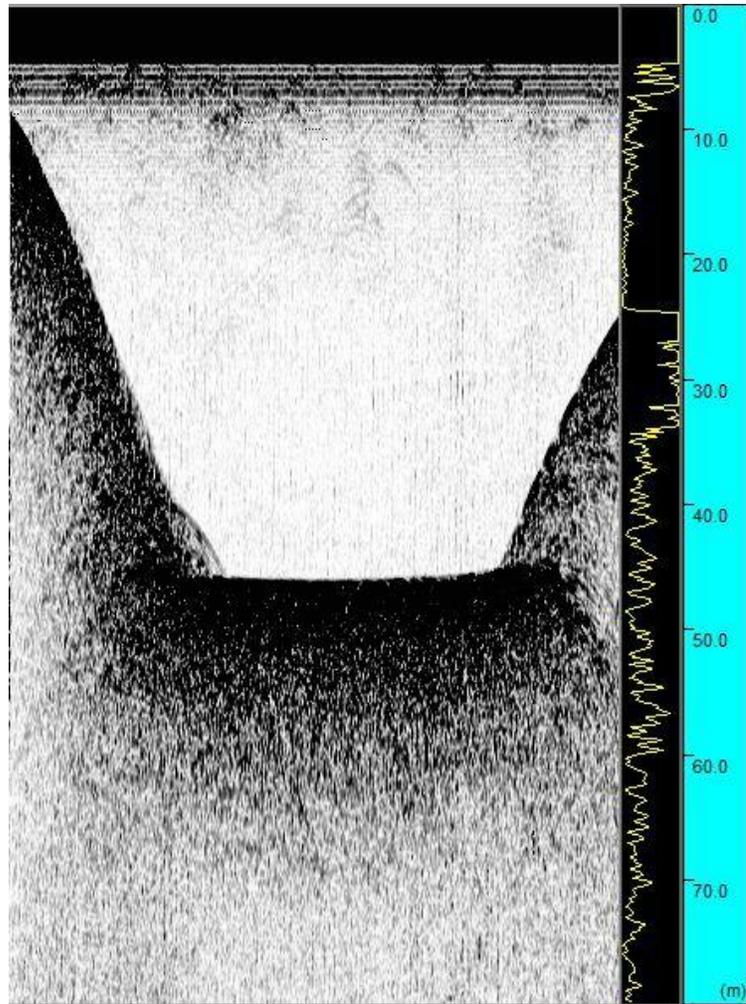
Anexo III.7 Perfil 6

Perfil 7



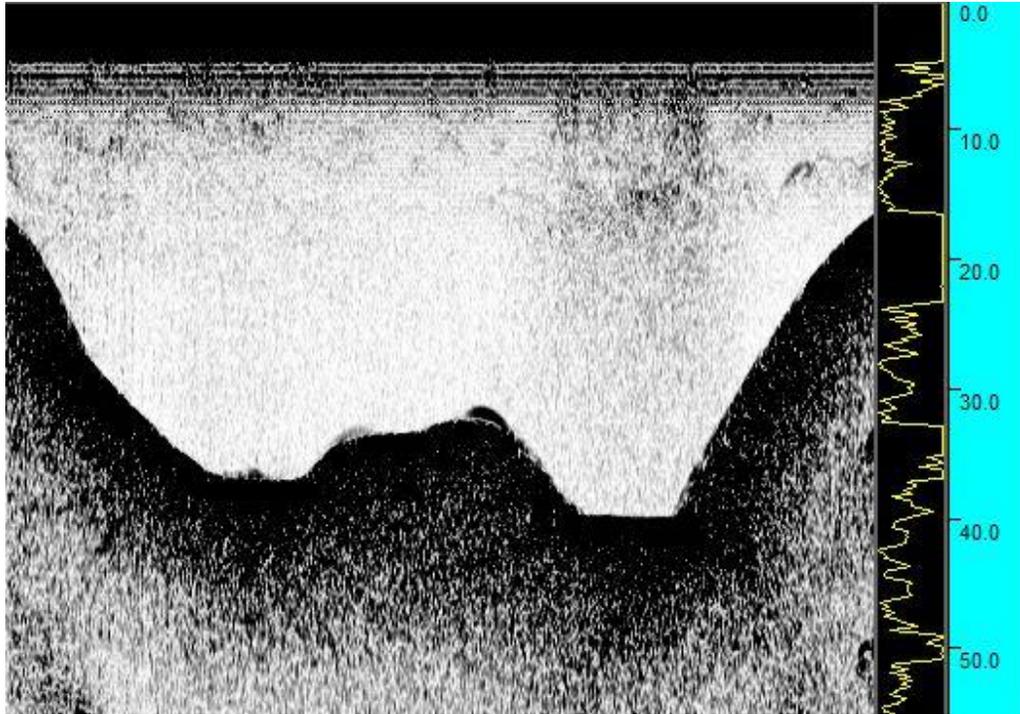
Anexo III.8 Perfil 7

Perfil 8



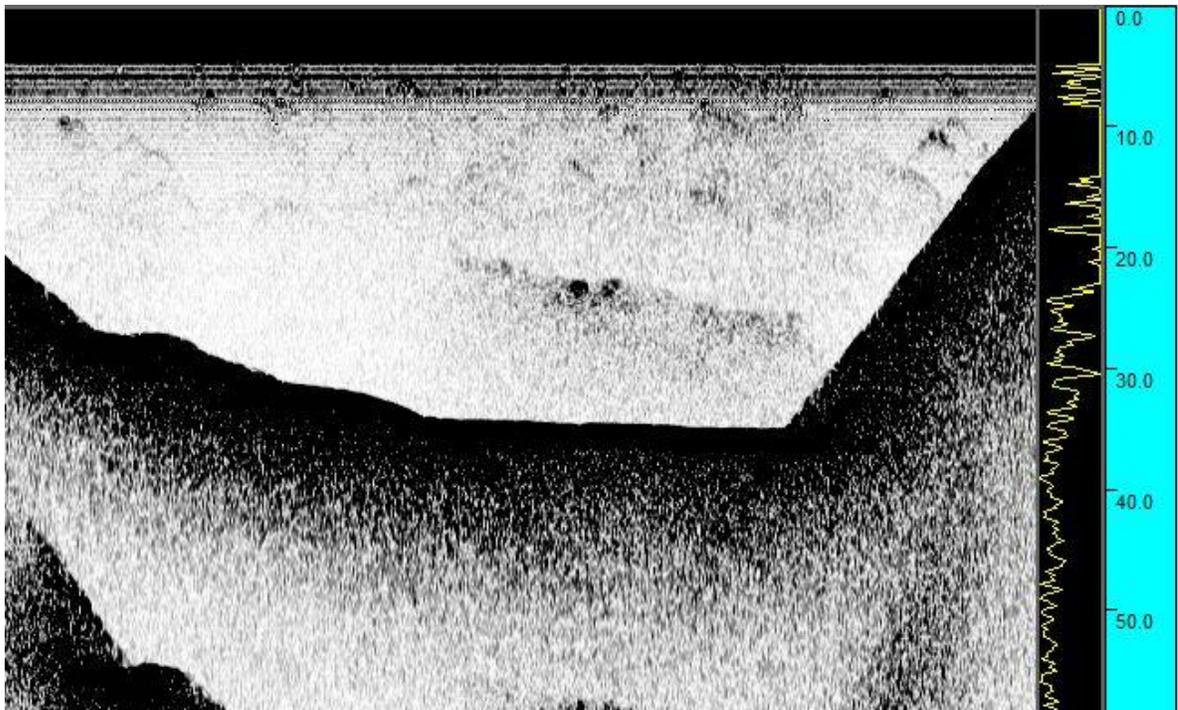
Anexo III.9 Perfil 8

Perfil 10



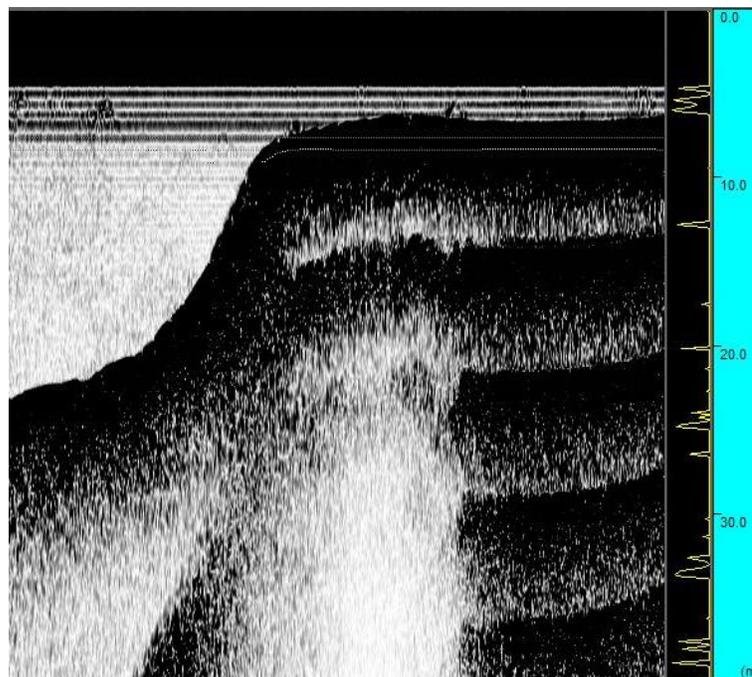
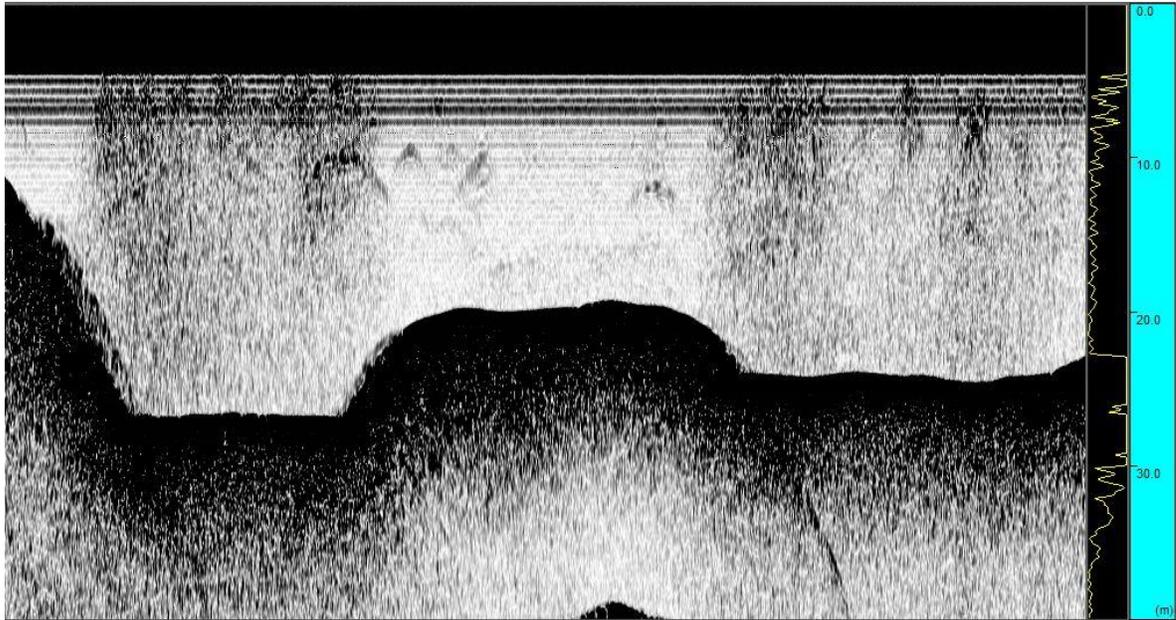
Anexo III.10 Perfil 10

Perfil 11



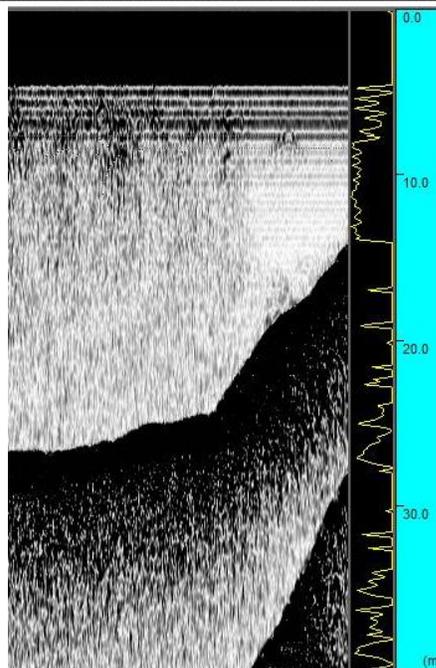
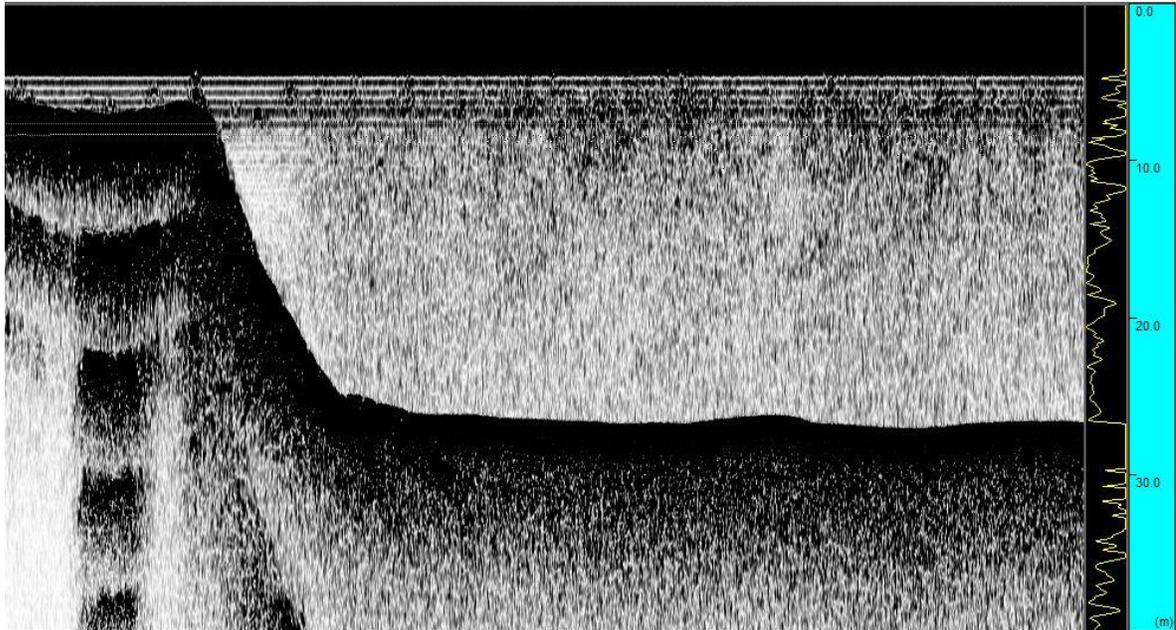
Anexo III.11 Perfil 11

Perfil 13



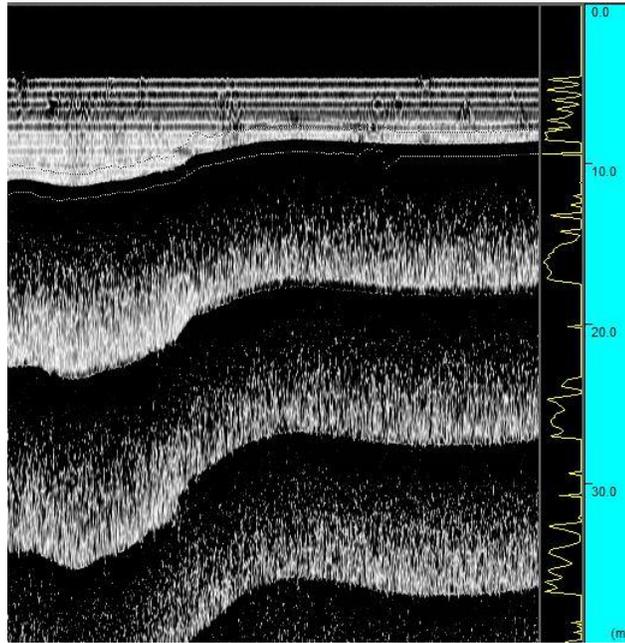
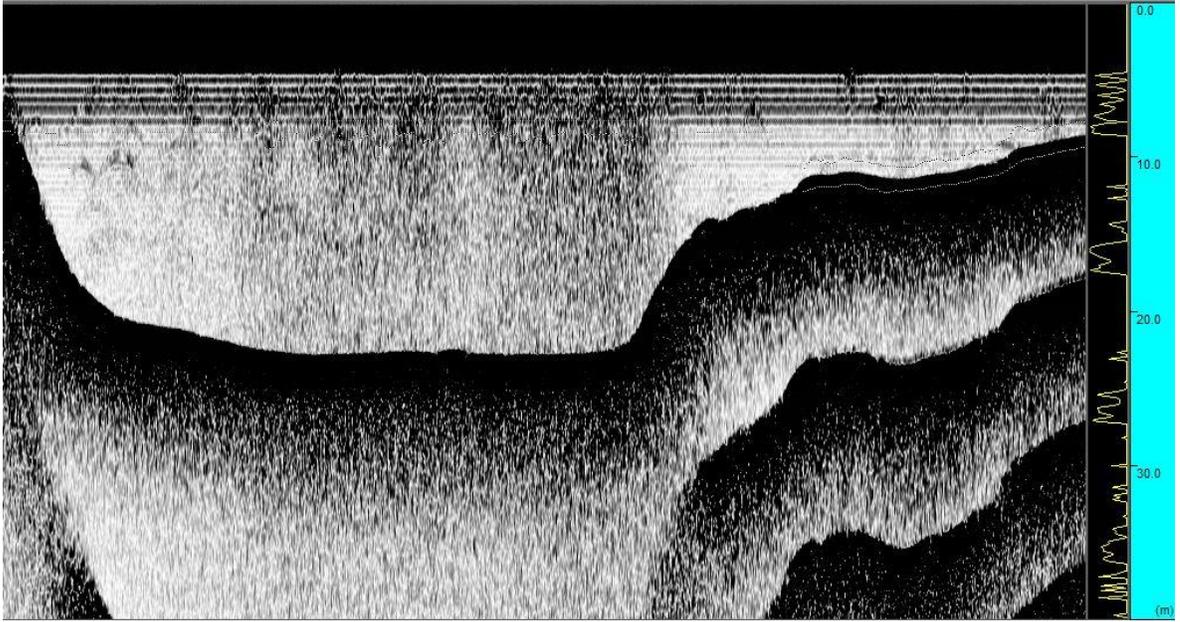
Anexo III.12 Perfil 13

Perfil 14



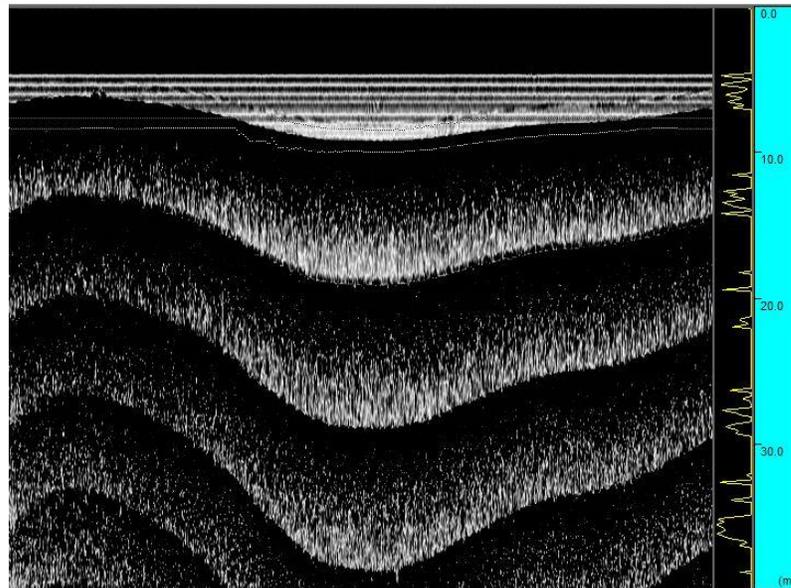
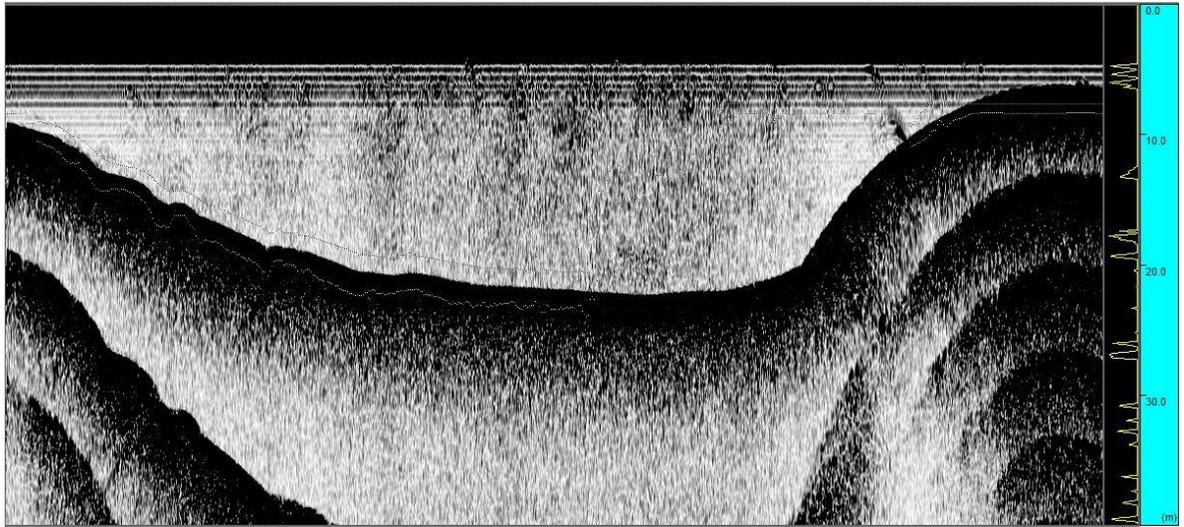
Anexo III.13 Perfil 14

Perfil 15



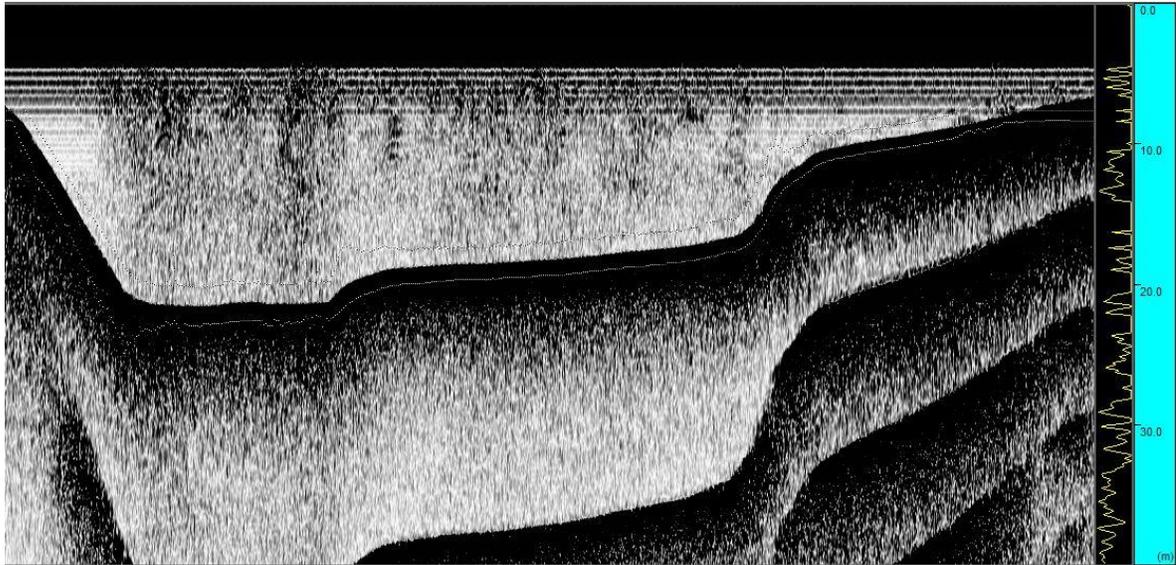
Anexo III.14 Perfil 15

Perfil 16



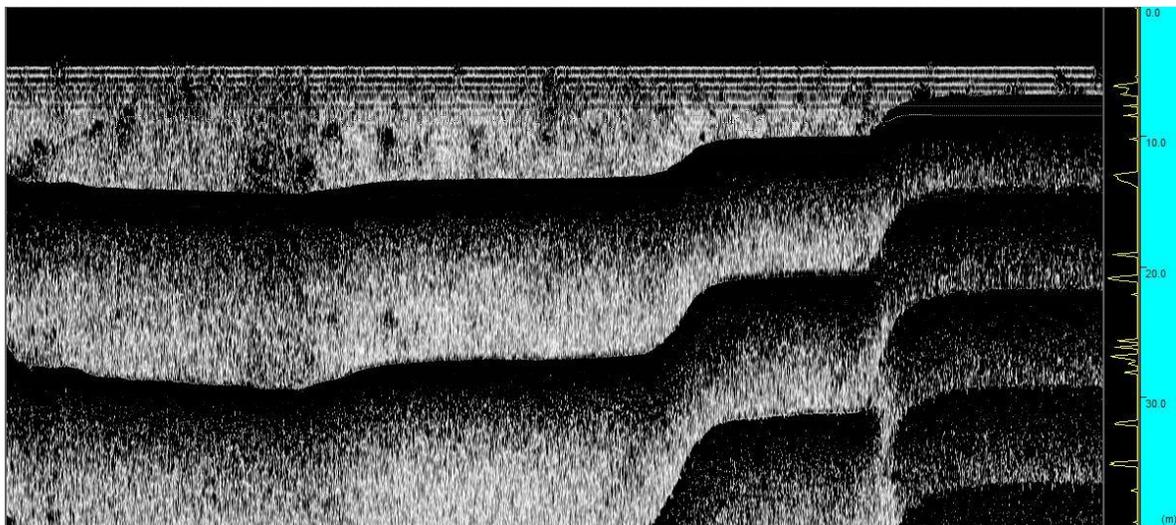
Anexo III.15 Perfil 16

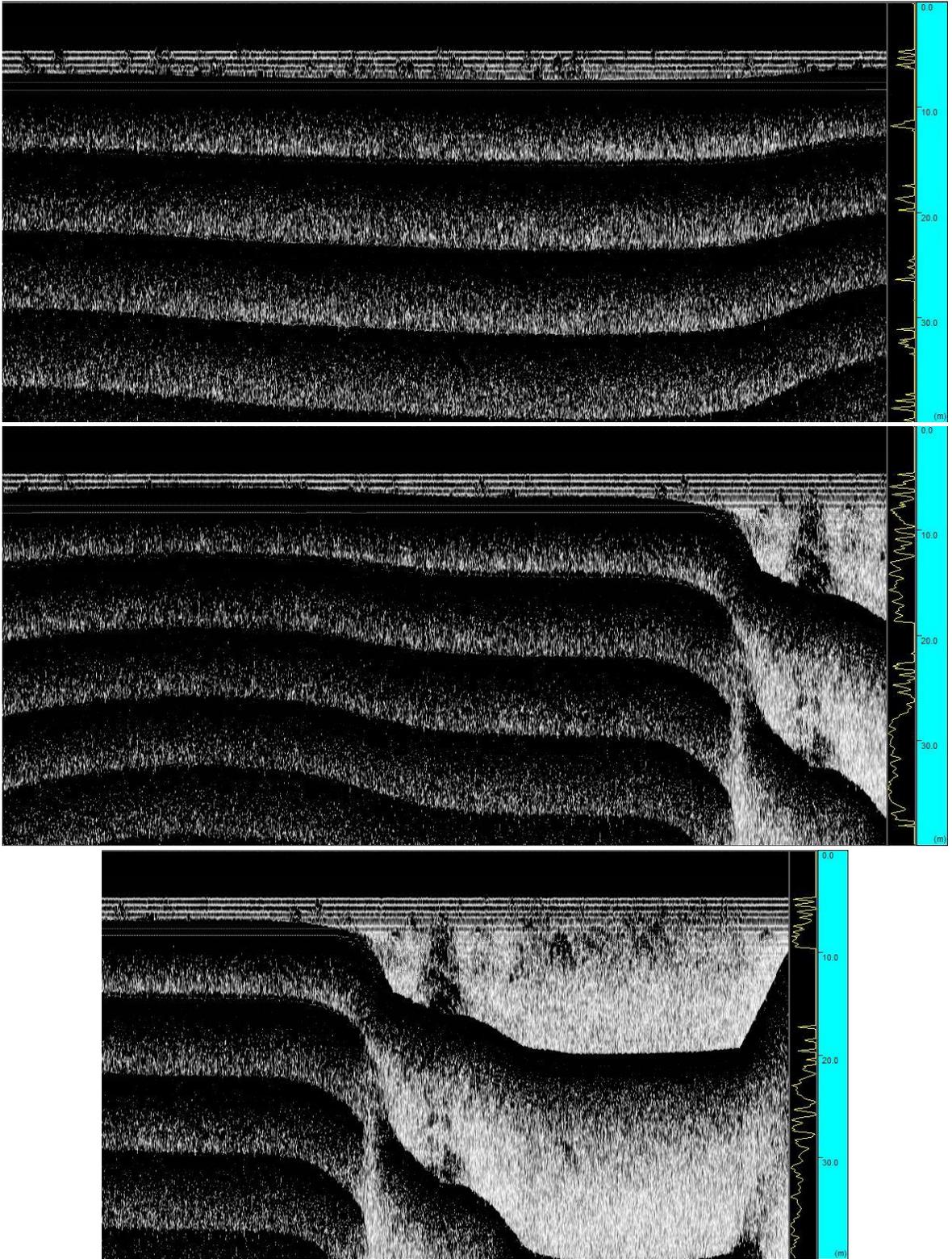
Perfil 17



Anexo III.16 Perfil 17

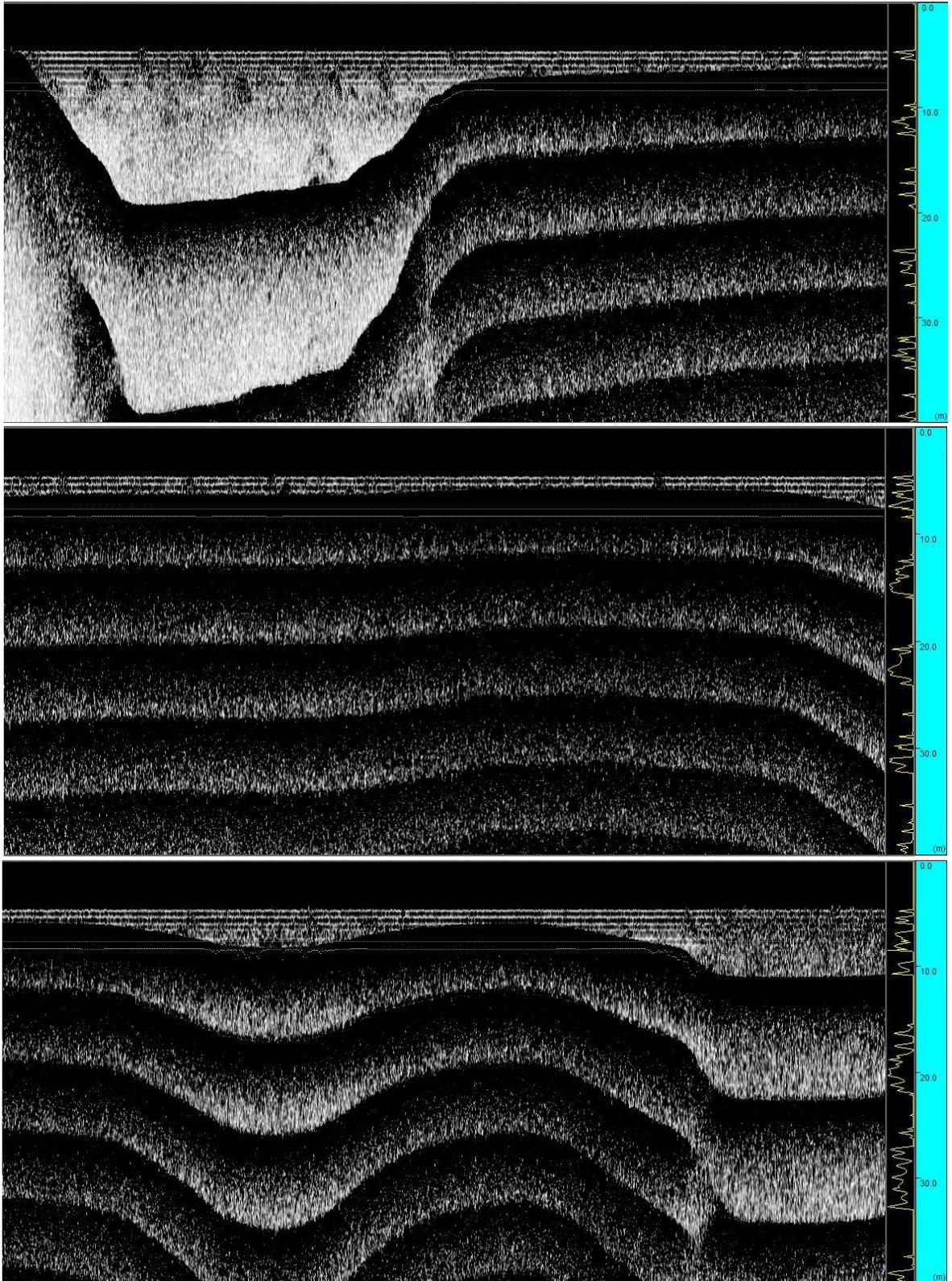
Perfil 18

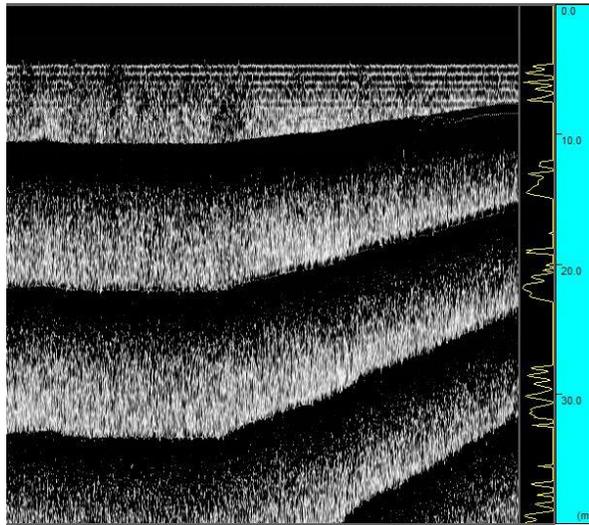
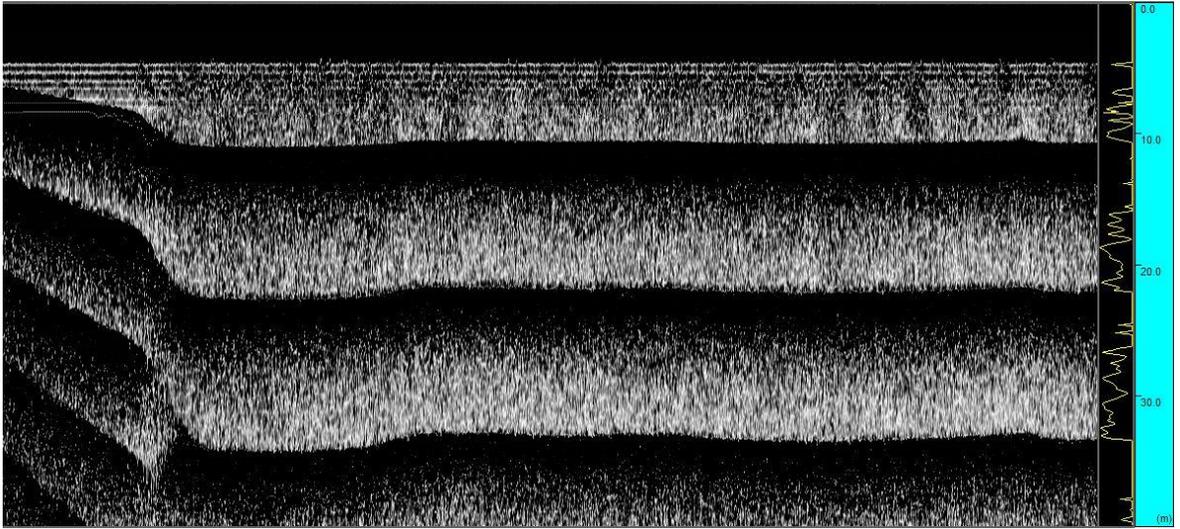




Anexo III.17 Perfil 18

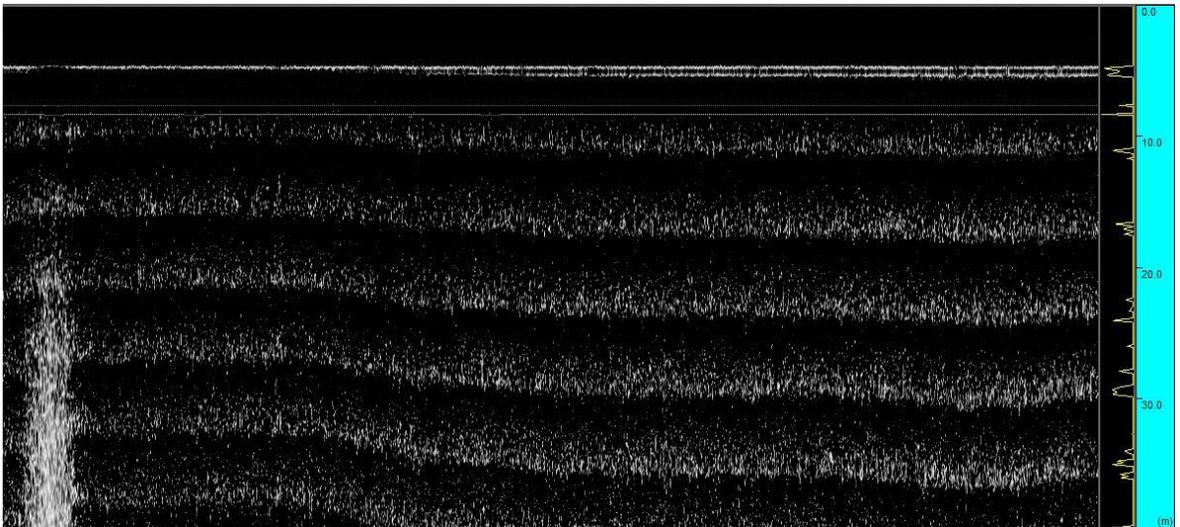
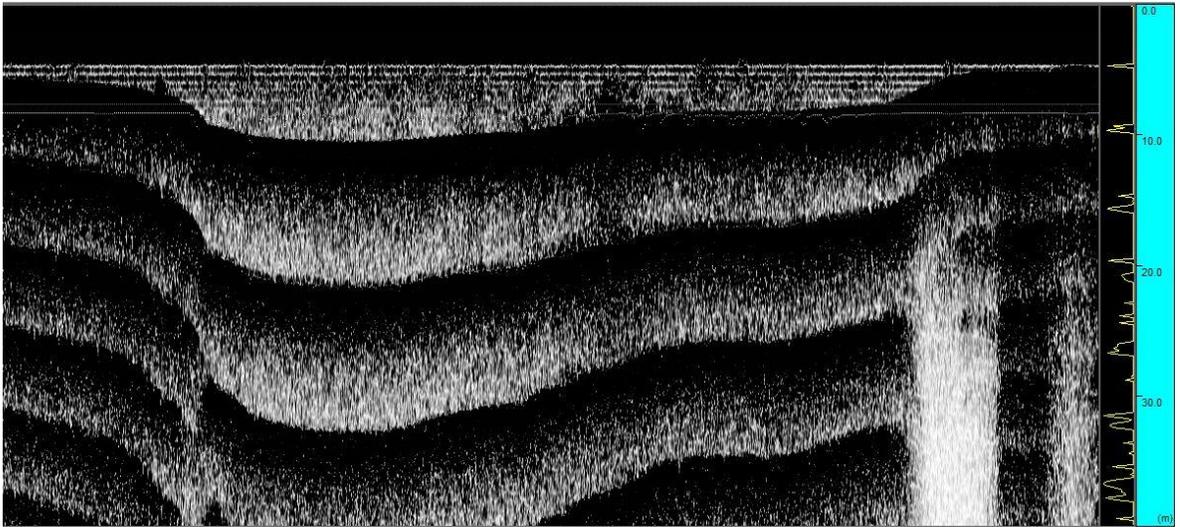
Perfil 19

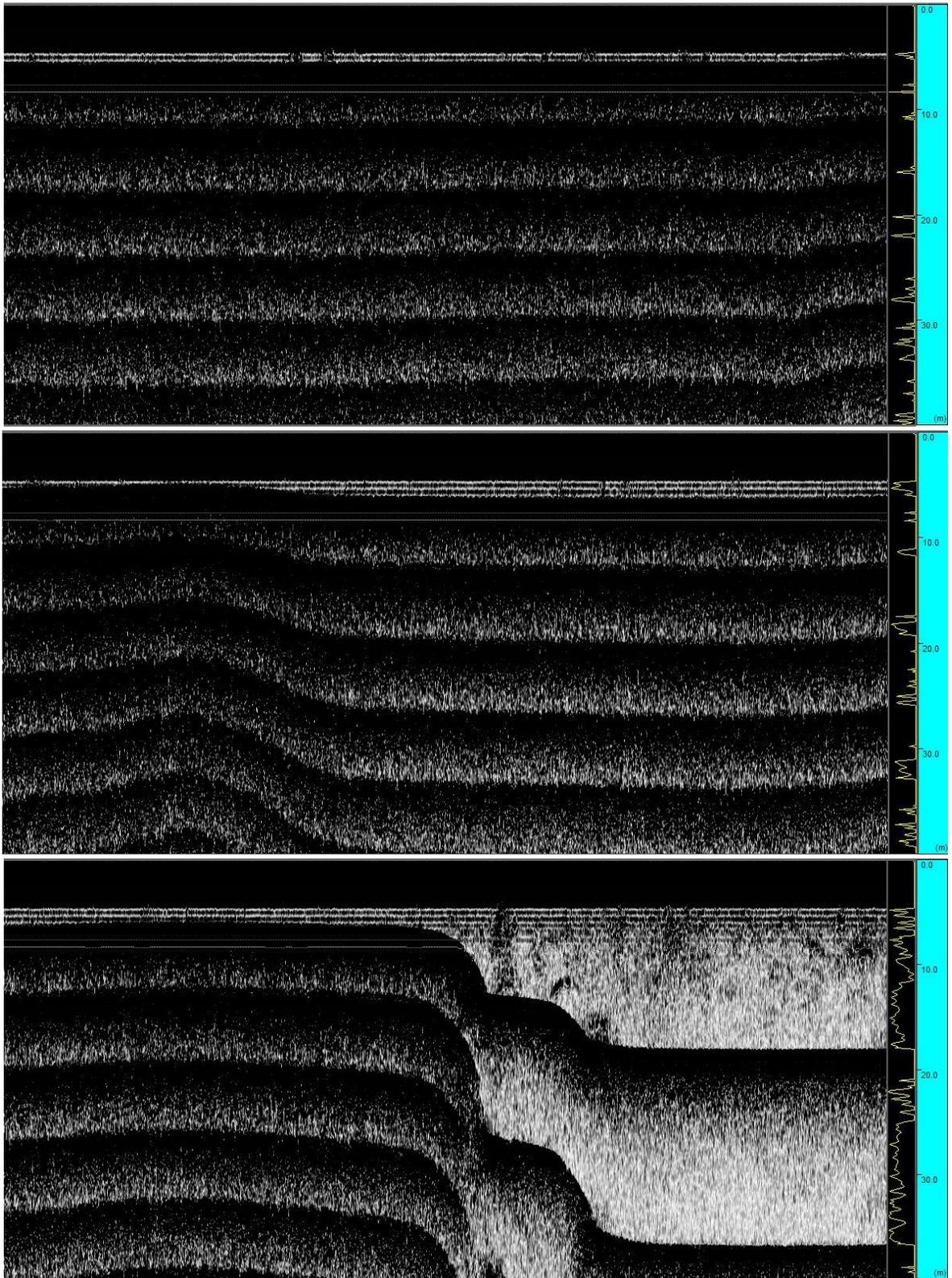


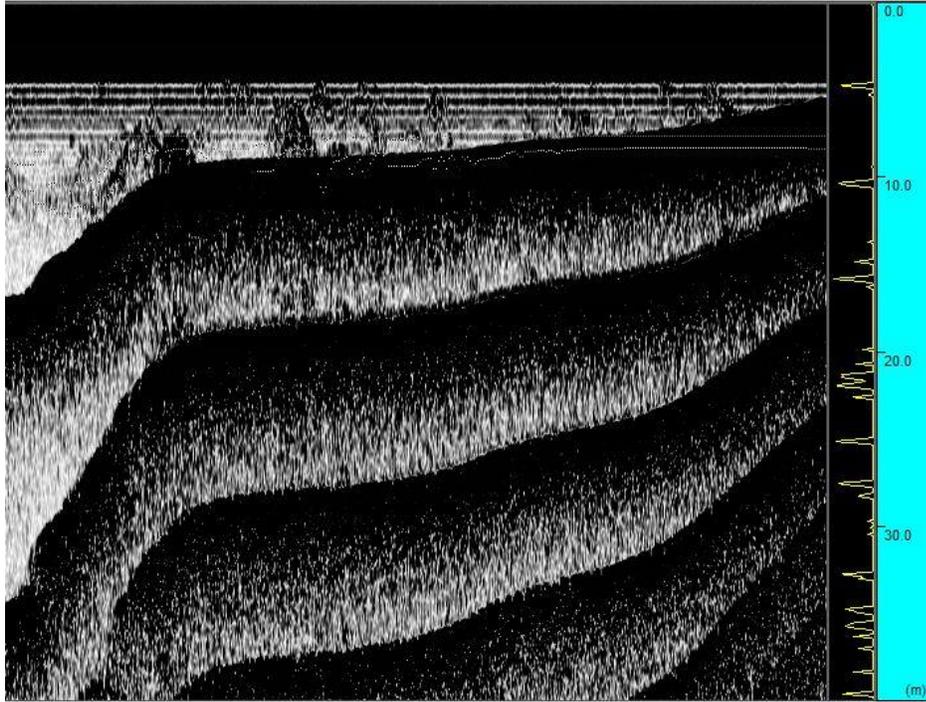
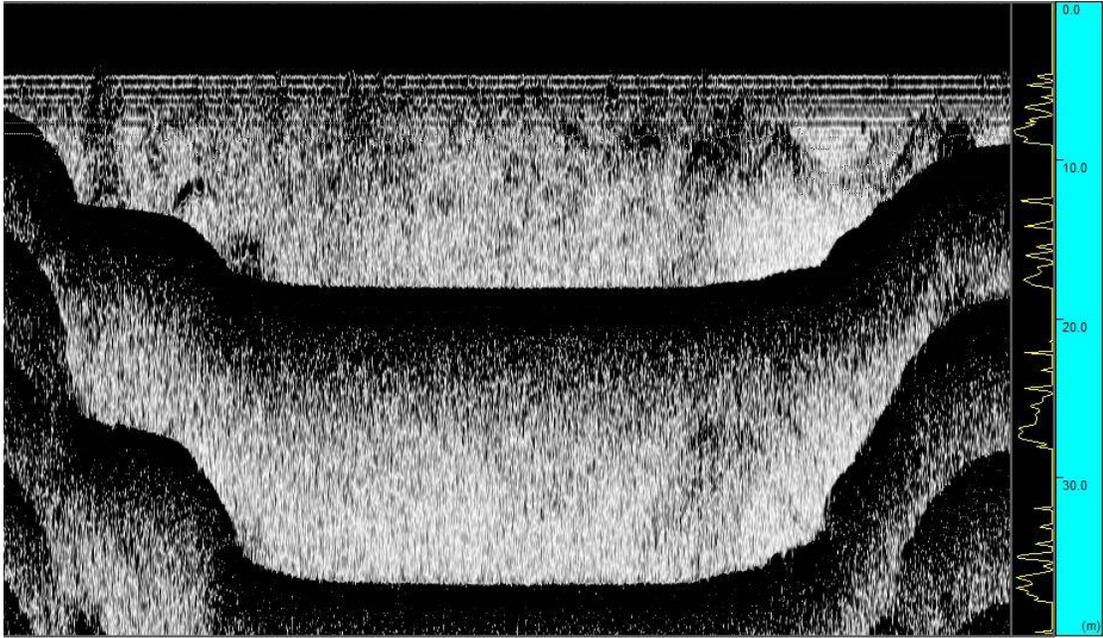


Anexo III.18 Perfil 19

Perfil 20

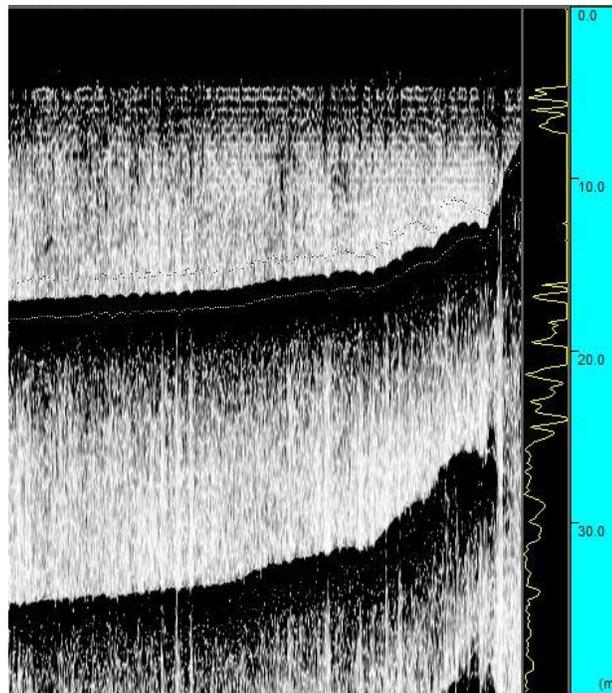
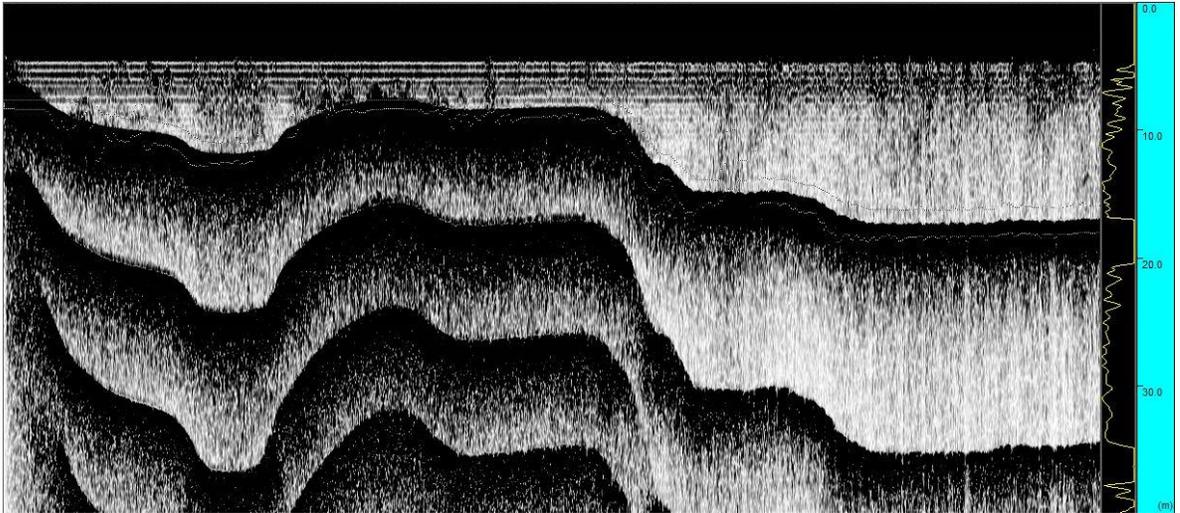






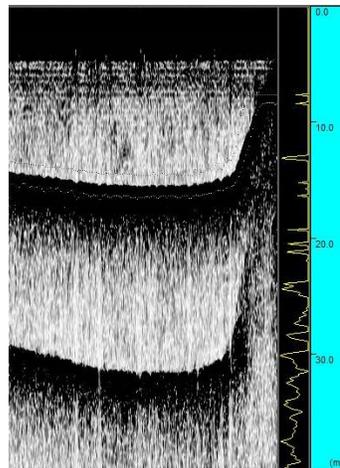
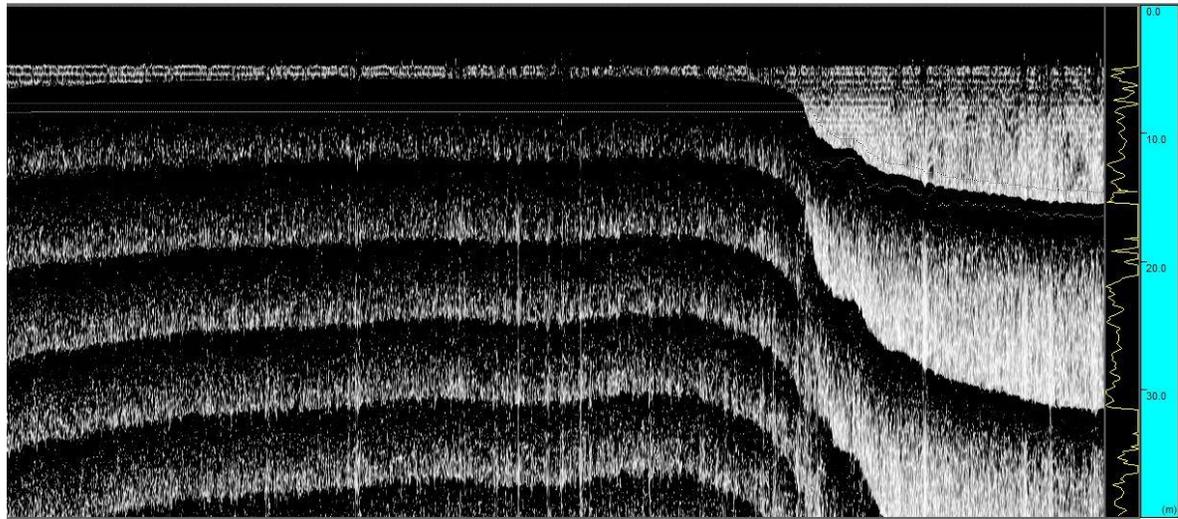
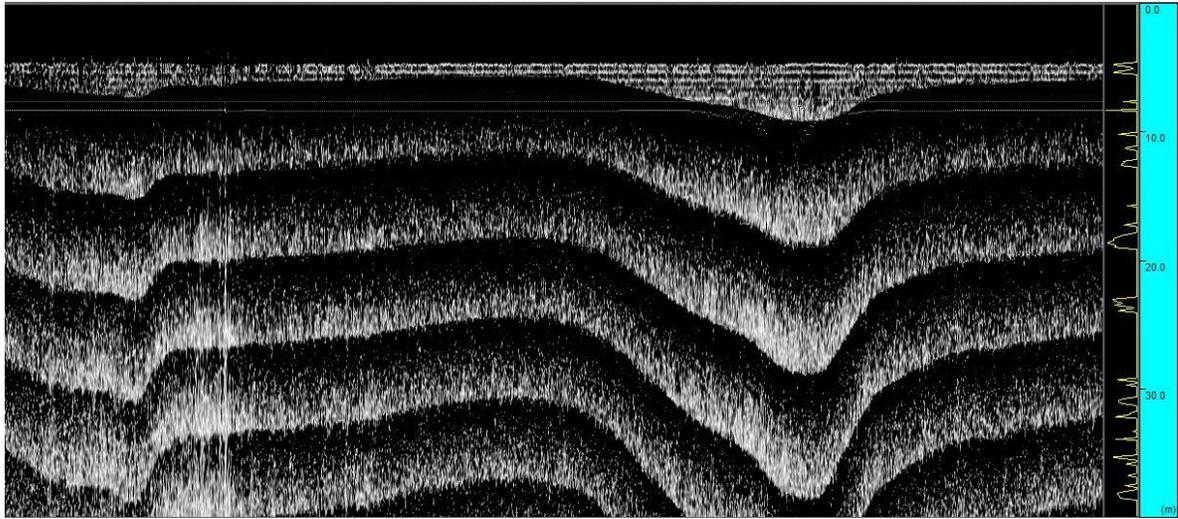
Anexo III.19 Perfil 20

Perfil 21



Anexo III.20 Perfil 21

Perfil 22



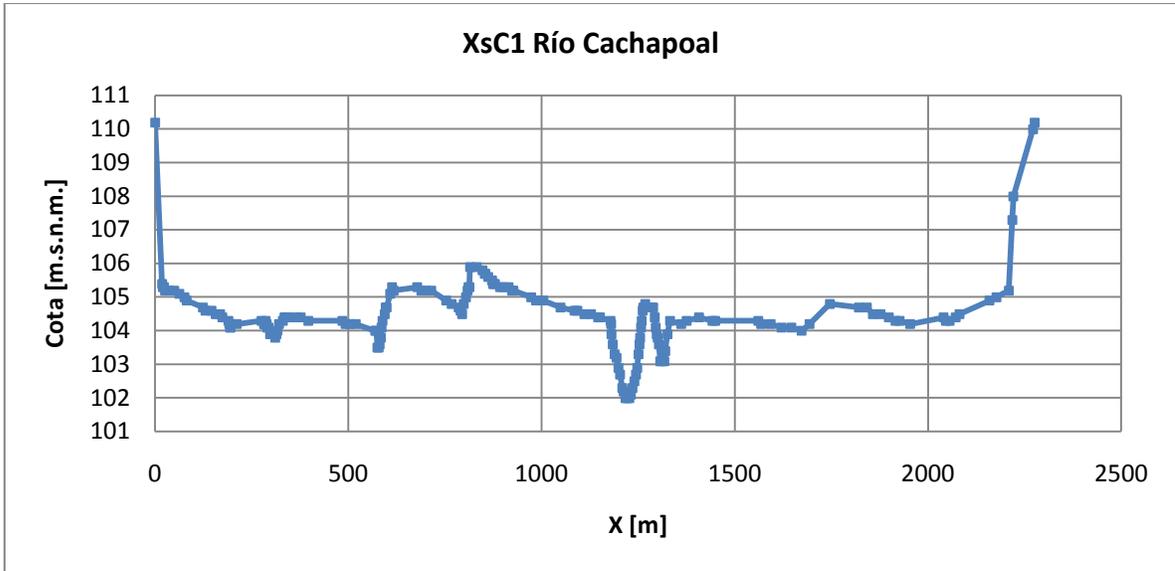
Anexo III.21 Perfil 22

Anexo IV
Perfiles transversales utilizados en el capítulo 6

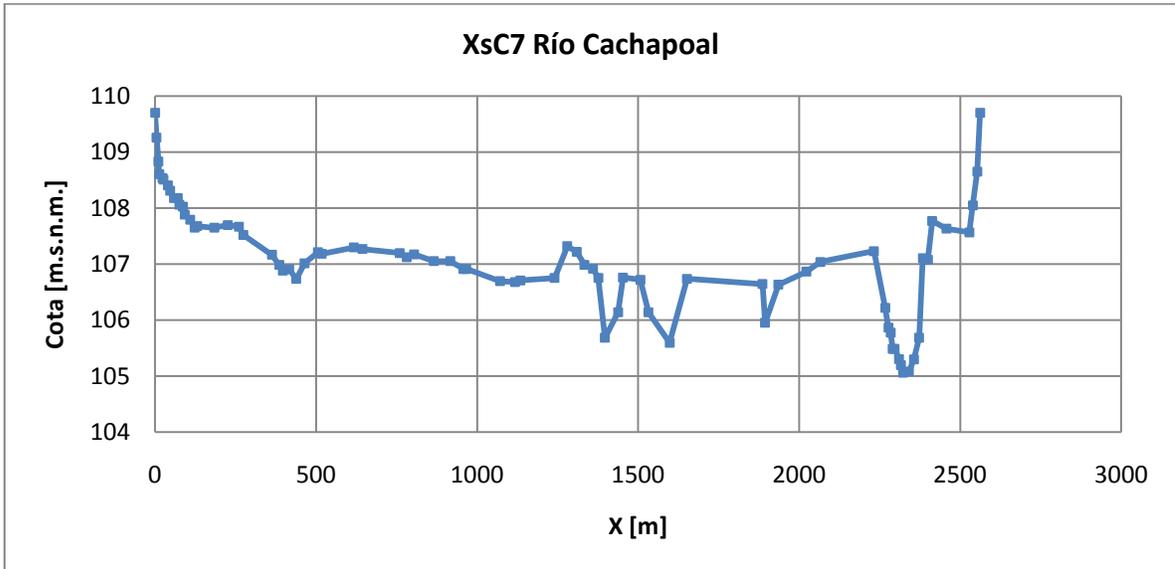
Anexo IV: Perfiles transversales utilizados en el capítulo 6

Río Cachapoal

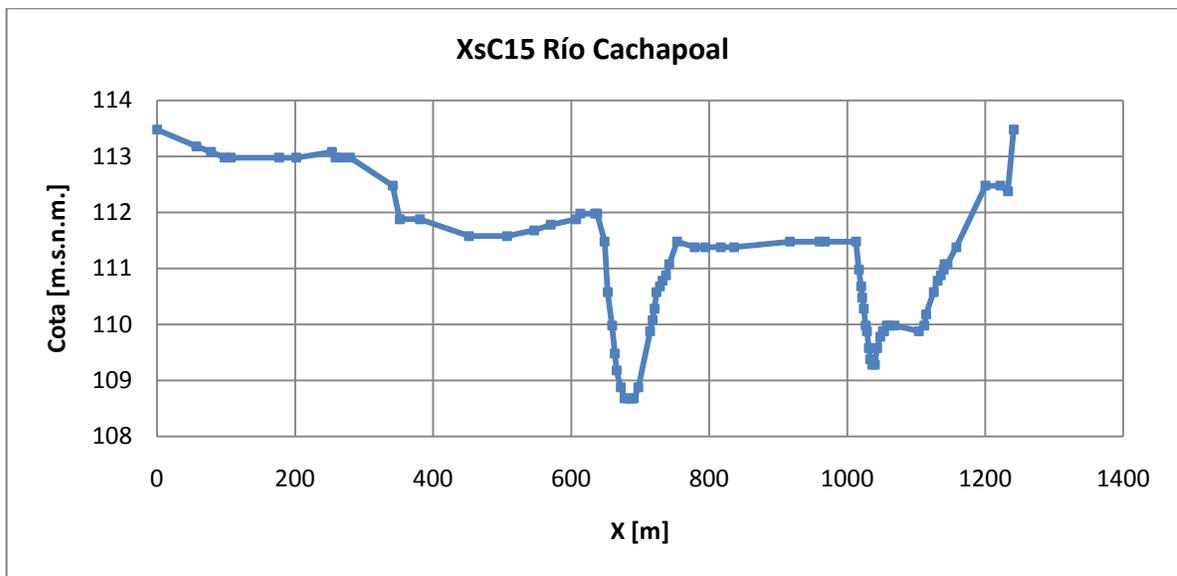
En este caso se ocupan 3 secciones. Según la numeración del capítulo 6 estos corresponden a los perfiles XsC1, XsC7 y XsC15.



Anexo IV.1



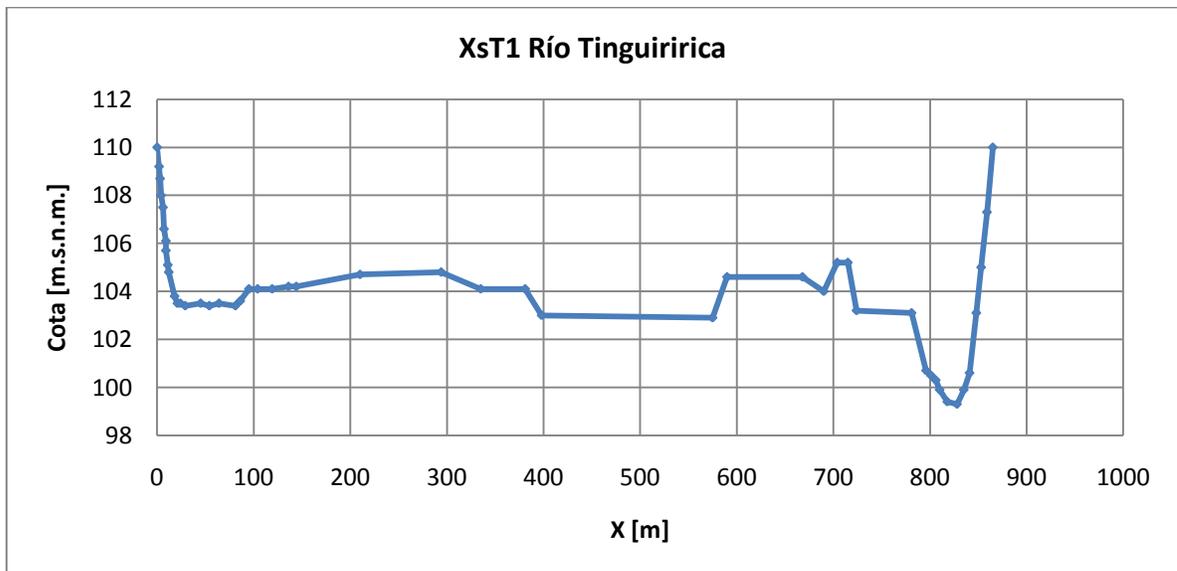
Anexo IV.2



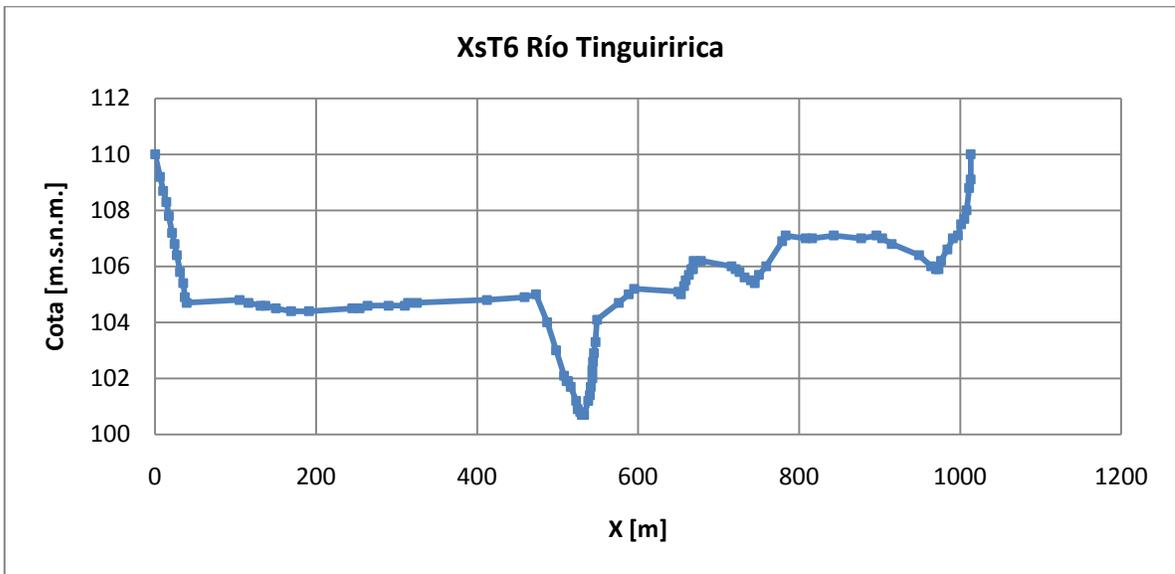
Anexo IV.3

Río Tinguiririca

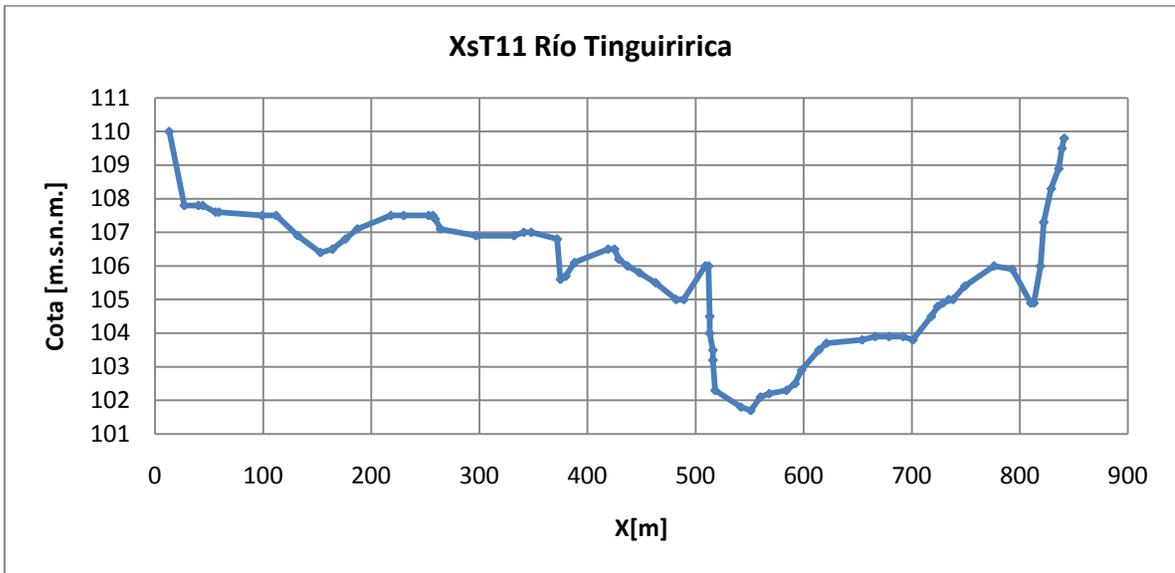
En este caso se utilizan 4 secciones: XsT1, XsT6, XsT11 y XsT15.



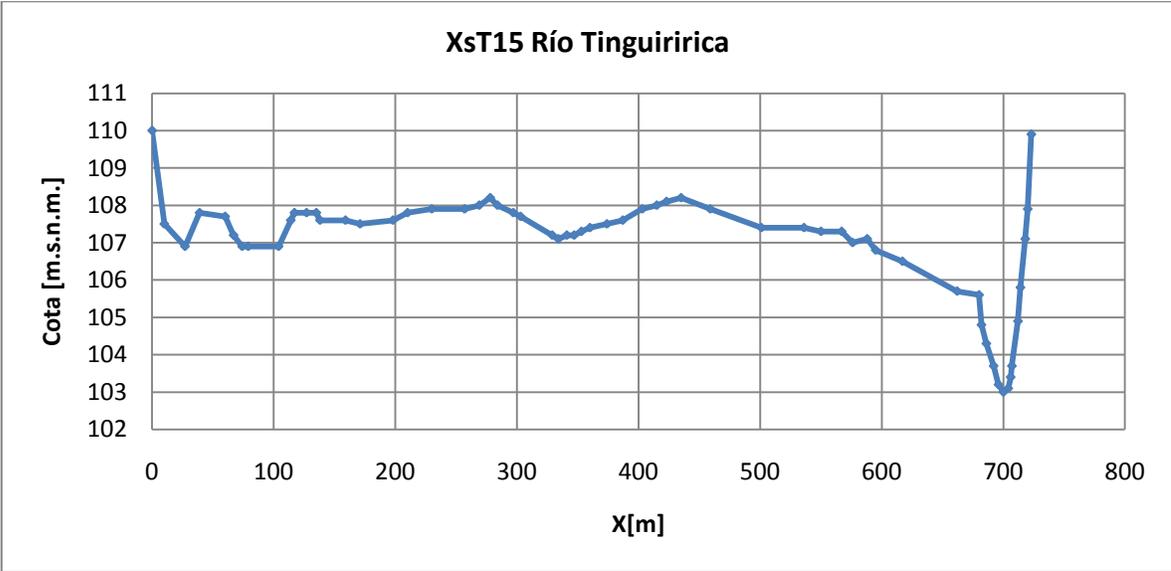
Anexo IV.4



Anexo IV.5



Anexo IV.6



Anexo IV.7