



Instituto de Hidráulica e Hidrología



Estudio del río Madera

Informe final

Jorge Molina Carpio
Philippe Vauchel
Fabiola Ledezma
Thomas Dunne (?confirmar)

Julio 2008

Con el apoyo de:



Foro Boliviano sobre Medio
Ambiente y Desarrollo
FOBOMADE



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	6
1.1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	6
1.2 METODOLOGÍA	7
1.3 EL PROYECTO.....	7
HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA	12
2.1 RÉGIMEN HIDROLÓGICO	12
2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA E HIDRÁULICA DEL TRAMO DE ESTUDIO	16
REMANSO HIDRÁULICO	21
3.1 INFORMACIÓN.....	21
3.1.1 Secciones transversales.....	21
3.1.2 Curvas de descarga en secciones de control	22
3.1.3 Perfiles hidráulicos.....	22
3.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO	23
3.3 REMANSO EN CONDICIONES NATURALES.....	27
3.3.1 Perfiles hidráulicos.....	27
3.4 EFECTO DE REMANSO DE LOS EMBALSES	34
3.4.1 Perfiles hidráulicos.....	36
3.4.2 Efectos de remanso en el tramo binacional	41
3.4.3 Análisis de sensibilidad.....	48
3.4.4 Conclusiones preliminares.....	50
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	51
4.1 CAUDAL SÓLIDO	52
4.1.1 Caudal sólido en suspensión.....	56
4.1.2 Transporte de fondo y caudal sólido total	60
4.1.3 Tendencia de las series de caudal sólido.....	61
4.2 TAMAÑO DEL SEDIMENTO.....	66
4.2.1 Tamaño del sedimento del lecho.....	66
4.2.2 Tamaño del sedimento en suspensión y total	68
REFERENCIAS	70
ANEXO 1	72
ANEXO 2	80
ANEXO 3	93

5. SEDIMENTACIÓN EN EL EMBALSE DE JIRAU

6. CONCLUSIONES

LISTA DE TABLAS

- 1.1: Características generales de las centrales de Jirau y Santo Antonio

- 2.1: Caudales medios mensuales de los ríos Mamoré y Madera
- 2.2: Caudales mensuales (m³/s) en Porto Velho, 1967-2007

- 2.3: Estadística de caudales máximos anuales en Porto Velho

- 3.1: Calibración del modelo: comparación entre niveles de agua (NA) observados y simulados, tramo Santo Antonio -Jirau
- 3.2: Calibración del modelo: comparación entre niveles de agua (NA) observados y simulados, Tramo Jirau-Abuná-Araras
- 3.3: Perfil de la línea de agua (m) en condiciones naturales en el tramo Cachuela Madera aguas abajo (418.1) – Jirau aguas abajo (207)
- 3.4: Niveles de agua (m) junto a la represa de Jirau
- 3.5: Niveles y velocidades de flujo en el embalse de Santo Antonio
- 3.6: Niveles y velocidades de flujo inducidos por el embalse de Jirau
- 3.7: Perfil de la línea de agua (m) con represa en el tramo Santo Antonio (418.1) – Jirau aguas abajo (207)
- 3.8: Perfil de la línea de agua (m) con represa en el tramo Cachuela Madera aguas abajo (418.1) – Jirau (210)
- 3.9: Sobrelevación en la sección 338 (42.6), según Furnas-Odebrecht (2004)

- 4.1: Caudal sólido medio en suspensión (miles ton/día), río Madera en Porto Velho
- 4.2: Serie de caudal sólido total (miles ton/día) en Porto Velho
- 4.3: Granulometría modificada del lecho del río Madera en Porto Velho
- 4.4: Porcentajes ponderados de arcilla, limo y arena en las muestras de Furnas

LISTA DE FIGURAS

- 1.1: Ubicación de las centrales hidroeléctricas del río Madera

- 2.1: El río Madera y la zona del proyecto
- 2.2: Caudales medios mensuales en Porto Velho, 1931-97
- 2.3: Cachuela de Teotonio
- 2.4: Cachuela de Ribeirao
- 2.5: Sección transversal del río Madera en la estación de Abuná-Vila
- 2.6: Orilla izquierda del río Madera cerca de la confluencia con el río Abuná
- 2.7: Cachuelas del tramo Guayaramerín-Porto Velho
- 2.8: Vertedero y canal con cambio de pendiente

- 3.1: Curva Nivel de agua – Caudal en la sección 210
- 3.2: Perfil hidráulico y del lecho del río Madera entre Santo Antonio (81) y Jirau aguas abajo (207)
- 3.3: Perfil hidráulico entre secciones de Jirau aguas abajo (207) y cachuela Madera aguas abajo (418.1)
- 3.4: Río Madera en Capitanía de Puerto Manoa, 31/8/07
- 3.5: Río Madera en Capitanía de Puerto Manoa, 15/11/07
- 3.6: Río Madera en Capitanía de Puerto Manoa, 17/03/08
- 3.7: Perfil esquemático de los proyectos
- 3.8: Curva Nivel de agua – Caudal en la estación hidrométrica de Abuná-Vila
- 3.9: Perfil de la línea de agua entre Santo Antonio (81) y Jirau aguas abajo (207)
- 3.10: Perfil de la línea de agua entre Jirau (210) y cachuela Madera aguas abajo (418.1)
- 3.11: Velocidad de flujo (m/s) entre Santo Antonio (81) y Jirau aguas abajo (207), con y sin represa
- 3.12: Velocidad (m/s) entre Jirau (210) y Cachuela Madera (418.1)
- 3.13: Río Madera en Abuná-Vila (sección 338), Curva Nivel de agua-Caudal con influencia del embalse de Jirau, según Furnas-Odebrecht
- 3.14: Río Madera en Abuná-Vila (sección 338), Curva Nivel de agua-Caudal con influencia del embalse de Jirau, según el presente estudio
- 3.15: Nivel de agua NA versus caudal en la sección 338, con influencia del embalse de Jirau y coeficiente n reducido en 0.005
- 3.16: Perfiles hidráulicos con variación del coeficiente n ($\pm 15\%$), tramo Abuná-Cachuela Madera

- 4.1: Caudal sólido en la Cuenca Amazónica
- 4.2: Relieve de la cuenca y ríos principales
- 4.3: Curva $Q_s=f(Q)$ en Porto Velho, según Furnas-Odebrecht (2004)
- 4.4: Variación temporal del caudal líquido (débit) y la concentración de sedimentos en suspensión (MES), río Madera en Porto Velho
- 4.5: Caudal Q (m³/s) y caudal sólido en suspensión (ton/s), río Beni en Cachuela Esperanza
- 4.6: Caudal Q (m³/s) y caudal sólido en suspensión (ton/s), río Mamoré en Guayaramerín
- 4.7: Concentración media en la sección (MES) según caudal, río Beni en Cachuela Esperanza
- 4.8: Concentración de sedimentos en suspensión en Porto Velho

- 4.9: Caudal sólido en suspensión y caudal líquido en Porto Velho
- 4.10: Comparación de los caudales sólidos anuales en Porto Velho y la suma de las estaciones de Cachuela Esperanza y Guayaramerín
- 4.11: Relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ en Porto Velho, según Furnas
- 4.12: Curva de doble masa del río Madera en Porto Velho, según Furnas
- 4.13: Relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ en Cachuela Esperanza
- 4.14: Relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ en Guayaramerín
- 4.15: Caudales medios anuales en Porto Velho, 1978-2007
- 4.16: Relaciones caudal líquido –caudal sólido en Rurrenabaque
- 4.17: Relaciones caudal líquido –caudal sólido em Puerto Villaroel
- 4.18: Curvas granulométricas medias del lecho del río Madera en Porto Velho
- 4.19: Curvas granulométricas del lecho en Porto Velho, Taruma y Camaleao

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Se estima que el río Madera transporta la mitad de los sedimentos de toda la cuenca amazónica, por lo que un análisis del transporte y deposición de sedimentos es indispensable para todo proyecto de represas en ese río. Los estudios de ingeniería (2004) y Evaluación de Impacto Ambiental (EIA, 2005) de las represas de Jirau y Santo Antonio, realizados por las empresas Furnas y Odebrecht, incluyeron ese tipo de análisis. Sin embargo, los resultados fueron muy diferentes y hasta contradictorios. Los estudios de ingeniería, que usaron el método preliminar de la curva de Brune, estimaron que se perdería solamente 50% del volumen de los embalses y que después de cierto tiempo, ya no habría sedimentación. En cambio, el EIA, que usó un modelo unidimensional de transporte-deposición, estimó que la sedimentación continuaría después de 50 años de operación y que la sedimentación en el embalse de Jirau, se extendería más allá de Brasil, afectando el tramo binacional del río Madera y por tanto territorio boliviano. Esa sedimentación incrementaría los niveles de agua y por tanto el área de inundación.

Ante el problema de que las represas tuviesen impactos transfronterizos, Furnas y Odebrecht rechazaron los resultados de sus propios estudios, apoyándose en la opinión de algunos consultores contratados por ellos. En particular, descartaron los resultados del modelo unidimensional con el argumento de que faltaba información, especialmente en el tramo binacional del río Madera. Pese a sus contradicciones y por la fuerte presión política, el IBAMA, organismo ambiental del Gobierno brasileño, aceptó la posición de Furnas y Odebrecht y otorgó la licencia ambiental.

En ese marco y por medio de Internacional Rivers Network (IRN), se propuso realizar un análisis independiente del transporte y deposición de sedimentos y del efecto de remanso hidráulico, en el tramo de río Madera a ser afectado por los embalses. En noviembre de 2007, la Fundación Blue Moon aceptó financiar parte de los costos de ese análisis, dentro de un grupo de acciones más amplio sobre el Proyecto Hidroeléctrico del río Madera.

El análisis se realizó en base a la información existente en los estudios de Furnas-Odebrecht, la información proporcionada por el Gobierno brasileño al Gobierno boliviano y los datos de la Agencia Nacional de Aguas (ANA), para el sector brasileño de la cuenca. Para Bolivia se recopilaron y procesaron datos hidrometeorológicos, sedimentológicos y topobatimétricos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y del Institut du Recherche pour Développement (IRD), instituciones que manejan las estaciones del norte amazónico de Bolivia, en el marco del programa ORE-Hybam.

Los objetivos del presente estudio son:

- Evaluar los efectos que las represas de Jirau y Santo Antonio tendrán sobre el funcionamiento hidráulico (niveles, velocidades, etc) del tramo del río Madera entre Porto Velho y la confluencia del río Beni, mediante un análisis de remanso hidráulico.

- Evaluar la posible sedimentación inducida por los embalses, con énfasis en el tramo binacional entre Abuná y la confluencia del río Beni.

1.2 METODOLOGÍA

La simulación del comportamiento hidráulico (niveles de agua, velocidades, etc) se realizó mediante el modelo HEC-RAS versión 4.0 (2008), desarrollado por el US Army Corps of Engineers. El HEC-RAS es un modelo unidimensional que permite calcular perfiles hidráulicos de cursos de agua para condiciones naturales y artificiales, como es el caso de las condiciones inducidas por represas. Requiere información menos detallada que los modelos bi y tridimensionales, lo que fue un factor que se tomó en cuenta al seleccionarlo.

Se usó el módulo de flujo permanente de HEC-RAS, que usa las ecuaciones de conservación de la masa y energía. Los datos de secciones transversales fueron obtenidos de los levantamientos topobatimétricos realizados por FURNAS-ODEBRECHT en Brasil y por SENAMHI-ENDE en Bolivia. Los datos de caudal líquido y sólido fueron obtenidos de un análisis hidrológico realizado en base a los registros de las estaciones hidrométricas de Porto Velho en Brasil y Cachuela Esperanza y Guayaramerín en Bolivia.

La simulación del transporte y deposición de sedimentos se realizó con el módulo Sediment Transport Analyses (STA) de la versión 4.0 del HEC-RAS. Este módulo, derivado del modelo HEC-6, fue incorporado recientemente al HEC-RAS. Es un modelo unidimensional de transporte-deposición de sedimentos, que puede trabajar sobre los datos disponibles y permite evaluar el comportamiento sobre un periodo de simulación extenso.

Se realizó también un análisis de sensibilidad de las principales variables de incertidumbre, que se identificaron en base a un análisis de los estudios previos y las limitaciones de información.

1.3 EL PROYECTO

En 1971 el Ministerio de Minas y Energía de Brasil identificó las cachuelas de Jirau, Santo Antônio y Teotônio como posibles sitios para la construcción de centrales hidroeléctricas. La ELETRONORTE realizó en 1983 estudios de inventario de la cuenca del Madera, profundizando los estudios en algunos afluentes del Bajo Madera. Estos estudios dieron origen posteriormente a estudios de factibilidad de algunas centrales de tamaño medio, como las del río Jiparana, un afluente de la margen derecha. Paralelamente, la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE, 1985) de Bolivia identificó y realizó el estudio de diseño final de la central hidroeléctrica de Cachuela Esperanza (35 MW) en el río Beni, con el propósito de abastecer de energía a las ciudades de Riberalta y Guayaramerín.

Las crecientes necesidades de energía del Brasil (se estima un crecimiento de la demanda de 83,000 MW el 2002 a 124,000 MW el 2012), plantean la necesidad de nuevos proyectos. Así durante los años 2001 y 2002, se realizaron los Estudios de Inventario Hidroeléctrico del río Madera, en forma conjunta por las empresas Furnas Centrais Elétricas SA y CNO-Constructora Noberto Odebrecht SA, que tienen la licencia de la Agencia Nacional de Electricidad del Brasil (ANEEL). Las actividades de ingeniería consultora fueron

desarrolladas por PCE-Projetos e Consultorias de Engenharia Ltda y Furnas Centrais Elétricas SA. Las mismas empresas concluyeron el estudio de factibilidad en 2004 y junto con Leme Engenharia, los estudios de impacto ambiental en 2005.

Los estudios proponen la construcción de las centrales hidroeléctricas de Jirau y Santo Antonio en el tramo brasileño Abuná-Porto Velho, que fueron seleccionadas como la combinación más conveniente desde el punto de vista técnico-económico. Se ha propuesto una tercera central (Ribeirao), que aprovecharía el desnivel de algo más de 20 m que existe en el tramo binacional Abuná-Guayaramerín y posiblemente, una cuarta en Cachuela Esperanza sobre el río Beni, situada íntegramente en territorio boliviano. La figura 1.1 muestra la ubicación de esas cuatro centrales.

Figura 1.1: Ubicación de las centrales hidroeléctricas del río Madera



Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

La tabla 1.1 resume las principales características técnicas y de costos de las centrales Jirau y Santo Antonio. En el caso de la central de Jirau, la necesidad de evitar la inundación de territorio boliviano obligó a considerar un nivel variable durante el año, lo que marca una diferencia importante con los estudios de inventario.

Tabla 1.1: Características generales de las centrales de Jirau y Santo Antonio

	SANTO ANTONIO	JIRAU
Potencia instalada (MW)	3150	3300
Energía media, p. histórico (MW med) - cota constante	2196	2225
Cota variable		1964
Caída bruta media (m)	16.8	17.10
Caída líquida de referencia (m)	13.9	15.2
Nivel de agua normal en el embalse (msnm)	70.0	90.0
Nivel de agua normal aguas abajo (msnm)	55.29	74.23
Superficie normal del embalse (km2)	271	258
Vida útil del embalse (años)	>100	>50
Caudal de diseño del vertedero, T=10000 años (m3/s)	84000	82600
Altura máxima de la presa (m)	60.0	35.5
Número y tipo de turbina	44, Bulbo	44, Bulbo
Potencia unitaria de cada turbina (MW)	73	75
Factor de capacidad de las plantas - cota constante	0.68	0.66
Cota variable		0.58
Costo de la energía generada (US\$/MWh)	44.3	43.2
Población directamente afectada	2046	953

Fuente: Furnas-Odebrecht, 2004

Los costos de la energía generada no incluyen los costos de transmisión. La vida útil de los embalses fue estimada bajo el supuesto de que los embalses tienen una capacidad de retención de sedimentos muy baja: 20% al inicio del proyecto en el caso de Jirau, que se va reduciendo a 1% al cabo de 15 años, para ser virtualmente 0% a partir de los 30 años. Esta estimación se basa en la gran longitud y modesto volumen de los embalses en relación al caudal líquido del río Madera.

Los proyectos de Jirau y Santo Antonio registran un considerable avance, que se ha visto facilitado por la falta de reacción del Gobierno boliviano. En diciembre de 2007 Santo Antonio fue adjudicado al consorcio Madeira Energia, formado las empresas Odebrecht, Andrade Gutierrez, Cemig y Furnas. En mayo de 2008 Jirau fue adjudicado al consorcio Energia Sustentable de Brasil, encabezado por la empresa francesa Suez. Los proyectos se adjudicaron al consorcio que ofreció el precio más bajo (en reales: 78.87 para Santo Antonio y

71.4 para Jirau) por la energía a generar. En la tabla 1.1 figura ese precio en dólares, según el tipo de cambio en la fecha de adjudicación.

La presión del Gobierno brasileño jugó un rol decisivo en todo el proceso de licenciamiento. En marzo de 2007 el Informe Técnico IBAMA (Instituto Brasileño de Medio Ambiente, responsable de otorgar las licencias ambientales) N° 014/2007 concluyó que: “el análisis de los impactos ambientales identificados demostró la fragilidad de los mecanismos y propuestas de mitigación. El equipo técnico concluyó que no es posible verificar la viabilidad ambiental de los aprovechamientos hidroeléctricos Santo Antônio e Jirau, siendo imperiosa la realización de un nuevo Estudio de Impacto Ambiental, más amplio, tanto en territorio nacional como en territorios transfronterizos, incluyendo la realización de nuevas audiencias públicas. Por tanto, se recomienda la no emisión de la Licencia Previa”. Meses después (julio 2007), el IBAMA otorgó la licencia ambiental previa, después de la renuncia de su Director y de que fuese cambiado el equipo técnico que emitió el Informe 014/2007. Con esa licencia se realizaron las licitaciones. A la fecha (junio 2008) se tramita la Licencia de Instalación que permitiría iniciar las obras de Santo Antonio.

En abril de 2004, la empresa Constructora Noberto Odebrecht solicitó a la Superintendencia de Electricidad de Bolivia dos licencias provisionales para realizar estudios de factibilidad para la implementación de centrales hidroeléctricas en los ríos Mamoré/Maderá, tramo Guayaramerín-Abuná y en el río Beni. La solicitud fue rechazada por la Superintendencia en base a las observaciones realizadas por varias instituciones, con la recomendación de que se tramite en el marco de un acuerdo binacional. Paralelamente, el consorcio Furnas-Odebrecht solicitó a la ANEEL autorización para realizar estudios de factibilidad de la central hidroeléctrica de Guajara-Mirim (revista Brasil Energia, enero 2005), ubicada en el tramo fronterizo del río Madera entre Abuná y Guayaramerín (ver figura 1.1). Según el director de contratos de Odebrecht, Jose Bonifacio Pinto Junior, la potencia instalada de esta hidroeléctrica deberá estar alrededor de 3000 MW y la inversión sería compartida entre Brasil y Bolivia.

Hay razones para suponer que la construcción de la presa binacional en el tramo Guayaramerín-Abuná es excluyente con la represa de Cachuela Esperanza. Los datos que maneja el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI) muestran que el nivel del cero de la regla limnimétrica de Guayaramerín es de 112.51 msnm, más de 11 m por encima del cero de la regla de Cachuela Esperanza. El nivel normal del agua en el futuro embalse debería alcanzar el de Guayaramerín para eliminar el obstáculo a la navegación que representa la cachuela próxima a esta población. Si ese es el caso y solo se construye una presa en ese tramo, Cachuela Esperanza sería sumergida por el nuevo embalse. Considerando que el nivel normal del embalse de Jirau será de 90.0, lo más probable es que entre Guayaramerín y Abuná se proyecte una presa única. El nuevo embalse inundaría territorio boliviano a lo largo de los ríos Madera, Mamoré y Beni.

La navegación es otro componente importante del proyecto. Mediante la construcción de esclusas a un costo razonable se posibilitaría la navegación de más de 4000 km de vías fluviales aguas arriba de las presas, integrando grandes regiones de Brasil, Bolivia y Perú. La apertura a la navegación de los ríos Madera e Iténez es la única manera de hacer realidad el eje

Norte-Sur (Orinoco-Amazonas-Plata) de la IIRSA. Sin embargo, las esclusas fueron excluidas del proyecto presentado al IBAMA, para facilitar la obtención de la licencia ambiental.

En el Brasil, los beneficios de la nueva vía navegable alcanzarían directamente a los estados de Rondonia y Mato Grosso, al norte de Cuiabá hasta la carretera BR-163 a la altura de Lucas de Rio Verde, cubriendo una región de cerca de 350,000 km², con potencial de producir 28 millones de toneladas/año de granos en 7 millones de hectáreas (PCE, Furnas, Odebrecht, 2002). Esta región produce actualmente cerca de 3 millones de toneladas/año. Considerando los insumos necesarios de fertilizantes y combustibles a ser transportados por esta hidrovía, se estima que la carga total potencial a ser transportada por la hidrovía Madera-Iténez será de 35 millones de toneladas/año. Se propone además ampliar las facilidades del puerto de Itacoatiara, en la confluencia de los ríos Madera y Amazonas, para facilitar el transporte de carga de Brasil, Perú, Bolivia, Colombia y Ecuador. La nueva instalación se denominaría Puerto Bolívar.

El análisis del componente de navegación ha estado centrado en el transporte aguas abajo en dirección al Amazonas y al Atlántico. Según la concepción de la iniciativa de Integración de la Infraestructura Regional de Sudamérica (IIRSA), la dirección podría ser la opuesta: el transporte multimodal de carga brasileña hacia los puertos del Pacífico. Por ejemplo, la nueva vía fluvial se conectaría en Puerto Maldonado (Perú), sobre el río Madre de Dios, a la carretera que forma parte del eje Perú-Brasil y en Puerto Villaroel (Bolivia), sobre el río Mamoré, al eje interoceánico. Debe destacarse que para hacer realidad la navegación del Madera debe construirse la represa de Ribeirao en el tramo Abuná-Guayaramerín, además de las presas de Jirau y Santo Antonio, es decir un mínimo de tres represas.

Capítulo 2

HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

2.1 RÉGIMEN HIDROLÓGICO

El río Madera es el principal afluente del río Amazonas tanto por caudal como por longitud. Se forma por la unión de los ríos Beni y Mamoré en las proximidades de la población de Villa Bella. Se acostumbra denominar Alto Madera al curso (y cuenca) del río aguas arriba de esa población y Bajo Madera al curso aguas abajo de Porto Velho. Entre los dos se encuentra el tramo de cachuelas (cascadas de baja altura) y rápidos donde se proyecta construir las represas (ver figura 2.1).



La tabla 2.1 muestra las estimaciones más recientes de Furnas-Odebrecht (2007) de los caudales medios mensuales del río Madera en las estaciones hidrométricas de Porto Velho y Abuná y del Mamoré en Guayaramerín, para diferentes periodos. Como la estación de Porto Velho comenzó a funcionar en 1967, los caudales medios del periodo 1931-1967 fueron estimados según la metodología descrita en la nota ANA 91/2007 (2007), que modificó significativamente los caudales estimados previamente para ese periodo (Furnas-Odebrecht, 2004).

La estación de Abuná (Abuna-Vila) está situada 8 km aguas arriba de la confluencia con el río Abuná y drena una cuenca de 932,000 km². En Porto Velho, el río Madera drena una cuenca de una superficie estimada en 988,000 km². La superficie de la cuenca del Mamoré en Guayaramerín ha sido estimada en 589,000 km².

El caudal máximo medio mensual se produce en marzo y el mínimo en septiembre (figura 2.2). El caudal medio del mes más húmedo (marzo) fue de 35700 m³/s durante el periodo 1967-01. Este comportamiento es resultado de la combinación de los regímenes hidrológicos de sus dos principales formadores: los ríos Mamoré y Beni, cuyos máximos se producen en marzo-abril y febrero, respectivamente.

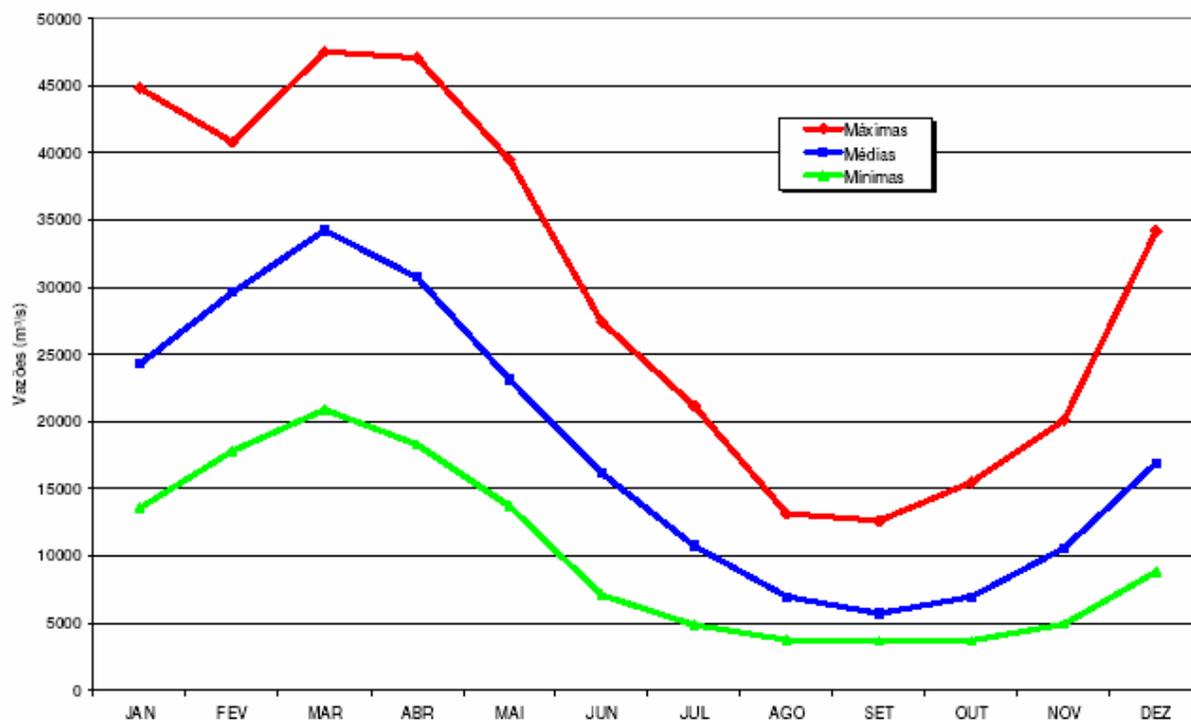
Tabla 2.1: Caudales medios mensuales de los ríos Mamoré y Madera

Río/estac	Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Madera en Porto Velho	1967-01	23968	30761	35659	34502	26665	18659	11939	7161	5712	6855	10459	16651	19083
	1931-05*	23734	30535	35135	34017	26155	18308	11751	7266	5481	6566	10302	16420	18806
	1977-97	25209	31728	36449	36314	29370	20830	13419	7894	5958	7100	11202	17325	20233
Madera en Abuná	1977-97	24064	29749	33091	31942	26278	18906	11859	6655	4948	6243	10183	16140	18338
Mamoré en Guayar.	1971-01	8294	11104	15737	15251	13199	9959	4987	2757	1817	2022	2780	6186	7841
	1977-97	9293	12162	18820	15987	13733	11496	5656	3154	1880	2162	3000	6376	8643

Fuente: Furnas, Odebrecht, 2007

*Observado y estimado

Figura 2.2: Caudales medios mensuales en Porto Velho, 1931-97



Fuente: Estudio de Viabilidad (Furnas-Odebrecht, 2004)

Para poder estimar el caudal al inicio (Villa Bella) y final (Porto Velho) del tramo de estudio y así estimar el aporte de la intercuenca, la tabla 2.1 muestra los caudales en cada una de las tres estaciones para el periodo común de 1977-97. Durante este periodo, relativamente húmedo, el aporte medio de la intercuenca entre Abuná y Porto Velho sería 1895 m³/s (20233-18338). Como entre Abuná y Villa Bella, la intercuenca tiene una superficie de solamente 4100 km², se puede asumir que los caudales en Villa Bella corresponden a los de Abuná.

Sin embargo, un análisis más reciente (Vauchel, 2008) de los registros de la estación brasileña de Porto Velho y de las estaciones bolivianas de Cachuela Esperanza sobre el río Beni y Guayaramerín sobre el Mamoré identifica algunos problemas en el análisis de Furnas-Odebrecht (2007), en particular en la metodología y relaciones utilizadas para el relleno de los caudales del periodo 1908-1967 en Porto Velho y en el cálculo de los caudales de los periodos 1967-70 y 1971-74 en esa estación.

Como resultado de ese análisis, se decidió utilizar para las simulaciones solamente la serie de caudales mensuales del periodo 1967-07, que se muestra en la tabla 2.2. La serie de la tabla 2.2 no se diferencia mucho de la serie obtenida por Furnas-Odebrecht (2007), excepto en los periodos 1967 a 1970 y 16/06/1971 a 21/02/1974, en que se modificaron en forma significativa las curvas de descarga.

Tabla 2.2: Caudales mensuales (m³/s) en Porto Velho, 1967-2007

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
1967				23570	16320	11790	6838	5269	3964	4186	7705	9795	
1968	13240	23080	30730	24480	13380	7089	4962	3880	5058	5028	7344	11590	12450
1969	21550	24200	24200	23360	15010	11880	7756	4643	3845	4001	6617	13280	13290
1970	16120	21370	26670	26650	22550	16660	9694	5629	4989	4975	6257	9509	14200
1971	19520	29370	32540	27090	18130	10580	7821	4883	4449	6589	9061	14450	15290
1972	19100	25860	32420	32340	21910	15960	8862	7654	9760	10300	9576	18960	17690
1973	23160	31310	35830	34510	26200	19880	12870	8841	6802	6919	12510	19660	19800
1974	27660	33280	40590	34960	28500	19370	11930	7640	5539	6110	10970	13860	19950
1975	21840	30870	35990	33600	24600	16710	12760	6773	4915	7551	8380	17640	18400
1976	26690	34860	37860	34680	26650	17790	9368	5296	4532	4827	8081	12490	18530
1977	24830	28890	38820	35070	28530	18980	11970	7475	5829	7427	12720	19210	19930
1978	26810	32600	38930	33360	24990	17610	12480	5941	3779	4595	8082	20320	19050
1979	29790	35150	37120	40130	33170	21380	11580	6390	5172	5278	6801	10920	20140
1980	20190	26190	33890	34680	27900	22600	13390	8080	7175	8137	8990	12210	18580
1981	18010	28500	35280	35240	28960	23620	11920	6122	4640	7013	12570	20120	19260
1982	32250	36390	41780	45600	37820	27370	19340	10720	6759	12070	18170	22580	25830
1983	25490	30680	34510	30900	30220	24310	20870	12910	6045	5656	8478	13020	20200
1984	26300	35460	41730	47370	39210	26650	16240	8022	5405	5664	15030	21000	23950
1985	29100	33810	34550	35140	33190	23610	14240	9916	6854	8120	11980	16120	21310
1986	25420	34990	41530	43850	34140	26570	17150	10590	8590	9640	8298	17280	23090
1987	26320	31360	28300	24020	22290	13740	7852	5337	3806	4725	10150	22400	16610
1988	27010	32240	34700	39620	31180	21920	12620	5725	3422	3800	5249	9396	18850
1989	21590	28790	32040	31190	24240	15170	10070	5617	5327	4670	5927	9752	16110
1990	21100	28170	29010	24790	22490	18660	12270	6116	4902	6554	14690	19460	17280
1991	27320	33930	35780	33940	26030	19930	11730	6986	4149	5032	8491	14790	18910

1992	25270	26840	37570	36160	32190	24530	20090	9783	12000	15000	14960	22780	23090
1993	30640	38750	42400	43230	32660	20110	10660	7045	6451	6305	11970	19120	22330
1994	25190	32440	33520	33690	25770	14780	8317	5458	3269	4982	13050	15740	17920
1995	26030	29060	36030	34550	24610	14860	8816	7032	3730	3745	5439	13680	17230
1996	19000	28620	29830	31460	20730	14090	8584	4665	4701	5769	11570	15520	16150
1997	24820	32420	43030	44870	33690	23320	14060	8020	4990	6734	9762	17050	21820
1998	21550	24280	33220	33920	21570	12130	7250	4680	4380	6070	13840	21020	16940
1999	26700	33710	34050	32990	22610	14350	10240	5297	3695	4251	5867	13540	17170
2000	19230	25850	30960	27670	18940	13770	8783	5598	6300	4547	9685	15690	15540
2001	23990	32670	40490	35200	25720	17950	10510	6556	4456	5502	11360	16820	19180
2002	23020	27860	35400	29980	22950	16800	9125	5697	4698	5839	8609	15070	17020
2003	21830	29260	32550	32760	21900	15210	8178	5061	3902	5968	7434	13350	16360
2004	26930	29750	27050	26590	20600	13200	8806	6249	4218	4623	8810	15080	15950
2005	21470	24500	29240	25740	15980	12430	6869	3517	2556	4027	8649	15240	14120
2006	25510	35900	37590	37070	23040	13950	8580	4936	3454	5614	11880	17650	18650
2007	24630	28560	36620	38860	31560	20060	10320	6494	3642	4812	11890	20140	19730
2008	27310	36380	39130	42480									
Media	23989	30444	34963	33747	25662	17838	11116	6647	5174	6162	9924	16032	18448

Fuente: Vauchel, 2008

El análisis de Vauchel parece mostrar que el caudal en la estación brasileña de Abuná fue ligeramente subestimado. Para el periodo común 1983-94 y 2002-07, la diferencia promedio de la suma de los caudales registrados en las dos estaciones bolivianas y Porto Velho es de 1431 m³/s. Si se usan los registros de la estación brasileña de Guayaramerin, la diferencia es aún menor. Además hay que tomar en cuenta que entre Guayaramerín y Villa Bella, el río Mamoré recibe un afluente de cierta importancia: el río Yata, y que el caudal promedio de 1983-94 y 2002-07 en Porto Velho (19147 m³/s) estuvo ligeramente por encima de la media.

En base a los datos anteriores, se puede estimar que la intercuenca entre Villa Bella y Porto Velho aporta un caudal medio del orden de 900 a 1200 m³/s. De ese aporte, aproximadamente 500-600 m³/s provienen del río Abuná, el principal afluente de ese tramo, que drena una subcuenca de 31300 km². La imprecisión de los resultados simplemente evidencia las dificultades de estimar el aporte de intercuenca relativamente pequeñas con los registros de estaciones que controlan cuencas mucho más grandes.

La tabla 2.3 muestra la estadística de los caudales máximos anuales en Porto Velho. La crecida máxima media anual en Porto Velho está en el orden de 39000 m³/s y la máxima registrada fue de 48565 m³/s (abril 1984). Se muestran también valores para periodos de retorno TR de 25 y 100 años.

Tabla 2.3: Estadística de caudales máximos anuales en Porto Velho

Variable	Valor
Nº Eventos	35
Caudal máximo anual registrado (m ³ /s)	48565
Caudal máximo anual más bajo (m ³ /s)	28183

Variable	Valor
Caudal máximo medio anual (m ³ /s)	38719
Caudal máximo diario (m ³ /s) TR=25 años	48370
TR=100 años	53530
Desviación Standard (m ³ /s)	4722

Fuente: Estudio de Viabilidad, (Furnas-Odebrecht, 2004)

2.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICA E HIDRÁULICA DEL TRAMO DE ESTUDIO

Las cachuelas (figuras 2.3 y 2.4) son la manifestación de un control geológico impuesto por las rocas duras del Escudo precámbrico. Como consecuencia, el tramo de cachuelas entre Guayaramerín y Porto Velho es hidráulica y morfológicamente diferente de los tramos situados aguas arriba y abajo. Entre Guayaramerín y Porto Velho, el río Madera fluye “encajonado”, es decir en un cauce estable y bien definido, con niveles de base controlados estructuralmente y con muy poca libertad de moverse lateralmente. No se observan meandros ni las típicas lagunas “cuerno de buey” de los meandros cortados. Tampoco se observan las várzeas o lagunas de inundación, tan frecuentes en el Amazonas, y la superficie de la llanura de inundación del Madera es relativamente pequeña.

El río presenta un canal único (excepto donde algunas islas provocan bifurcaciones) y estable, con barrancas laterales de fuerte pendiente (ver figuras 2.5, 2.6, 3.4, 3.5 y 3.6). El canal principal tiene capacidad suficiente para contener la crecida media anual (alrededor de 40000 m³/s). Las barrancas no presentan vegetación (o es estacional y muy baja) hasta ese nivel. Por encima empiezan a aparecer arbustos y luego árboles. En condiciones naturales, el bosque amazónico cubre todo el sector por encima de la barranca y las áreas inundables.

En todas las cachuelas la roca es aflorante. En el resto del tramo existen tanto sectores rocosos como depósitos aluviales (figura 2.6). Los sedimentos del fondo del cauce son predominantemente arena fina ($d_{50}=0.2$ mm), con presencia de arenas gruesas, gravas y un pequeño porcentaje de limo. El desnivel del tramo (60 m en 360 km) es mucho mayor que el del río Mamoré entre Guayaramerín y Puerto Villaroel (80 m en 1317 km). El Mamoré es un río típico de llanura, con amplios meandros, lagunas cuerno de buey y fuerte migración lateral del cauce. Forma una enorme llanura estacional de inundación (100000 km²), de alta productividad pesquera.

El tramo de cachuelas se inicia inmediatamente aguas abajo de las ciudades gemelas de Guayaramerín y Guajará Mirim, sobre el río Mamoré, y termina en la Cachuela de Santo Antonio, 6 km aguas arriba de Porto Velho. Este tramo presenta 18 cachuelas y rápidos que se extienden a lo largo de una longitud de 360 km. El desnivel estimado para este tramo por el estudio de inventario (PCE, Furnas, Odebrecht, 2002) es de 60 m. La figura 2.7 muestra las cachuelas identificadas en el tramo Guayaramerín-Porto Velho. El subtramo Abuná-Cachuela de Santo Antonio, donde se proyecta construir las dos represas, tiene 222 km de longitud. En este subtramo, el río Madera no recibe a ningún afluente importante.

Figura 2.3: Cachuela de Teotonio

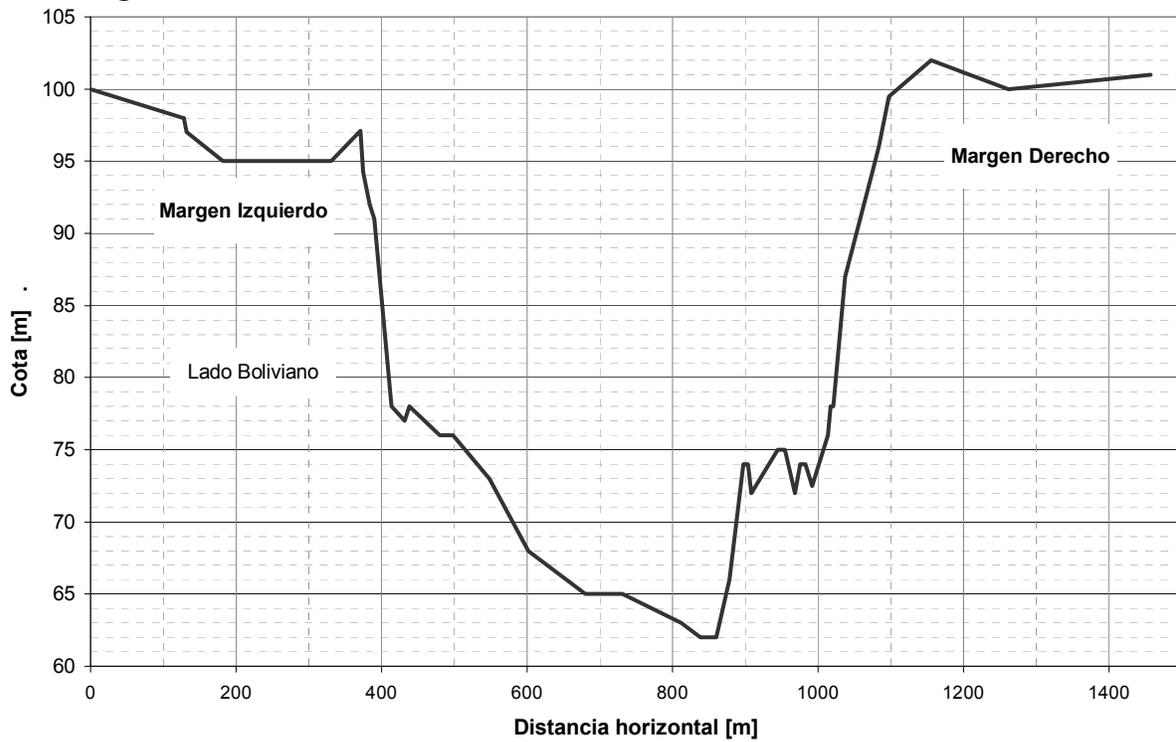


Fotos: J. Molina

Figura 2.4: Cachuela de Ribeirao



Figura 2.5: Sección transversal del río Madera en la estación de Abuná-Vila



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Furnas-Odebrecht (2005)

Figura 2.6: Orilla izquierda del río Madera cerca de la confluencia con el río Abuná

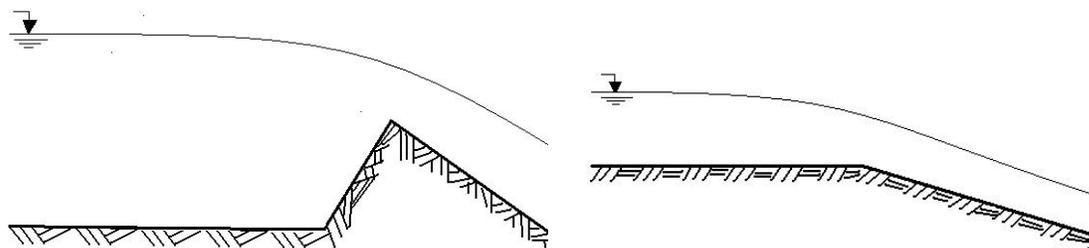


Foto: J. Molina

Las cuatro primeras cachuelas están situadas sobre el río Mamoré y no forman parte del presente estudio. De las catorce restantes, las dos más importantes son los saltos de Jirau y Teotonio, que prácticamente en toda época del año tienen una caída hidráulica de 4 metros o más (ver figura 2.3). Sigue un grupo de cachuelas de tamaño intermedio, como Ribeirao o Pederneira y al final se encuentran un grupo de cachuelas pequeñas que son apenas perceptibles en la estación seca, como Misericordia, Periquitos, Morrinhos o Macacos.

El análisis que se describe en el punto 3.3 muestra que existen al menos dos tipos de comportamiento hidráulico: cachuelas tipo vertedero y cachuelas que se comportan como canal con flujo acelerado por cambio de pendiente. La figura 2.8 ilustra esos dos tipos. En las cachuelas tipo vertedero, las secciones aguas arriba de la cachuela son considerablemente más profundas que la sección de control situada sobre la misma cachuela. Por esta razón a cierta distancia aguas arriba, el perfil hidráulico (superficie del agua) es casi horizontal para un rango amplio de caudales y las velocidades son más bajas. Este es el caso de la cachuela Ribeirao, situada en el tramo binacional y probablemente sea el caso de Teotonio.

Figura 2.8: Vertedero y canal con cambio de pendiente



El segundo tipo se presenta cuando las secciones aguas arriba tienen una profundidad similar o un poco mayor a la sección de la cachuela. En este caso, el perfil hidráulico aguas arriba tiene una pendiente y las velocidades son más próximas a las que se producen sobre la cachuela.

Las cachuelas no son uniformes en toda su longitud ni tampoco sobre todo el ancho del cauce del río. Puede observarse (ver figuras 2.3 y 2.4) la presencia de saltos o cascadas sobre una parte de la sección, mientras que el resto puede comportarse como una rápida, con flujo muy turbulento y a alta velocidad, pero sin un salto claramente perceptible.

Capítulo 3

REMANSO HIDRÁULICO

El estudio de remanso tiene por objeto evaluar la influencia de los embalses sobre los niveles de agua en el río, así como sobre las velocidades de flujo, con énfasis en el tramo binacional. El estudio se realizó para diferentes caudales en el río y condiciones de operación de los embalses, usando el modelo HEC-RAS, v.4.0. El principal uso del modelo fue simular condiciones hipotéticas que podrían presentarse en el futuro.

3.1 INFORMACIÓN

3.1.1 Secciones transversales

Las tablas A.1.1 y A.1.2 del Anexo 1 listan las secciones transversales que fueron incluidas en la modelación. La primera columna muestra el número de la sección, tal como aparece en el plano de secciones georeferenciado. Se adoptó la misma numeración de los estudios brasileños de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), donde el número representa aproximadamente la progresiva, contada a partir de la sección de San Carlos, situada río abajo de Porto Velho. Las secciones obtenidas por Furnas-Odebrecht (2004) tienen números enteros. Incluyen 9 secciones topobatimétricas en el tramo entre Santo Antonio y Jirau y 18 entre Jirau e Abuná. Adicionalmente se obtuvieron secciones obtenidas directamente de la restitución aerofotogramétrica, 10 en el tramo entre Santo Antonio y Jirau y 3 entre Jirau y Abuná.

Para distinguirlas, las secciones bolivianas, obtenidas por SENAMHI-ENDE en noviembre 2007, tienen números decimales (por ejemplo 338.1). Las tablas incluyen también las distancias parciales y acumuladas a partir de la primera sección de cada tramo, así como su ubicación respecto a cachuelas, islas o estaciones hidrométricas.

Para mejorar la simulación, se incluyeron algunas secciones que son copias de secciones situadas arriba o abajo, como la 211 y la 405.5. Por la misma razón, se descartaron algunas secciones de topografía incompleta o dudosa. Este es el caso de varias secciones brasileñas del tramo binacional, que comprendían solamente el denominado “canal de navegación”, situado al centro del cauce del río (Furnas-Odebrecht: EIA, 2005).

Las secciones topobatimétricas obtenidas por SENAMHI-ENDE en noviembre 2007 no estaban referenciadas al sistema altimétrico boliviano. Todas las secciones comprendidas entre la 329.2 (confluencia río Abuná) y 397.6 (al pie de la cachuela de Ribeirao) fueron referenciadas al sistema altimétrico brasileño, mediante una nivelación que se realizó con la regla de la estación hidrométrica de Abuná-Vila (sección 338). Se hizo una referenciación altimétrica aproximada de las secciones bolivianas comprendidas entre la 406.6 y la 418.1, mediante comparación con las secciones brasileñas próximas. Las secciones arriba de la 418.1 no pudieron ser referenciadas, por lo que finalmente no se usaron en el presente estudio. Esos datos podrán ser incorporados al análisis cuando se realice la nivelación respectiva. Por estas razones, el estudio se extiende solamente hasta la sección 418.1, situada al pie de la cachuela Madera y 7 km río abajo de la confluencia con el río Beni.

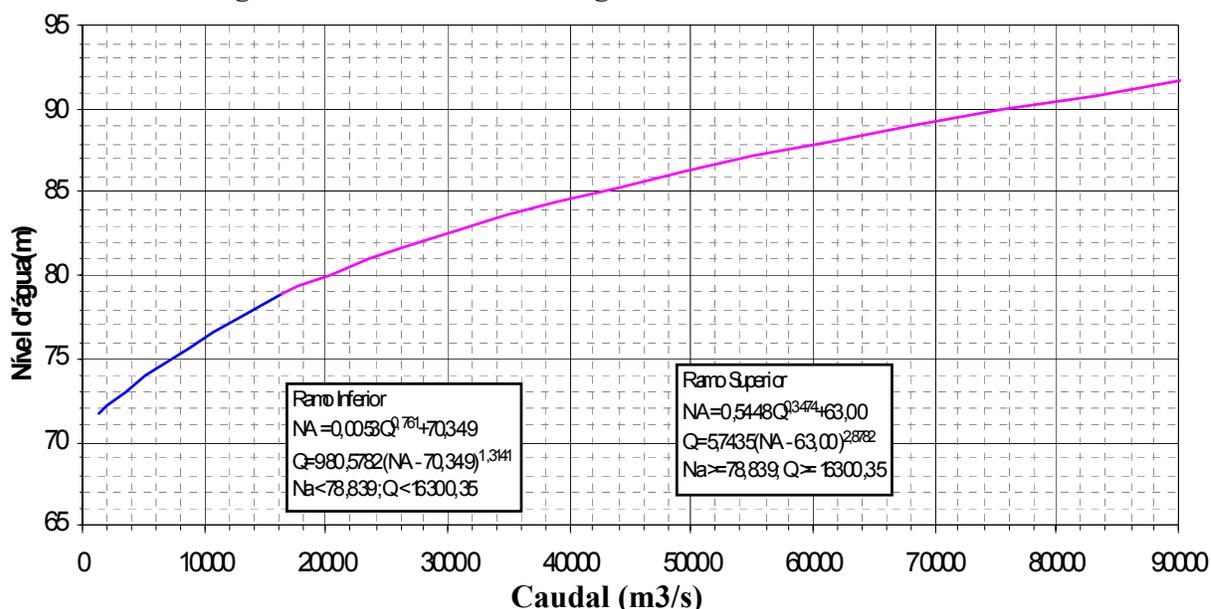
En el Anexo 1 se muestran también en forma gráfica varias secciones representativas o de interés del tramo Jirau-Cachuela Madera, en forma de coordenadas X, Z. Los valores siguen el formato HEC-RAS, en que el valor X se calcula a partir de la margen izquierda de la sección.

3.1.2 Curvas de descarga en secciones de control

Para definir las condiciones de borde del modelo, se usaron las curvas nivel de agua-caudal descritas en los estudios de factibilidad y EIA (Furnas-Odebrecht, 2004), para los siguientes puntos: aguas arriba de Santo Antonio, abajo y arriba de Jirau y en la estación hidrométrica de Abuná-Vila.

La figura 3.1 muestra la curva nivel de agua-caudal en condiciones naturales en la sección 210 (cachuela de Jirau, aguas arriba), que sirvió como sección de control en flujo subcrítico para el tramo Jirau-Abuná-Cachuela Madera.

Figura 3.1: Curva Nivel de agua – Caudal en la sección 210



Fuente: Estudio de viabilidad (Furnas-Odebrecht, 2004)

3.1.3 Perfiles hidráulicos

Para calibrar el modelo se usaron cinco perfiles hidráulicos de la línea de agua a lo largo del río Madera, obtenidos por Furnas-Odebrecht el 22 de mayo de 2002, 16 y 18 de octubre de 2002, 31 de enero y 28 de febrero de 2003. Estos perfiles están descritos en detalle más adelante.

Para la simulación con represas, se usaron las curvas de operación de los niveles de agua de los embalses, definidas en los estudios de factibilidad.

3.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Durante el proceso de calibración se comparan los valores calculados por el modelo con valores medidos o registrados, con el objeto de ajustar uno o más parámetros. En el caso del módulo de flujo permanente de HEC-RAS, el parámetro que se calibra es el coeficiente de rugosidad n de Manning, que a su vez determina las pérdidas de carga por fricción. Una adecuada determinación de los coeficientes de rugosidad en cada tramo de río es uno de los factores más importantes para obtener un modelo que represente el comportamiento hidráulico del río.

Los coeficientes de pérdida por contracción y expansión, que se introducen como datos para cada sección, se estimaron en base a los valores del estudio de factibilidad, a las recomendaciones del manual de HEC-RAS y a la variación geométrica entre secciones consecutivas.

Como el coeficiente n varía con el caudal y la profundidad de flujo, es conveniente disponer de mediciones instantáneas de perfil hidráulico para un rango amplio de caudales. Los cinco perfiles disponibles cubren un rango de 4197 a 31026 m³/s. Por encima y debajo de esos valores se realizó una extrapolación. Como puede observarse en las tablas 3.1 y 3.2, el nivel del agua se registró en algunas secciones donde se instaló reglas limnimétricas. Solamente los perfiles del 31 de enero y 28 de febrero de 2003 pudieron usarse para el tramo Santo Antonio-Jirau. Estos dos perfiles incluyen mediciones de nivel de agua hasta la estación hidrométrica de Abuná (sección 338). Para los otros tres se midieron niveles de agua hasta aguas arriba de la cachuela de Araras (sección 375).

La tabla 3.1 muestra la comparación de perfiles para el tramo Santo Antonio-Jirau y la tabla 3.2 para el tramo Jirau-Abuná-Araras. Se calculó el transporte (conveyance) y las pérdidas por fricción entre secciones aplicando las opciones por defecto de HEC-RAS. Las corridas se realizaron asumiendo flujo subcrítico con control en la última sección aguas abajo. Los resultados evidencian que ese supuesto es correcto, aunque en algunas de las cachuelas más importantes (Teotonio, Jirau y Ribeirao) se produce flujo crítico para caudales pequeños. En la cachuela de Jirau (sección 210) las diferencias entre niveles observados y simulados son nulas debido a que la curva de descarga H-Q en esa sección fue impuesta en el modelo, que es una opción que permite HEC-RAS. Al aplicar esta opción, la sección 210 se convierte en sección de control.

Tabla 3.1: Calibración del modelo: comparación entre niveles de agua (NA) observados y simulados, tramo Santo Antonio -Jirau

Sección	28/02/2003 - Q = 29869 m ³ /s			31/01/2003 - Q = 31026 m ³ /s		
	NA Observado [m]	NA Simulado [m]	Diferencia [m]	NA Observado [m]	NA Simulado [m]	Diferencia [m]
207	75.53	74.45	1.08	75.76	74.96	0.80
200		73.95			74.44	
195		73.77			74.26	
190		73.58			74.07	
184		73.28			73.76	

172		72.51			72.96	
166		72.18			72.62	
158		71.75			72.17	
151		71.36			71.79	
145		70.79			71.22	
139		70.14			70.59	
128		69.24			69.7	
120		68.11			68.55	
110		65.51			65.88	
105	64.55	64.51	0.04	64.27	64.88	-0.61
98		59.47			59.99	
96	60.31	59.33	0.98	59.86	59.87	-0.01
88	58.46	58.24	0.22	58.79	58.79	0.00
81	56.85	57.20	-0.35	57.19	57.72	-0.53

Fuente: Elaboración propia. Los niveles de agua observados se obtuvieron del Estudio de Viabilidad (Furnas-Odebrecht, 2004)

El subtramo alrededor de las secciones 329 y 329.2 (confluencia con el río Abuná) presentó algunas dificultades especiales debido a las pérdidas originadas por esa confluencia y además, por el ingreso del caudal del río Abuná. Las corridas del modelo se realizaron con un caudal constante para todo el tramo del río Madera, lo que originó algunas inconsistencias, debido a que los perfiles hidráulicos observados (Furnas-Odebrecht, 2004) muestran que existía cierta variación de caudal a lo largo del tramo Jirau-Abuná. El afluente más importante de ese tramo es el río Abuná, cuyos niveles no se midieron simultáneamente, por lo que cabe esperar algún error en la calibración del perfil hidráulico inmediatamente arriba de la confluencia. Como consecuencia, tuvo que aumentarse el coeficiente de rugosidad de Manning en ese subtramo y adoptar el valor más alto (1.0) que permite el modelo HEC-RAS para los coeficientes de pérdidas por contracción/expansión.

Como resultado de la calibración se obtuvo tablas caudal Q – coeficiente de rugosidad n para cada sección. Estas tablas fueron convertidas a tablas nivel de agua – rugosidad. Esto era necesario para la simulación de la situación con represa, en que los niveles varían con respecto a la condición natural del río. Es importante destacar que la calibración solamente permitió obtener el coeficiente de rugosidad n_c para el cauce principal del río, debido a que los perfiles hidráulicos medidos corresponden a caudales inferiores a 40000 m³/s.

La tabla A.2.1 del Anexo 2 muestra los coeficientes de rugosidad obtenidos para el tramo Santo Antonio – Jirau en función de la cota (nivel) H. La tabla A.2.2 de ese Anexo muestra los coeficientes de rugosidad n para cada sección del tramo Jirau-Abuná-Cachuela Madera, en función del caudal (para condiciones naturales) y del nivel/cota. Se realizó una extrapolación del valor de n hasta un caudal de 50000 m³/s para todas las secciones hasta la sección 341.1. No fue posible hacer eso para las secciones más arriba, debido a que los datos topobatimétricos solo llegan hasta el nivel correspondiente al caudal de 40000 m³/s.

**Tabla 3.2: Calibración del modelo: comparación entre niveles de agua (NA) observados y simulados
Tramo Jirau-Abuná-Araras**

Sección	16/10/2002 - Q=4197 m³/s			18/10/2002 - Q=5520 m³/s			22/05/2002 - Q=18605 m³/s			28/02/2003 - Q=29869 m³/s			31/01/2003 - Q=31026 m³/s		
	NA Observ. [m]	NA Simulado [m]	Difer. [m]	NA Observ. [m]	NA Simulado [m]	Difer. [m]	NA Observ. [m]	NA Simulado [m]	Difer. [m]	NA Observ. [m]	NA Simulado [m]	Difer. [m]	NA Observ. [m]	NA Simulado [m]	Difer. [m]
375	84.50	84.64	-0.14	85.00	85.16	-0.16	91.11	91.48	0.37		95.15			95.69	
374.1		84.36			84.86			91.37			95.08			95.62	
372		83.45			84.02			91.15			94.88			95.43	
370.1		83.12			83.69			91.01			94.74			95.30	
369	82.91	82.96	-0.05	83.49	83.55	-0.06	90.74	90.97	0.23		94.71			95.28	
364.1		82.57			83.19			90.65			94.39			94.97	
360.1		82.20			82.86			90.43			94.20			94.79	
357.1		82.15			82.81			90.30			94.04			94.64	
355.1		82.12			82.77			90.20			93.88			94.48	
353.1		82.05			82.70			90.09			93.76			94.37	
350.1		81.96			82.60			89.91			93.52			94.13	
347.1		81.87			82.51			89.80			93.40			94.02	
344.1		81.83			82.47			89.72			93.29			93.91	
341.1		81.79			82.43			89.60			93.12			93.76	
338.1		81.75			82.38			89.48			92.96			93.59	
338	81.79	81.74	0.05	82.30	82.37	-0.07	89.31	89.46	0.15	93.19	92.92	-0.27	93.54	93.56	-0.02
334.1		81.71			82.32			89.32			92.70			93.34	
330.1		81.65			82.24			89.14			92.44			93.09	
329.2		81.64			82.22			89.11			92.39			93.04	
329		81.64			82.22			89.10			92.38			93.02	
327	81.70	81.63	0.07	82.15	82.20	-0.05	89.05	89.01	-0.04	92.05	92.24	0.19	92.57	92.89	-0.32
320	81.41	81.48	-0.07	82.05	81.99	0.06	88.82	88.64	-0.18	91.94	91.81	-0.13	92.43	92.47	-0.04
315		81.46			81.95			88.51			91.64			92.31	
309	81.56	81.38	0.18	81.96	81.83	0.13	88.37	88.23	-0.14	91.45	91.30	-0.15	91.93	91.97	-0.04
306		80.37			80.85			87.72			90.79			91.47	
301		78.95			79.38			86.94			90.00			90.69	
292	78.28	78.02	0.26	78.66	78.47	0.19	86.31	86.13	-0.18	89.32	89.12	-0.20	89.83	89.78	0.05

286		77.70			78.16			85.65			88.60			89.21	
283		77.43			77.90			85.20			88.12			88.70	
279		77.02			77.52			84.71			87.67			88.22	
272		76.25			76.80			83.62			86.58			87.05	
267	75.55	75.47	0.08	76.01	76.01	0.00	82.63	82.65	0.02	85.57	85.60	0.03	86.03	86.06	-0.03
258		75.06			75.55			81.96			84.88			85.38	
256		74.94			75.40			81.84			84.79			85.30	
255		74.72			75.17			81.72			84.70			85.23	
253		74.49			74.91			81.53			84.52			85.05	
243	74.27	74.24	0.03	74.72	74.71	0.01	81.30	81.22	-0.08	84.21	84.25	0.04	84.75	84.79	-0.04
228		73.96			74.51			80.76			83.85			84.39	
211		73.50			74.20			79.99			83.18			83.72	
210	73.38	73.38	0.00	74.08	74.08	0.00	79.58	79.58	0.00	82.59	82.59	0.00	83.13	83.13	0.00
207	64.44	64.44	0.00	65.38	65.38	0.00	72.29	72.29	0.00	75.42	75.42	0.00	75.78	75.78	0.00

Fuente: Elaboración propia. Los niveles de agua observados se obtuvieron del Estudio de Viabilidad (Furnas-Odebrecht, 2004)

Los coeficientes n_i y n_d de los sectores izquierdo y derecho por encima de la barranca (overbank) fueron adoptados bajo el supuesto de que están cubiertos de vegetación. Estos coeficientes solo se aplican cuando el nivel del agua supera la barranca (overbank flow). Por ejemplo, en la estación hidrométrica de Abuná-Vila (sección 338, figura 2.5), esto ocurre aproximadamente para el nivel $H=96.0$ m en la orilla izquierda, para el cual los coeficientes n_i y n_d valen 0.080 según la tabla A.2.2. Todos los n_i y n_d por debajo de 95.0 no se usaron en las simulaciones. Incluso podrían no figurar en la tabla A.2.2 para la mayor parte de las secciones. Sin embargo, existen algunas secciones en que la planicie de inundación está a un nivel más bajo que la barranca, por lo que los coeficientes n_i y n_d se mantuvieron en la tabla A.2.2 como referencia, al igual que hicieron los consultores brasileños (Furnas-Odebrecht, 2004).

En la tabla A.2.2 se observa que el valor (0.070) de los coeficientes n_i y n_d es el mismo para todos los niveles H y para todas las secciones del tramo Santo Antonio – Jirau. Para este tramo se adoptaron los mismos valores de n_i y n_d que figuran en los estudios de factibilidad (Furnas-Odebrecht, 2004), debido tanto a la necesidad de comparar resultados, como a la falta de un criterio que permitiese definir otros valores diferentes a los usados en esos estudios.

3.3 REMANSO EN CONDICIONES NATURALES

3.3.1 Perfiles hidráulicos

La figura 3.2 muestra los perfiles hidráulicos (niveles de agua) y del talweg (punto más bajo del cauce del río) para el tramo Santo Antonio-Jirau y la figura 3.3 para el tramo Jirau-Cachuela Madera, en condiciones naturales y para tres caudales representativos: 5000, 18000 y 40000 m³/s. El primero corresponde aproximadamente al caudal medio del mes más seco (septiembre) en Abuná, el segundo al caudal medio interanual y el caudal de 40000 m³/s a la crecida máxima media anual.

En el tramo Santo Antonio – Jirau (progresivas 81-207) destaca la cachuela de Teotonio, ubicada entre las secciones 96 y 105. Esta cachuela presenta una caída hidráulica (de la superficie del agua) de casi 9 metros entre las secciones 96 y 105 para el caudal más bajo (5000 m³/s). La caída hidráulica se va reduciendo gradualmente a medida que aumenta el caudal. Para el caudal medio de 18000 m³/s la caída se reduce a 6.5 m y para el caudal de 40000 m³/s a un poco más de 4 metros. Además se observa que la pendiente hidráulica (de la superficie del agua) aumenta con el caudal. Las cachuelas de Morrinho y do Inferno son imperceptibles en los tres perfiles, por ser muy pequeñas o por insuficiencia de datos topográficos (secciones) y la cachuela de Santo Antonio por falta de datos topográficos.

La diferencia promedio de niveles de agua entre los caudales de 5000 y 40000 m³/s, que corresponden aproximadamente a los niveles mínimo y máximo medio anuales, es de 11.4 m en el tramo Santo Antonio – Jirau. En la sección 98 se produce la diferencia mínima (poco más de 8 metros) y en la sección 207 la diferencia máxima (13 metros).

Figura 3.2: Perfil hidráulico y del lecho del río Madera entre Santo Antonio (81) y Jirau aguas abajo (207)

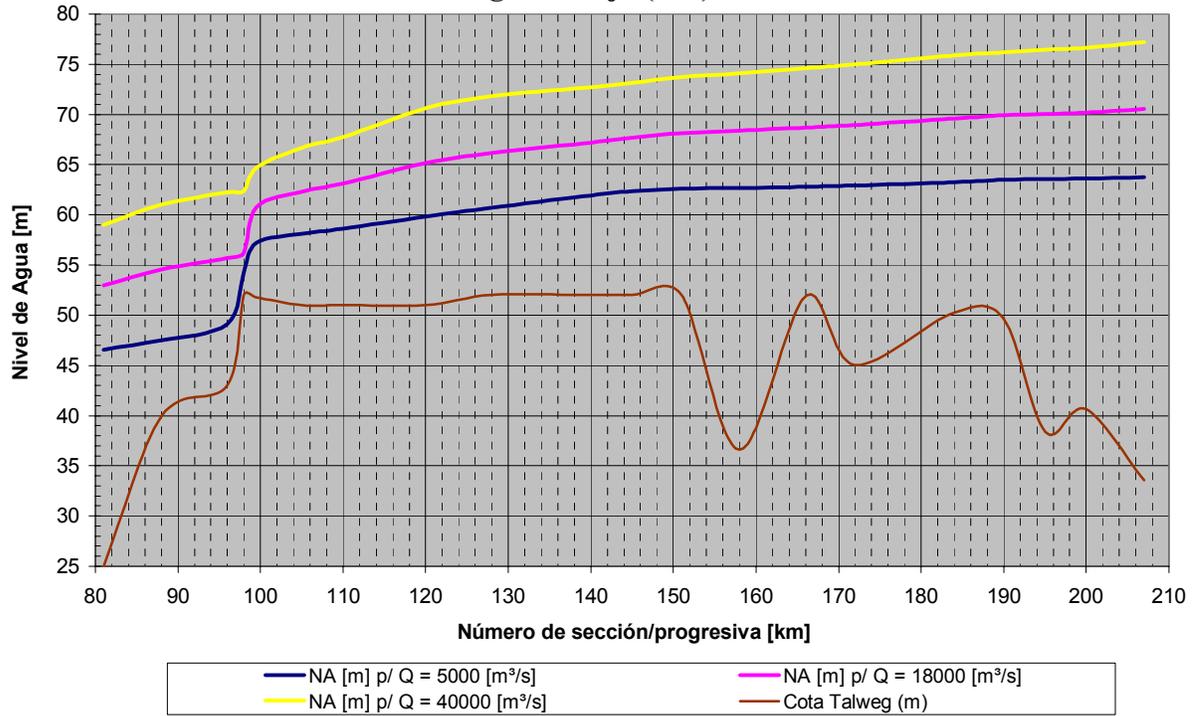
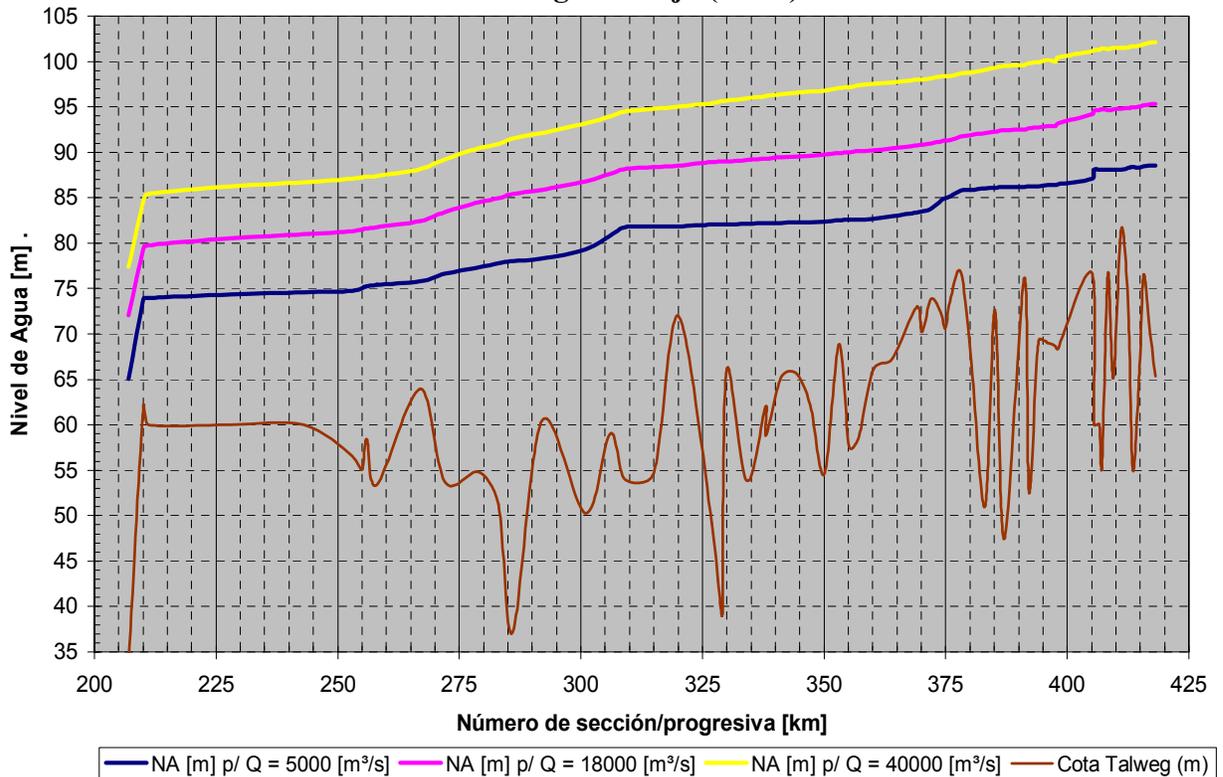


Figura 3.3: Perfil hidráulico entre secciones de Jirau aguas abajo (207) y cachuela Madera aguas abajo (418.1)



NA= Nivel de la superficie del agua (m)

Fuente: Elaboración propia

Para el tramo Jirau-Cachuela Madera, se observa que la caída de la superficie del agua en la cachuela de Jirau es de más de 7 metros (entre las secciones 210 y 207) para los tres caudales y por tanto, en cualquier estación del año. La caída hidráulica en las cachuelas de Tres Irmaos (256), Pederneira (309), Araras (375) y Ribeirao (405) se percibe claramente para el caudal de estiaje (5000 m³/s). Además se observa que el perfil hidráulico arriba de esas cachuelas es casi horizontal para ese caudal.

Para el caudal medio de 18000 m³/s, las cachuelas de Tres Irmaos y Araras son casi imperceptibles y la caída hidráulica se reduce considerablemente en Pederneira y Ribeirao. La pendiente hidráulica arriba de las cachuelas aumenta con respecto a la pendiente para el caudal de 5000 m³/s. Para el caudal de crecida de 40000 m³/s, todas las cachuelas (excepto Jirau) son casi imperceptibles en el perfil hidráulico. La pendiente del perfil de la superficie del agua aumenta con el caudal para casi todo el tramo Jirau-Cachuela Madera.

La diferencia promedio de niveles de agua entre los caudales de 5000 y 40000 m³/s, que corresponden aproximadamente a los niveles mínimo y máximo medio anuales, es de 13.4 m en el tramo Jirau-Cachuela Madera. Por tanto la variación estacional de esos niveles es mayor que en el tramo Santo Antonio-Jirau. Los niveles del agua varían más fuertemente en el tramo binacional (la variación se acerca a los 15 metros entre Abuná y Araras), mientras que inmediatamente aguas arriba de la cachuela de Jirau, la variación de niveles es de aproximadamente 11 metros. La simulación mostró que el perfil hidráulico en los sectores próximos a las cachuelas es sensible a la ubicación y número de las secciones topográficas. Por eso es recomendable obtener más secciones topobatiométricas en esos sectores.

Las figuras 3.4 a 3.6 ilustran la fuerte variación estacional de los niveles de agua esa variación. Son fotografías que muestran la Capitanía boliviana de Puerto Manoa (sección 338.1), situada frente a la estación hidrométrica brasileña de Abuná-Vila. La primera fotografía se tomó el 31/8/07, cuando el caudal estimado del río Madera era de 4150 m³/s. La segunda fue tomada el 15/11/07 con un caudal estimado de 15600 m³/s y la tercera el 17/3/08 cuando el caudal era de aproximadamente 36900 m³/s. Entre la primera y última fotografías la variación del nivel del agua es de 13.4 m.

La tabla 3.3 muestra los perfiles hidráulicos para diversos caudales en el tramo Jirau-Cachuela Madera. El caudal de 48800 m³/s corresponde a la crecida máxima registrada en Porto Velho, que tiene un periodo de retorno de aproximadamente 25 años. El caudal de 55000 m³/s corresponde a la crecida máxima diaria con un periodo de retorno de 150 años.

Obsérvese que aguas arriba de la estación hidrométrica de Abuná-Vila, solo se obtuvieron perfiles hasta el caudal de 40000 m³/s. Esto se debe a la falta de datos topográficos por encima de los niveles (cotas) correspondientes a ese caudal. En las tablas 3.5 y 3.6 más adelante se muestran los valores numéricos de los perfiles hidráulicos y de velocidad para los dos tramos y para los tres caudales de las figuras 3.2 y 3.3.

Figura 3.4: Río Madera en Capitanía de Puerto Manoa, 31/8/07



Fotos: SENAMHI

Figura 3.5: Río Madera en Capitanía de Puerto Manoa, 15/11/07



Figura 3.6: Río Madera en Capitanía de Puerto Manoa, 17/03/08



Tabla 3.3: Perfil de la línea de agua (m) en condiciones naturales en el tramo Cachuela Madera aguas abajo (418.1) – Jirau aguas abajo (207)

Sección	Caudal (m³/s)													
	5600	6800	10600	15900	16600	22700	23900	29100	30200	33600	40000	48800	50000	55000
418.1	88.84	89.68	92.09	94.51	94.78	96.95	97.35	98.87	99.19	100.24	102.08			
416.8	88.82	89.66	92.04	94.45	94.72	96.89	97.28	98.80	99.12	100.17	102.00			
415.7	88.75	89.58	91.96	94.35	94.62	96.78	97.17	98.69	99.00	100.05	101.87			
414.8	88.64	89.46	91.81	94.19	94.46	96.61	97.00	98.51	98.82	99.88	101.70			
413.4	88.66	89.48	91.82	94.16	94.43	96.58	96.97	98.48	98.79	99.84	101.66			
412.6	88.63	89.44	91.77	94.09	94.36	96.50	96.89	98.39	98.70	99.75	101.56			
411.1	88.39	89.23	91.62	93.97	94.23	96.39	96.79	98.30	98.62	99.68	101.51			
409.4	88.41	89.23	91.58	93.93	94.20	96.36	96.76	98.28	98.60	99.66	101.50			
408.3	88.38	89.19	91.52	93.85	94.12	96.27	96.66	98.16	98.47	99.53	101.35			
407.1	88.39	89.20	91.53	93.88	94.14	96.30	96.69	98.21	98.52	99.59	101.42			
406.6	88.37	89.18	91.50	93.82	94.08	96.22	96.61	98.11	98.43	99.48	101.30			
405.5	88.36	89.16	91.48	93.79	94.06	96.19	96.58	98.08	98.39	99.45	101.27			
405	87.33	88.28	90.90	93.33	93.60	95.80	96.20	97.74	98.07	99.18	101.07			
398	86.76	87.55	89.73	92.27	92.57	94.97	95.40	96.98	97.31	98.52	100.42			
397.6	86.64	87.40	89.49	91.99	92.28	94.65	95.07	96.61	96.93	98.13	99.99			
396	86.63	87.40	89.51	92.01	92.31	94.69	95.12	96.68	97.01	98.22	100.09			
394.1	86.51	87.27	89.34	91.82	92.12	94.49	94.91	96.46	96.78	97.99	99.86			
392.1	86.50	87.26	89.32	91.79	92.08	94.44	94.86	96.40	96.72	97.93	99.79			
391.1	86.39	87.13	89.17	91.62	91.91	94.25	94.68	96.20	96.53	97.74	99.59			
387.1	86.39	87.12	89.13	91.53	91.82	94.15	94.58	96.09	96.42	97.63	99.48			
385.1	86.35	87.08	89.05	91.43	91.71	94.02	94.44	95.94	96.26	97.47	99.31			
383.1	86.26	86.97	88.91	91.25	91.53	93.83	94.24	95.72	96.04	97.25	99.07			
380.1	86.13	86.82	88.72	91.03	91.31	93.58	93.99	95.45	95.77	96.98	98.78			
378.1	85.99	86.67	88.55	90.86	91.13	93.42	93.83	95.30	95.62	96.84	98.65			
376.1	85.37	86.10	88.07	90.46	90.75	93.09	93.51	94.99	95.31	96.57	98.40			
375	85.21	85.97	87.99	90.41	90.70	93.05	93.47	94.96	95.28	96.55	98.38			
374.1	84.91	85.70	87.79	90.28	90.57	92.96	93.39	94.88	95.21	96.49	98.33			
372	84.09	85.06	87.38	90.02	90.32	92.75	93.18	94.68	95.01	96.30	98.14			
370.1	83.76	84.78	87.19	89.88	90.18	92.62	93.05	94.54	94.87	96.17	98.02			
369	83.63	84.67	87.12	89.83	90.14	92.59	93.02	94.51	94.85	96.15	98.00			
364.1	83.26	84.34	86.80	89.50	89.81	92.27	92.71	94.19	94.53	95.85	97.70			

360.1	82.94	84.08	86.56	89.27	89.59	92.08	92.52	94.00	94.34	95.67	97.52			
357.1	82.89	84.01	86.46	89.15	89.46	91.94	92.37	93.84	94.18	95.52	97.35			
355.1	82.85	83.97	86.39	89.06	89.37	91.81	92.25	93.69	94.02	95.35	97.16			
353.1	82.78	83.89	86.30	88.96	89.26	91.70	92.13	93.57	93.90	95.24	97.04			
350.1	82.68	83.79	86.18	88.80	89.10	91.51	91.93	93.33	93.66	94.99	96.76			
347.1	82.60	83.71	86.08	88.69	88.99	91.39	91.82	93.22	93.55	94.89	96.66			
344.1	82.56	83.66	86.03	88.62	88.91	91.30	91.72	93.11	93.43	94.77	96.54			
341.1	82.51	83.61	85.95	88.51	88.81	91.17	91.59	92.95	93.27	94.61	96.35	98.33	98.57	99.92
338.1	82.46	83.56	85.88	88.41	88.70	91.03	91.45	92.78	93.10	94.44	96.18	98.14	98.38	99.73
338	82.45	83.55	85.86	88.39	88.68	91.00	91.42	92.75	93.07	94.41	96.14	98.10	98.34	99.68
334.1	82.40	83.49	85.77	88.27	88.55	90.84	91.25	92.54	92.85	94.19	95.91	97.86	98.10	99.44
330.1	82.32	83.40	85.65	88.11	88.39	90.64	91.04	92.28	92.59	93.94	95.65	97.59	97.83	99.17
329.2	82.30	83.38	85.63	88.08	88.36	90.60	91.00	92.24	92.54	93.89	95.60	97.54	97.78	99.12
329	82.30	83.38	85.62	88.07	88.35	90.59	90.99	92.22	92.52	93.86	95.56	97.48	97.71	99.04
327	82.28	83.35	85.58	88.00	88.27	90.49	90.88	92.09	92.39	93.72	95.38	97.26	97.49	98.80
320	82.07	83.14	85.30	87.66	87.92	90.10	90.49	91.66	91.95	93.30	94.95	96.81	97.04	98.35
315	82.03	83.09	85.22	87.54	87.81	89.96	90.34	91.50	91.79	93.13	94.76	96.60	96.82	98.12
309	81.90	82.95	85.02	87.28	87.54	89.65	90.03	91.16	91.45	92.79	94.39	96.22	96.44	97.74
306	80.94	82.09	84.29	86.70	86.98	89.13	89.51	90.65	90.94	92.31	93.89	95.71	95.93	97.21
301	79.46	80.56	83.06	85.80	86.11	88.34	88.72	89.85	90.14	91.55	93.14	94.96	95.18	96.45
292	78.55	79.56	82.10	84.93	85.25	87.50	87.86	88.98	89.25	90.50	92.14	94.07	94.31	95.59
286	78.23	79.21	81.69	84.47	84.79	86.99	87.34	88.46	88.72	89.85	91.49	93.45	93.69	94.96
283	77.97	78.92	81.33	84.05	84.36	86.52	86.86	87.97	88.23	89.31	90.93	92.86	93.10	94.32
279	77.59	78.51	80.88	83.57	83.87	86.03	86.37	87.52	87.77	88.82	90.47	92.42	92.67	93.86
272	76.87	77.72	79.95	82.54	82.83	84.91	85.25	86.42	86.66	87.61	89.24	91.20	91.45	92.56
267	76.07	76.87	79.03	81.59	81.87	83.92	84.25	85.43	85.66	86.57	88.17	90.11	90.36	91.42
258	75.60	76.34	78.42	80.93	81.20	83.20	83.53	84.70	84.94	85.84	87.39	89.27	89.51	90.52
256	75.45	76.19	78.26	80.80	81.08	83.09	83.42	84.61	84.84	85.76	87.32	89.22	89.46	90.49
255	75.22	75.97	78.10	80.67	80.94	82.99	83.32	84.52	84.76	85.68	87.25	89.15	89.39	90.43
253	74.96	75.71	77.88	80.46	80.74	82.80	83.14	84.34	84.58	85.50	87.05	88.92	89.16	90.17
243	74.76	75.49	77.62	80.17	80.45	82.50	82.83	84.06	84.30	85.21	86.72	88.54	88.77	89.75
228	74.56	75.25	77.27	79.76	80.02	82.03	82.37	83.64	83.90	84.77	86.23	88.01	88.24	89.19
211	74.25	74.88	76.72	79.05	79.30	81.24	81.58	82.95	83.22	84.03	85.44	87.17	87.40	88.30
210	74.12	74.72	76.48	78.70	78.93	80.76	81.08	82.36	82.62	83.36	84.63	86.17	86.37	87.16
207	65.43	66.25	68.72	71.33	71.58	73.65	74.03	75.38	75.60	76.26	77.40	78.81	78.99	79.72

3.4 EFECTO DE REMANSO DE LOS EMBALSES

La construcción de una represa provoca la elevación de los niveles de agua con respecto a los niveles naturales y como consecuencia la disminución de la velocidad de flujo. Además de crear el embalse e inundar temporal o permanentemente áreas próximas al río, la elevación de niveles tiene múltiples efectos e impactos sobre el medio físico y biológico. En este subcapítulo se presenta los cambios que provocarán las represas de Jirau y Santo Antonio sin considerar la posible sedimentación. Representan por tanto el límite inferior de posibles cambios, es decir los que provocarían los impactos de menor magnitud.

La figura 3.7 es una representación simplificada de los niveles de operación de las represas de Jirau y Santo Antonio, según Furnas-Odebrecht (2004). El efecto de remanso en el río Madera debido a la posible instalación de las centrales hidroeléctricas de Jirau y Santo Antonio, fue determinado por medio de simulaciones con el modelo HEC-RAS. En el caso de Jirau se dio especial énfasis a la evaluación de los efectos sobre el tramo binacional del río Madera, considerando la curva guía de operación del embalse propuesta en el estudio de factibilidad (Furnas-Odebrecht, 2004).



Fuente: Complexo hidrelétrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

Los impulsores del proyecto mencionan que “ante la posibilidad de que no se construyan los proyectos binacionales, se optó por la no inundación de territorio boliviano”, lo que obligó a considerar un régimen de operación con niveles variables a lo largo del año para el embalse de Jirau. Según los autores del estudio de factibilidad (Furnas et al, 2004), “los datos disponibles en la época de los Estudios de Inventario permitieron definir un nivel de agua normal constante de 90.0 m, para mantener inalterado el régimen fluvial del río Madeira aguas arriba de Abunã (límite Brasil – Bolivia), y de sus afluentes bolivianos. Pero los levantamientos topográficos ejecutados en la etapa de factibilidad muestran que un nivel constante de 90 m influencia el régimen fluvial del río Madera aguas arriba de Abunã, “manteniendo inundadas todo el año áreas antes alcanzadas solamente durante el período de crecidas”. Para evitar eso, se definió una curva guía para operar el embalse Jirau con nivel de agua variable a lo largo del año. La tabla 3.4 muestra esa curva guía y los niveles de agua correspondientes a cada caudal en condiciones naturales. La curva guía es una curva de referencia. Como enfatizan los consultores brasileños (Furnas-Odebrecht, 2006) puede ser modificada con las condiciones en tiempo real, cuando ya esté operando el embalse.

Tabla 3.4: Niveles de agua (m) junto a la represa de Jirau

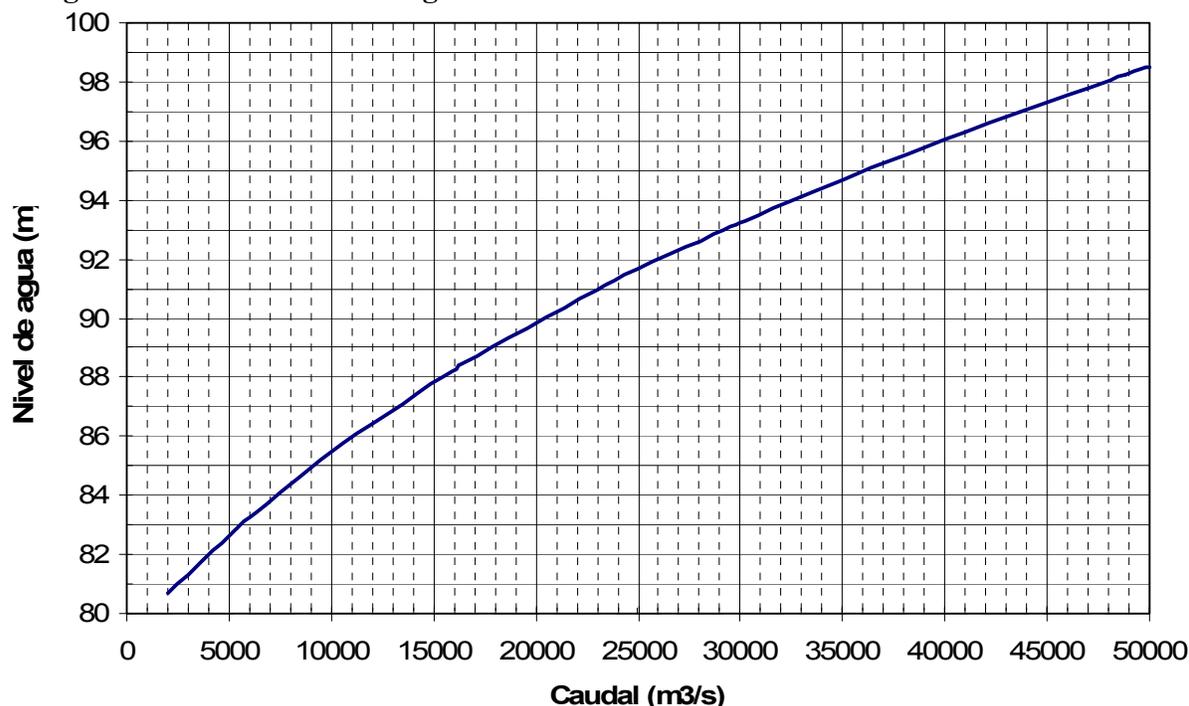
Variable	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Caudal	(Milm3/s)	23.9	29.1	33.6	30.2	22.7	15.9	10.6	6.8	5.6	6.8	10.4	16.6
CG	(m)	90.0	90.0	90.0	90.0	89.5	87.0	85.0	83.0	82.5	83.0	85.0	87.5
CN 210	(m)	81.1	82.4	83.4	82.6	80.8	78.7	76.5	74.7	74.1	74.7	76.4	78.9
CN 207	(m)	74.0	75.4	76.3	75.6	73.6	71.3	68.7	66.3	65.4	66.3	68.6	71.6

CG=Curva guía, CN 210=Nivel de agua en condiciones naturales en la sección 210 (cachuela Jirau aguas arriba), CN 207= Nivel de agua en condiciones naturales en la sección 207 (cachuela Jirau aguas abajo)

Fuente: Complejo hidreléctrico do rio Madeira, estudos de viabilidade, 2004

Todo lo anterior se convirtió en una norma de cumplimiento obligatorio a partir de la resolución ANA 555 (19/12/06) de la Agencia Nacional del Agua de Brasil, que en su artículo 4o. define lo siguiente: “IV - o nível d'água normal do reservatório deverá variar acompanhando as condições naturais do rio Madeira, observando a curva-guia abaixo, avaliada anualmente, e respeitando os níveis d'água necessários à garantia do transporte de balsas em Abunã e à manutenção dos usos múltiplos da água”. La curva nivel de agua – caudal de la estación hidrométrica de Abunã-Vila (sección 338) en condiciones naturales, a la que hace referencia la resolución ANA 555, se muestra en la figura 3.8. Esta curva es considerada estable en el tiempo por los consultores (Furnas-Odebrecht, 2006).

Figura 3.8: Curva Nivel de agua – Caudal en la estación hidrométrica de Abunã-Vila



Fuente: Furnas-Odebrecht, 2004

Los responsables del estudio de factibilidad mantuvieron la alternativa denominada por ellos de “aprovechamiento óptimo a nivel constante de 90.0 m”, pensando en la posibilidad de

llegar a un acuerdo con Bolivia, que permitiese inundar el tramo binacional del río Madera aguas arriba de Abuná.

Una consecuencia práctica de la operación con niveles variables de Jirau es la disminución de la energía a generar por esa central hidroeléctrica. La tabla 1.1 muestra que la energía media generada disminuye de 2225 a 1964 MW, casi un 12%. Técnicamente esa diferencia puede interpretarse como energía potencial hidroeléctrica que está siendo devuelta al tramo binacional del río y por tanto, a Bolivia.

En resumen, además de evaluar los efectos de remanso en todo el tramo afectado, en este subcapítulo se intenta responder explícitamente a dos preguntas:

- a) ¿La curva guía de operación del embalse de Jirau, citada en la resolución ANA 555, permitiría evitar la modificación del nivel natural del agua en el tramo binacional del río Madera, para todo el rango de caudales presentes en el río?
- b) Si la respuesta a la pregunta anterior es negativa, ¿existe alguna otra curva de operación del embalse de Jirau que permitiría evitar esa modificación?

3.4.1 Perfiles hidráulicos

Las simulaciones se realizaron manteniendo un nivel constante en el embalse de Santo Antonio y un nivel variable en el embalse de Jirau (tabla 3.4). La figura 3.9 muestra los perfiles hidráulicos (niveles de agua) para el tramo Santo Antonio-Jirau y la figura 3.10 para el tramo Jirau-Cachuela Madera, en condiciones naturales y con represa, para tres caudales representativos: 5000, 18000 y 40000 m³/s, con los coeficientes de rugosidad de las tablas A.2.1 y A.2.2. El primer caudal corresponde aproximadamente al caudal medio del mes más seco (septiembre) en Abuná, el segundo al caudal medio interanual y el caudal de 40000 m³/s a la crecida máxima media anual. Los datos correspondientes a la figura 3.10 se muestran en el tabla 3.6.

Se observa que la variación de niveles inducida por los embalses es más marcada en Santo Antonio que en Jirau. El nivel constante de 70.0 m en Santo Antonio hace desaparecer la cachuela/salto de Teotonio, entre las secciones 96 y 98. El cambio es mucho más fuerte para caudales bajos y en los sectores próximos a la represa. Para caudales de crecida el cambio es de pequeña magnitud arriba de la sección 130.

Una consecuencia adicional es la disminución de la variación estacional de niveles. Como ya se indicó, en condiciones naturales la diferencia promedio de niveles de agua entre los caudales de 5000 y 40000 m³/s, que corresponden aproximadamente a los niveles mínimo y máximo medio anuales, es de 11.4 m en el tramo Santo Antonio – Jirau. Esta diferencia se reduciría prácticamente a cero para todas las secciones próximas a la represa y a cerca de 8 m en la sección más alejada (207).

Figura 3.9: Perfil de la línea de agua entre Santo Antonio (81) y Jirau aguas abajo (207)

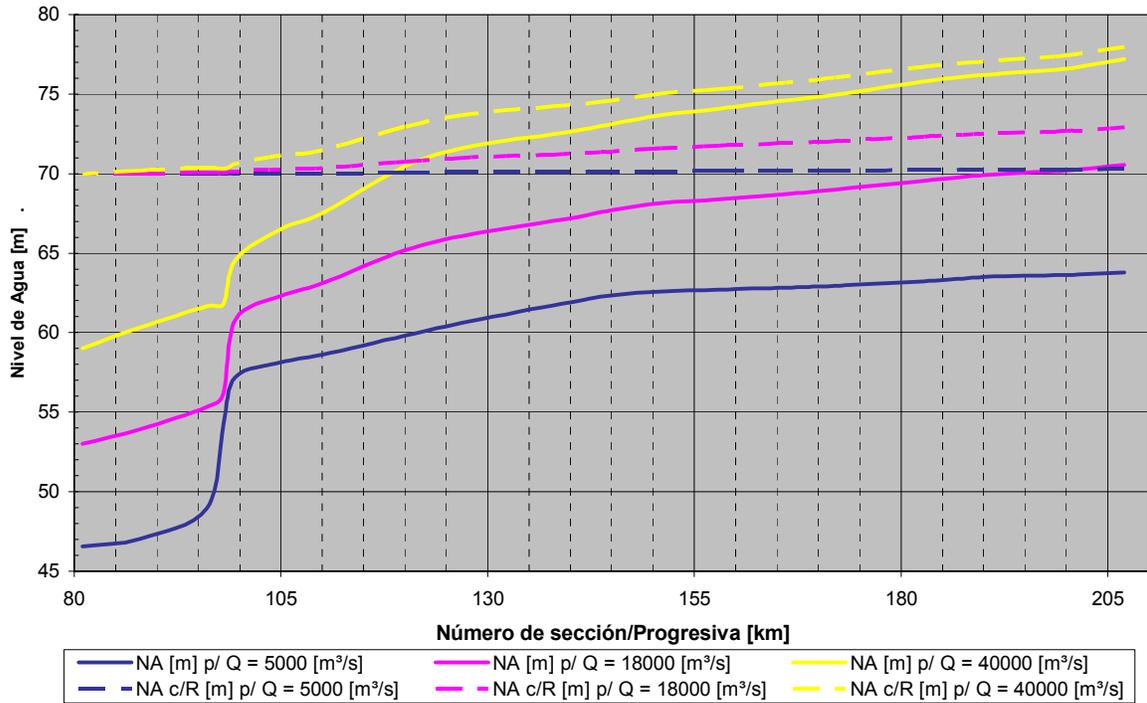
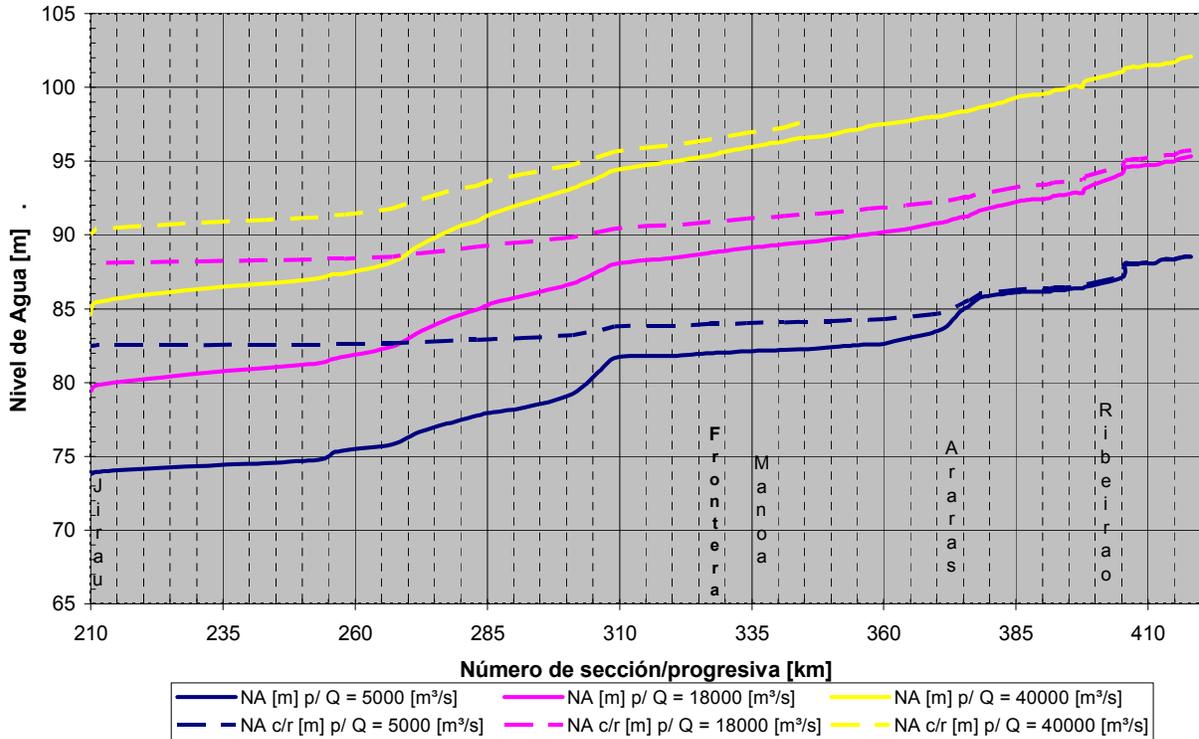


Figura 3.10: Perfil de la línea de agua entre Jirau (210) y cachuela Madera aguas abajo (418.1)



NA (m)=Nivel de agua en condición natural

NA c/r (m)= Nivel de agua con represa

La variación de niveles inducida por Jirau es de menor magnitud que en Santo Antonio, debido al régimen de operación variable del embalse. Para caudales bajos se observa que el efecto del embalse llega hasta la cachuela de Araras y para caudales medios hasta la cachuela de Ribeirao, en territorio boliviano. La simulación para caudales altos solo se pudo realizar hasta la sección 344, situada 6 km aguas arriba de Puerto Manoa, por falta de datos topográficos de la parte superior de las secciones.

Aún con el régimen de operación variable, la variación estacional de niveles se ve afectada. La diferencia promedio de niveles de agua entre los caudales de 5000 y 40000 m³/s, que corresponden aproximadamente a los niveles mínimo y máximo medio anuales, es de 13.4 m en el tramo Jirau-Cachuela Madera. Esta variación se reduciría a 7.5 m en el tramo próximo a la represa y a aproximadamente 12.65 m al inicio del tramo binacional.

La tabla 3.5 muestra los cambios en niveles de agua y velocidades inducidos por la represa de Santo Antonio, en valores numéricos. La tabla 3.6 muestra las mismas variables para la represa de Jirau. Las figuras 3.11 y 3.12 muestran, respectivamente, las velocidades con y sin represa a lo largo de los tramos de los futuros embalses de Santo Antonio y Jirau.

Tabla 3.5: Niveles y velocidades de flujo en el embalse de Santo Antonio

Seccion	Q = 5000 [m ³ /s]		Q = 5000 [m ³ /s]		Q = 18000 [m ³ /s]		Q = 18000 [m ³ /s]		Q = 40000 [m ³ /s]		Q = 40000 [m ³ /s]	
	NA [m]	V [m/s]	NA c/R [m]	V c/R [m/s]	NA [m]	V [m/s]	NA c/R [m]	V c/R [m/s]	NA [m]	V [m/s]	NA c/R [m]	V c/R [m/s]
207	63.77	0.65	70.31	0.36	70.56	1.26	72.93	1.07	77.21	1.86	77.96	1.79
200	63.64	0.48	70.28	0.31	70.18	1.14	72.69	1.00	76.60	1.87	77.42	1.81
195	63.59	0.37	70.27	0.23	70.05	0.84	72.60	0.73	76.39	1.37	77.23	1.32
190	63.52	0.48	70.26	0.25	69.90	0.94	72.52	0.78	76.18	1.38	77.05	1.30
184	63.28	0.63	70.24	0.25	69.62	0.95	72.37	0.75	75.86	1.31	76.78	1.23
172	62.96	0.49	70.20	0.30	68.99	1.15	72.04	0.97	74.96	1.87	76.04	1.77
166	62.83	0.59	70.19	0.26	68.72	1.06	71.91	0.83	74.59	1.55	75.73	1.45
158	62.69	0.39	70.17	0.24	68.39	0.96	71.74	0.80	74.06	1.59	75.31	1.50
151	62.59	0.45	70.15	0.19	68.13	0.85	71.60	0.58	73.68	1.05	75.03	0.93
145	62.35	0.67	70.13	0.29	67.72	1.27	71.41	0.93	73.10	1.84	74.61	1.66
139	61.83	0.78	70.11	0.31	67.11	1.46	71.24	0.96	72.57	1.81	74.29	1.50
128	60.72	0.64	70.09	0.21	66.17	1.06	71.01	0.72	71.72	1.52	73.75	1.34
120	59.81	0.93	70.06	0.34	65.17	1.80	70.75	1.16	70.48	2.63	72.97	2.23
110	58.60	0.80	70.03	0.29	63.12	1.70	70.33	1.01	67.51	2.69	71.46	2.11
105	58.12	0.63	70.02	0.17	62.31	1.20	70.25	0.60	66.49	1.78	71.14	1.26
99.5	57.23	1.05	70.01	0.23	60.83	1.96	70.13	0.84	64.58	2.85	70.63	1.81
98	54.23	3.86	70.00	0.28	56.19	5.62	70.06	1.00	61.78	4.46	70.31	2.20
96	48.97	1.17	70.01	0.07	55.32	0.93	70.08	0.24	61.64	0.99	70.39	0.53
88	47.03	0.80	70.00	0.17	53.92	1.43	70.04	0.59	60.35	2.13	70.20	1.31
81	46.58	0.60	70.00	0.15	52.99	1.31	70.00	0.53	59.00	2.05	70.00	1.19

NA (m)=Nivel de agua en condición natural

V(m/s)= Velocidad de flujo en condición natural

NA c/R (m)= Nivel de agua con represa

V c/R (m/s)= Velocidad de flujo con represa

Como era de esperar, los cambios son muy grandes junto a las represas. En Santo Antonio, el nivel del agua sube 23.42 m (de 46.58 a 70.0) y la velocidad de flujo se reduce de 0.60 a 0.15 m/s para el caudal de 5000 m³/s. Para el caudal medio de 18000 m³/s el nivel sube 17.01 m (de 52.99 a 70.0) y la velocidad se reduce de 1.31 a 0.53 m/s. Los cambios son mucho más grandes en la cachuela de Teotonio, donde la velocidad se reduce de 3.86 a 0.28 m/s para el caudal de 5000 m³/s y de 5.62 a 1.0 m/s para el caudal de 18000 m³/s.

Tabla 3.6: Niveles y velocidades de flujo inducidos por el embalse de Jirau

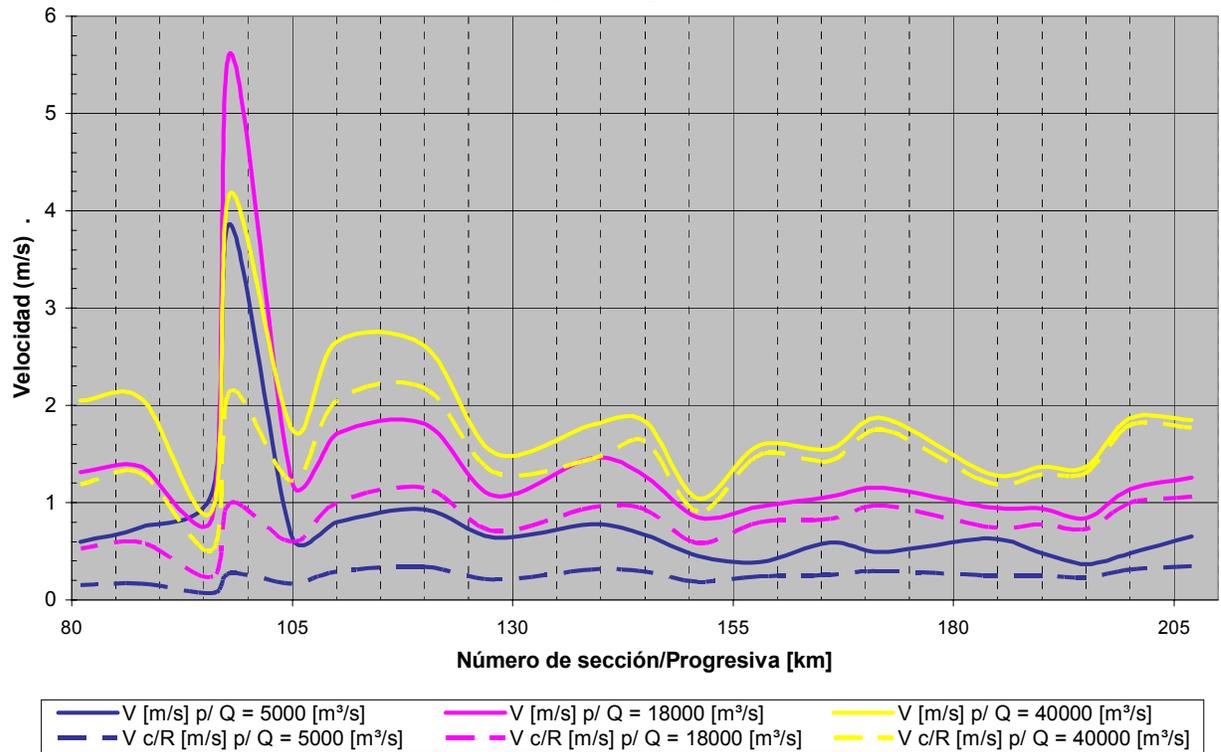
Seccion	Q = 5000 [m³/s]				Q = 18000 [m³/s]				Q = 40000 [m³/s]			
	NA [m]	NA c/R [m]	V [m/s]	V c/R [m/s]	NA [m]	NA c/R [m]	V [m/s]	V c/R [m/s]	NA [m]	NA c/R [m]	V [m/s]	V c/R [m/s]
418.1	88.52	88.53	0.75	0.75	95.31	95.72	1.49	1.44	102.08			2.09
416.8	88.50	88.51	0.68	0.68	95.25	95.67	1.40	1.36	102.00			2.12
415.7	88.44	88.45	0.95	0.95	95.15	95.58	1.62	1.57	101.88			2.33
413.4	88.35	88.36	0.51	0.51	94.95	95.40	1.31	1.28	101.66			2.13
411.1	88.08	88.09	1.59	1.58	94.75	95.24	1.59	1.51	101.51			2.00
409.4	88.10	88.11	0.53	0.53	94.72	95.21	1.02	0.98	101.50			1.46
408.3	88.07	88.08	0.70	0.70	94.64	95.13	1.35	1.31	101.35			2.01
407.1	88.07	88.08	0.30	0.30	94.66	95.15	0.73	0.71	101.42			1.20
405	87.11	87.14	4.07	4.04	94.13	94.71	2.91	2.65	101.07			2.44
398	86.49	86.64	0.87	0.85	93.15	93.98	1.44	1.33	100.42			1.86
396	86.37	86.53	0.64	0.63	92.89	93.77	1.32	1.25	100.09			1.95
394.1	86.25	86.43	0.84	0.82	92.69	93.61	1.52	1.42	99.86			2.15
391.1	86.14	86.33	1.30	1.24	92.47	93.43	1.75	1.60	99.59			2.24
387.1	86.14	86.33	0.43	0.43	92.38	93.36	1.10	1.04	99.48			1.75
385.1	86.11	86.30	0.69	0.67	92.26	93.26	1.45	1.36	99.31			2.16
383.1	86.02	86.22	0.96	0.94	92.08	93.12	1.85	1.71	99.07			2.62
380.1	85.89	86.12	0.87	0.85	91.85	92.94	1.86	1.73	98.78			2.77
378.1	85.76	86.01	0.98	0.94	91.67	92.82	1.74	1.59	98.65			2.41
376.1	85.14	85.55	1.98	1.73	91.30	92.57	2.12	1.85	98.40			2.56
375	84.98	85.45	0.83	0.77	91.25	92.54	1.48	1.34	98.38			2.07
374.1	84.68	85.25	1.63	1.40	91.14	92.47	1.69	1.45	98.33			1.98
372	83.82	84.84	1.00	0.83	90.91	92.33	1.43	1.27	98.15			1.93
370.1	83.49	84.68	1.22	0.99	90.77	92.24	1.59	1.40	98.02			2.09
369	83.34	84.62	0.83	0.67	90.73	92.21	1.22	1.08	98.00			1.68
364.1	82.97	84.44	0.89	0.74	90.40	92.00	1.46	1.28	97.70			1.96
360.1	82.63	84.31	1.11	0.79	90.19	91.87	1.42	1.24	97.52			1.92
357.1	82.57	84.27	0.54	0.48	90.06	91.78	1.22	1.12	97.35			1.95
355.1	82.54	84.25	0.70	0.60	89.96	91.70	1.50	1.37	97.16			2.37
353.1	82.46	84.22	0.78	0.65	89.85	91.63	1.51	1.35	97.04			2.28
350.1	82.37	84.17	0.90	0.75	89.68	91.50	1.79	1.60	96.76			2.74
347.1	82.28	84.13	0.67	0.57	89.57	91.43	1.39	1.25	96.66			2.16
344.1	82.24	84.11	0.58	0.51	89.48	91.37	1.33	1.21	96.54	97.61	2.17	2.08
341.1	82.20	84.08	0.65	0.56	89.37	91.29	1.45	1.31	96.35	97.27	2.33	2.24
338	82.15	84.05	0.66	0.57	89.23	91.19	1.49	1.34	96.14	97.09	2.38	2.28
334.1	82.10	84.02	0.45	0.40	89.10	91.09	1.09	1.00	95.91	96.90	1.82	1.76
330.1	82.03	83.98	0.65	0.53	88.92	90.97	1.31	1.15	95.65	96.69	2.01	1.91
329.2	82.02	83.97	0.44	0.38	88.89	90.95	0.99	0.89	95.60	96.65	1.57	1.49
327	81.99	83.96	0.48	0.42	88.80	90.88	1.17	1.06	95.38	96.45	1.96	1.88
320	81.81	83.86	0.90	0.64	88.43	90.67	1.41	1.18	94.95	96.10	1.99	1.86
315	81.78	83.84	0.42	0.37	88.31	90.59	1.06	0.96	94.76	95.94	1.80	1.72
309	81.67	83.78	0.44	0.37	88.03	90.43	1.02	0.89	94.39	95.65	1.63	1.52
306	80.69	83.51	0.49	0.40	87.50	90.18	1.16	1.01	93.89	95.27	1.90	1.79
301	79.23	83.19	0.52	0.39	86.70	89.85	1.14	0.97	93.14	94.73	1.87	1.75
292	78.32	83.02	0.34	0.25	85.87	89.52	0.78	0.66	92.15	94.13	1.23	1.10
286	78.00	82.95	0.40	0.29	85.40	89.34	0.91	0.74	91.49	93.73	1.49	1.35
283	77.74	82.89	0.55	0.39	84.95	89.18	1.25	1.02	90.93	93.35	2.10	1.91
279	77.35	82.83	0.41	0.29	84.46	89.04	0.97	0.79	90.47	93.09	1.65	1.50
272	76.61	82.72	0.55	0.39	83.39	88.74	1.34	1.06	89.24	92.37	2.31	2.05
267	75.82	82.65	1.03	0.52	82.42	88.52	1.89	1.29	88.17	91.79	2.91	2.43
258	75.38	82.60	0.50	0.32	81.74	88.39	1.22	0.90	87.39	91.36	2.09	1.79
256	75.24	82.60	0.87	0.28	81.61	88.38	1.12	0.63	87.32	91.35	1.51	1.12
255	75.01	82.59	0.85	0.29	81.49	88.37	1.18	0.62	87.25	91.32	1.50	1.09
253	74.76	82.58	0.64	0.29	81.30	88.33	1.15	0.74	87.05	91.21	1.76	1.43
243	74.54	82.56	0.43	0.27	80.99	88.28	1.05	0.76	86.72	91.02	1.80	1.50
228	74.31	82.54	0.54	0.32	80.55	88.21	1.29	0.80	86.24	90.78	1.99	1.53
211	73.93	82.52	0.56	0.32	79.78	88.11	1.35	0.80	85.44	90.44	2.09	1.56
210	73.81	82.50	1.23	0.58	79.39	88.00	2.62	1.50	84.63	90.00	4.04	3.03

NA (m)=Nivel de agua en condición natural NA c/R (m)= Nivel de agua con represa

V(m/s)= Velocidad de flujo en condición natural

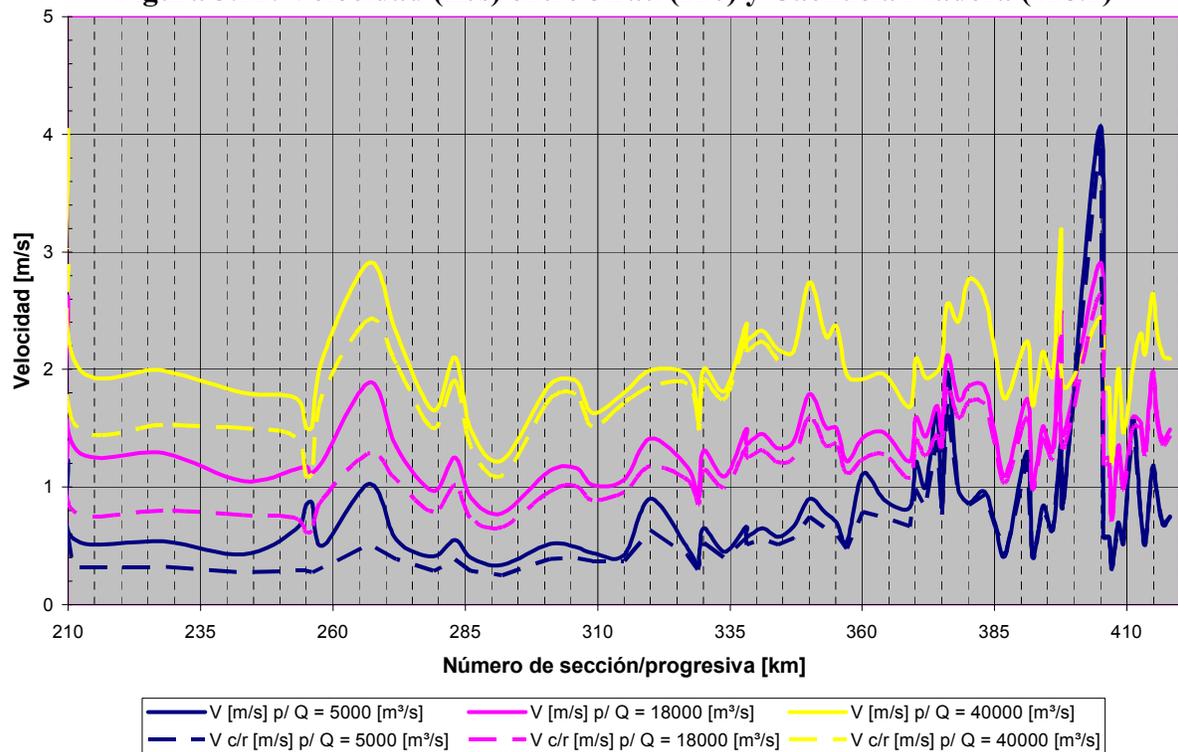
V c/R (m/s)= Velocidad de flujo con represa

Figura 3.11: Velocidad de flujo (m/s) entre Santo Antonio (81) y Jirau aguas abajo (207), con y sin represa



V(m/s)= Velocidad de flujo en condición natural, V c/R (m/s)= Velocidad de flujo con represa

Figura 3.12: Velocidad (m/s) entre Jirau (210) y Cachuela Madera (418.1)



Las tablas 3.7 y 3.8 muestran, respectivamente, los perfiles hidráulicos para diversos caudales en los tramos Santo Antonio-Jirau y Jirau-Cachuela Madera, para la condición con embalse. Obsérvese que aguas arriba de la estación hidrométrica de Abuná-Vila, solo se obtuvieron perfiles hasta el caudal de 33600 m³/s. Esto se debe a la falta de datos topográficos por encima de los niveles (cotas) correspondientes a ese caudal, para la condición con embalse.

3.4.2 Efectos de remanso en el tramo binacional

La figura 3.10 y la tabla 3.6 evidencian que los niveles de agua en el tramo binacional serán afectados, aún considerando un régimen de niveles variables en el embalse de Jirau. En la sección 329.2, donde se inicia el tramo binacional y por tanto territorio boliviano, el nivel del agua subiría cerca de 2 m para caudales bajos y medios y un poco más de 1 m para el caudal de 40000 m³/s.

Los perfiles que se muestran en las tablas 3.3 (condiciones naturales) y 3.8 (con represa) permiten describir los cambios sobre un rango más amplio de caudales. Para un caudal bajo de 6800 m³/s en la sección 329.2, el nivel del agua con represa subiría 1.48 m (de 83.54 a 85.02). El cambio del nivel de agua se incrementa con el caudal hasta alcanzar un valor máximo de 2.35 m (de 91.04 a 93.39) para el caudal de 23900 m³/s. A partir de allí disminuye: es de 1.01 m para el caudal de 40000 m³/s, de 0.91 m (de 97.58 a 98.49) para el caudal máximo diario de 48800 m³/s registrado en Porto Velho y de 0.76 m para el caudal de 55000 m³/s. De todas maneras, los resultados indican que habría efectos de remanso en el tramo binacional para todo el rango de caudales registrados, incluso los de crecida, si se aplicase la curva guía de operación de Jirau. Para el caudal de 33600 m³/s y caudales menores, habría efecto de remanso hasta la cachuela Madera aguas abajo (sección 418.1).

Sin embargo, según los estudios de factibilidad (Furnas-Odebrecht, 2004) solamente existiría sobre-elevación de los niveles de agua (efecto de remanso) en la estación hidrométrica de Abuná-Vila (sección 338) para caudales de hasta 36000 m³/s, si se aplica la curva guía de Jirau. Esa estación está situada casi 9 km más arriba de la sección 329.2. Para caudales medios y bajos la sobre-elevación estaría en el orden de 1.50 a 2.0 m (ver tabla 3.9), es decir en el mismo orden que las estimaciones del presente estudio.

Ante la consulta realizada por el Gobierno boliviano sobre este tema, el Gobierno brasileño respondió (octubre 2007) con el mismo argumento de Furnas-Odebrecht: que aún con las sobre-elevaciones de la tabla 3.9 para caudales medios y bajos, el nivel del agua se mantiene dentro del canal principal del río Madera, sin provocar desbordes.

Tabla 3.7: Perfil de la línea de agua (m) con represa en el tramo Santo Antonio (418.1) – Jirau aguas abajo (207)

Sección	Caudal (m³/s)													
	5000	6800	10600	15900	16600	22700	23900	29100	30200	33600	40000	48800	50000	55000
Nivel junto a represa San Antonio 70.0 m														
207	63.77	65.08	67.32	69.73	70.01	72.27	72.67	74.39	74.70	75.62	77.22	79.14	79.35	80.19
200	63.64	64.90	67.06	69.39	69.66	71.83	72.22	73.88	74.18	75.08	76.61	78.46	78.68	79.50
195	63.59	64.83	66.97	69.27	69.54	71.68	72.07	73.71	74.00	74.89	76.40	78.23	78.45	79.29
190	63.52	64.75	66.86	69.13	69.39	71.51	71.89	73.52	73.82	74.69	76.19	78.01	78.23	79.08
184	63.28	64.50	66.59	68.85	69.11	71.21	71.59	73.22	73.51	74.37	75.87	77.68	77.91	78.78
172	62.96	64.12	66.11	68.26	68.51	70.52	70.88	72.45	72.73	73.55	74.98	76.72	76.94	77.83
166	62.83	63.96	65.90	68.01	68.25	70.21	70.57	72.12	72.39	73.19	74.60	76.32	76.53	77.42
158	62.69	63.79	65.68	67.71	67.94	69.84	70.18	71.69	71.95	72.73	74.08	75.73	75.94	76.79
151	62.59	63.66	65.50	67.46	67.69	69.53	69.87	71.31	71.56	72.34	73.69	75.34	75.56	76.41
145	62.35	63.39	65.17	67.07	67.29	69.08	69.41	70.74	70.99	71.77	73.12	74.75	74.96	75.81
139	61.83	62.84	64.58	66.46	66.68	68.46	68.78	70.09	70.36	71.18	72.59	74.28	74.50	75.37
128	60.72	61.79	63.58	65.51	65.73	67.53	67.86	69.18	69.46	70.30	71.74	73.45	73.67	74.53
120	59.81	60.88	62.65	64.52	64.74	66.47	66.78	68.06	68.32	69.13	70.52	72.14	72.34	73.16
110	58.61	59.51	61.02	62.58	62.76	64.15	64.40	65.47	65.68	66.38	67.58	69.00	69.17	69.86
105	58.13	58.96	60.35	61.80	61.97	63.24	63.47	64.48	64.69	65.39	66.58	67.99	68.16	68.88
98	54.23	54.79	55.24	55.95	56.03	57.60	57.97	59.47	59.76	60.87	62.22	63.87	64.09	64.93
96	49.28	50.50	52.45	54.87	55.18	57.37	57.76	59.33	59.64	60.65	62.14	63.96	64.19	65.11
88	47.92	48.68	50.96	53.65	53.95	56.26	56.66	58.25	58.56	59.47	61.02	62.90	63.14	64.08
81	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8: Perfil de la línea de agua (m) con represa en el tramo Cachuela Madera aguas abajo (418.1) – Jirau (210)

Sección	Caudal (m³/s)													
	5600	6800	10600	15900	16600	22700	23900	29100	30200	33600	40000	48800	50000	55000
	Nivel del Agua en el Reservorio AHE Jirau													
	82.5	83	85	87	87.5	89.5	90	90	90	90	90	90	90	90
418.1	88.92	89.79	92.26	94.82	95.15	97.52	97.98	99.47	99.78	100.72				
416.8	88.90	89.77	92.22	94.77	95.10	97.47	97.92	99.41	99.72	100.66				
415.7	88.84	89.70	92.13	94.68	95.00	97.37	97.83	99.31	99.61	100.55				
413.4	88.75	89.60	92.00	94.50	94.83	97.20	97.66	99.13	99.43	100.35				
412.6	88.72	89.56	91.95	94.44	94.77	97.13	97.58	99.05	99.35	100.27				
411.1	88.50	89.37	91.82	94.33	94.66	97.04	97.51	98.98	99.29	100.21				
409.4	88.51	89.36	91.78	94.30	94.63	97.02	97.49	98.97	99.28	100.20				
408.3	88.48	89.32	91.72	94.23	94.56	96.93	97.40	98.86	99.16	100.08				
407.1	88.49	89.33	91.74	94.25	94.58	96.97	97.43	98.91	99.21	100.13				
406.6	88.47	89.30	91.70	94.19	94.53	96.90	97.36	98.82	99.12	100.04				
405.5	88.46	89.29	91.68	94.17	94.50	96.87	97.33	98.79	99.10	100.01				
405	87.57	88.51	91.18	93.78	94.12	96.56	97.04	98.54	98.85	99.78				
398	87.04	87.88	90.25	92.96	93.34	95.96	96.45	97.96	98.28	99.23				
396	86.93	87.74	90.07	92.75	93.13	95.74	96.23	97.72	98.03	98.96				
394.1	86.81	87.62	89.93	92.59	92.97	95.57	96.07	97.54	97.84	98.77				
392.1	86.81	87.61	89.91	92.55	92.94	95.53	96.03	97.49	97.79	98.71				
391.1	86.71	87.50	89.78	92.42	92.80	95.39	95.88	97.33	97.63	98.54				
387.1	86.71	87.49	89.74	92.34	92.73	95.31	95.81	97.25	97.55	98.45				
385.1	86.67	87.44	89.67	92.25	92.64	95.21	95.70	97.12	97.42	98.31				
383.1	86.59	87.35	89.56	92.11	92.50	95.05	95.55	96.95	97.24	98.11				
380.1	86.48	87.22	89.40	91.93	92.32	94.87	95.36	96.74	97.02	97.88				
378.1	86.36	87.09	89.27	91.80	92.20	94.76	95.25	96.63	96.91	97.77				
376.1	85.91	86.68	88.95	91.53	91.94	94.54	95.05	96.42	96.70	97.55				
375	85.81	86.59	88.89	91.50	91.91	94.52	95.03	96.40	96.68	97.54				
374.1	85.61	86.41	88.78	91.42	91.84	94.47	94.98	96.35	96.63	97.49				
372	85.20	86.05	88.56	91.26	91.68	94.33	94.85	96.21	96.49	97.34				
370.1	85.03	85.90	88.45	91.17	91.59	94.25	94.76	96.11	96.39	97.24				
369	84.96	85.84	88.41	91.14	91.57	94.23	94.75	96.09	96.37	97.22				
364.1	84.78	85.64	88.19	90.92	91.35	94.02	94.54	95.87	96.14	96.98				

360.1	84.64	85.50	88.05	90.78	91.22	93.90	94.43	95.74	96.01	96.84				
357.1	84.59	85.44	87.98	90.69	91.13	93.80	94.33	95.62	95.89	96.70				
355.1	84.57	85.41	87.93	90.62	91.06	93.71	94.24	95.50	95.76	96.56				
353.1	84.53	85.36	87.87	90.55	90.99	93.64	94.16	95.42	95.68	96.47				
350.1	84.47	85.30	87.79	90.43	90.87	93.50	94.02	95.24	95.49	96.26				
347.1	84.43	85.24	87.72	90.36	90.80	93.43	93.96	95.17	95.42	96.18				
344.1	84.40	85.22	87.68	90.30	90.74	93.37	93.89	95.08	95.33	96.09				
341.1	84.37	85.18	87.63	90.23	90.67	93.28	93.80	94.97	95.21	95.95	97.27			
338	84.34	85.14	87.57	90.13	90.57	93.16	93.68	94.83	95.06	95.79	97.09	98.97	99.23	100.31
334.1	84.30	85.09	87.50	90.04	90.48	93.04	93.56	94.68	94.91	95.62	96.90	98.76	99.02	100.08
330.1	84.26	85.04	87.42	89.93	90.37	92.90	93.42	94.51	94.74	95.44	96.69	98.53	98.79	99.84
329.2	84.25	85.02	87.41	89.91	90.35	92.88	93.39	94.47	94.70	95.40	96.65	98.49	98.75	99.80
329	84.24	85.02	87.40	89.90	90.34	92.87	93.38	94.45	94.68	95.37	96.60	98.42	98.68	99.71
327	84.23	85.00	87.37	89.85	90.28	92.80	93.30	94.35	94.57	95.24	96.45	98.22	98.47	99.48
320	84.12	84.87	87.20	89.63	90.07	92.58	93.08	94.08	94.29	94.93	96.10	97.84	98.08	99.09
315	84.09	84.84	87.14	89.56	90.00	92.49	92.99	93.97	94.17	94.80	95.94	97.65	97.89	98.88
309	84.02	84.75	87.02	89.39	89.83	92.32	92.82	93.75	93.94	94.54	95.65	97.33	97.56	98.53
306	83.71	84.43	86.75	89.13	89.58	92.08	92.58	93.45	93.64	94.21	95.27	96.90	97.12	98.05
301	83.34	84.05	86.40	88.77	89.23	91.74	92.24	93.04	93.20	93.73	94.73	96.28	96.49	97.37
292	83.14	83.81	86.11	88.42	88.92	91.32	91.84	92.53	92.68	93.17	94.13	95.60	95.80	96.64
286	83.05	83.70	85.96	88.25	88.75	91.08	91.60	92.23	92.37	92.82	93.73	95.11	95.31	96.11
283	82.99	83.61	85.83	88.10	88.61	90.90	91.41	91.98	92.11	92.52	93.35	94.62	94.80	95.54
279	82.91	83.52	85.70	87.97	88.48	90.75	91.27	91.80	91.91	92.30	93.09	94.27	94.44	95.13
272	82.78	83.35	85.47	87.69	88.19	90.41	90.93	91.34	91.43	91.74	92.37	93.31	93.45	94.01
267	82.68	83.23	85.31	87.48	87.98	90.17	90.69	91.00	91.07	91.30	91.79	92.54	92.64	93.11
258	82.63	83.16	85.23	87.35	87.86	90.00	90.51	90.75	90.80	90.98	91.36	91.94	92.03	92.39
256	82.62	83.15	85.22	87.34	87.85	89.99	90.51	90.74	90.80	90.98	91.35	91.94	92.03	92.40
255	82.61	83.14	85.21	87.33	87.84	89.98	90.50	90.73	90.78	90.95	91.32	91.91	91.99	92.36
253	82.60	83.12	85.19	87.30	87.80	89.93	90.45	90.66	90.71	90.87	91.21	91.74	91.82	92.16
243	82.58	83.10	85.16	87.25	87.76	89.86	90.38	90.55	90.59	90.73	91.02	91.47	91.54	91.83
228	82.56	83.07	85.12	87.19	87.69	89.77	90.29	90.42	90.45	90.56	90.78	91.15	91.20	91.44
211	82.52	83.03	85.05	87.09	87.60	89.65	90.16	90.23	90.25	90.31	90.44	90.66	90.70	90.84
210	82.50	83.00	85.00	87.00	87.50	89.50	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9: Sobrelevación en la sección 338 (42.6), según Furnas-Odebrecht (2004)
 Perfis da Linha d'Água em Condições Naturais Fonte: EIA–Tomo B 7/8, p. 4.14

Seção	Vazão (m³/s)														
	5.600	6.800	10.600	10.400	15.900	16.600	22.700	23.900	29.100	30.200	33.600	48.800	60.200	71.400	82.600
28	74,11	74,71	76,46	76,37	78,63	78,88	80,77	81,10	82,41	82,67	83,41	86,18	87,93	89,45	90,83
42.3	81,96	82,86	84,85	84,76	87,38	87,68	90,30	90,76	92,31	92,56	93,41	97,26	99,93	102,25	104,45
42.6	82,10	83,00	85,01	84,92	87,56	87,87	90,55	91,01	92,61	92,87	93,74	97,69	100,39	102,73	104,95

Perfis da Linha d'Água Com o Reservatório do AHE Jirau. Fonte: EIA–Tomo B 7/8, p.4.14

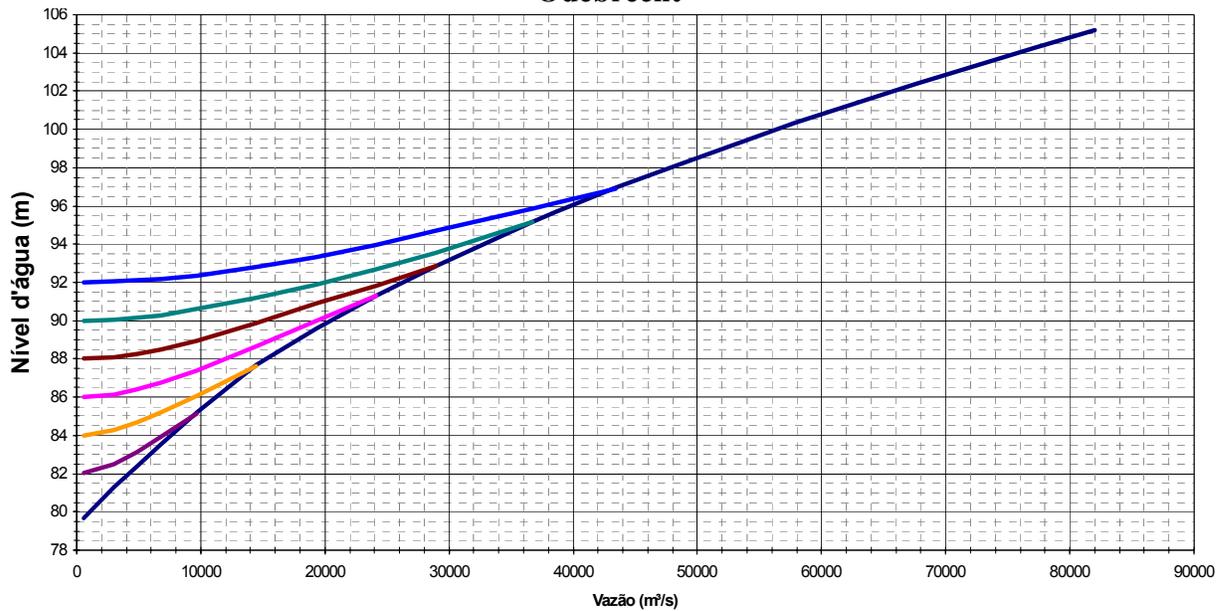
Seção	Vazão (m³/s)														
	5600	6800	10600	10400	15900	16600	22700	23900	29100	30200	33600	48800	60200	71400	82600
	Nível d'água no Reservatório do AHE Jirau														
	82,5	83	85	85	87	87,5	89,5	90	90	90	90	90	90	90	92
42.3	83,66	84,40	86,78	86,73	89,37	89,82	91,95	92,42	93,25	93,43	94,00	97,26	99,93	102,25	104,45
42.6	83,71	84,46	86,84	86,79	89,46	89,91	92,07	92,54	93,41	93,60	94,20	97,69	100,39	102,73	104,95

La figura 3.13 muestra los niveles de agua que se producirían en la estación hidrométrica de Abuná-Vila según Furnas-Odebrecht (2004), considerando diversos niveles de operación de Jirau (entre 80 y 92 m) y diversos caudales. Según la figura 3.13, para un nivel de agua junto a la represa de 90.0 m, los niveles de agua en Abuná-Vila serían afectados solamente hasta un caudal de 36000 m³/s. Para un nivel máximo extraordinario de 92.0 junto a la represa, los niveles en Abuná-Vila serían afectados hasta un caudal de 44000 m³/s.

Para ilustrar mejor las diferencias entre el presente estudio y los estudios de factibilidad (Viabilidade en portugués), se construyó curvas equivalentes en la sección 338 (estación de Abuná-Vila) con los resultados del presente estudio, que se muestran en la figura 3.14.

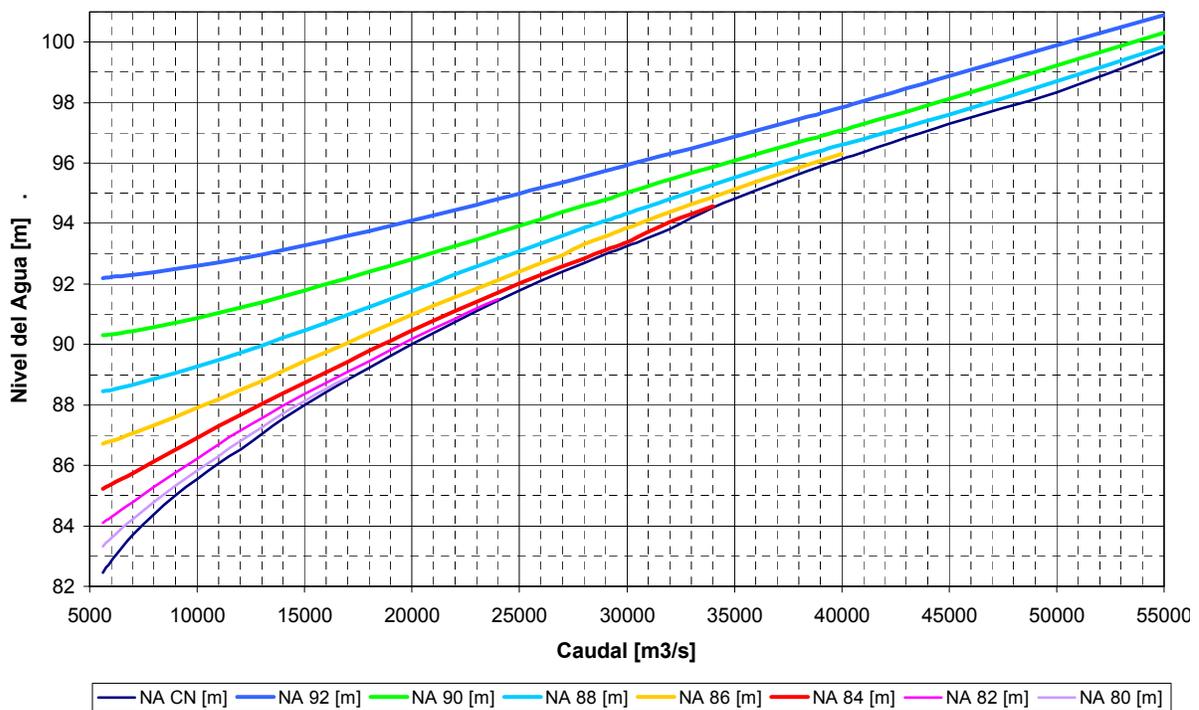
Como se observa en las figuras 3.13 y 3.14, las diferencias son significativas. Un análisis de los estudios brasileños mostró que esa diferencia se debe principalmente a la disminución del coeficiente de rugosidad n (ver figura 3.15), en un valor casi constante de 0.005-0.006 para todas las secciones del tramo Jirau-Abuná y para todos los niveles/cotas de cada sección, en la situación con embalse. Según los consultores brasileños (página 7.22, Estudio de Viabilidad), esa modificación se realizó en función del análisis de las características fisiográficas del embalse a ser formado. La pregunta es: ¿se puede sustentar técnicamente esa reducción del coeficiente n para el caso con embalse?

Figura 3.13: Río Madera en Abuná-Vila (sección 338)
Curva Nivel de agua-Caudal con influencia del embalse de Jirau, según Furnas-Odebrecht



Fuente: Estudios de Viabilidad (Furnas-Odebrecht, 2004)

Figura 3.14: Río Madera en Abuná-Vila (sección 338)
Curva Nivel de agua-Caudal con influencia del embalse de Jirau, según el presente estudio



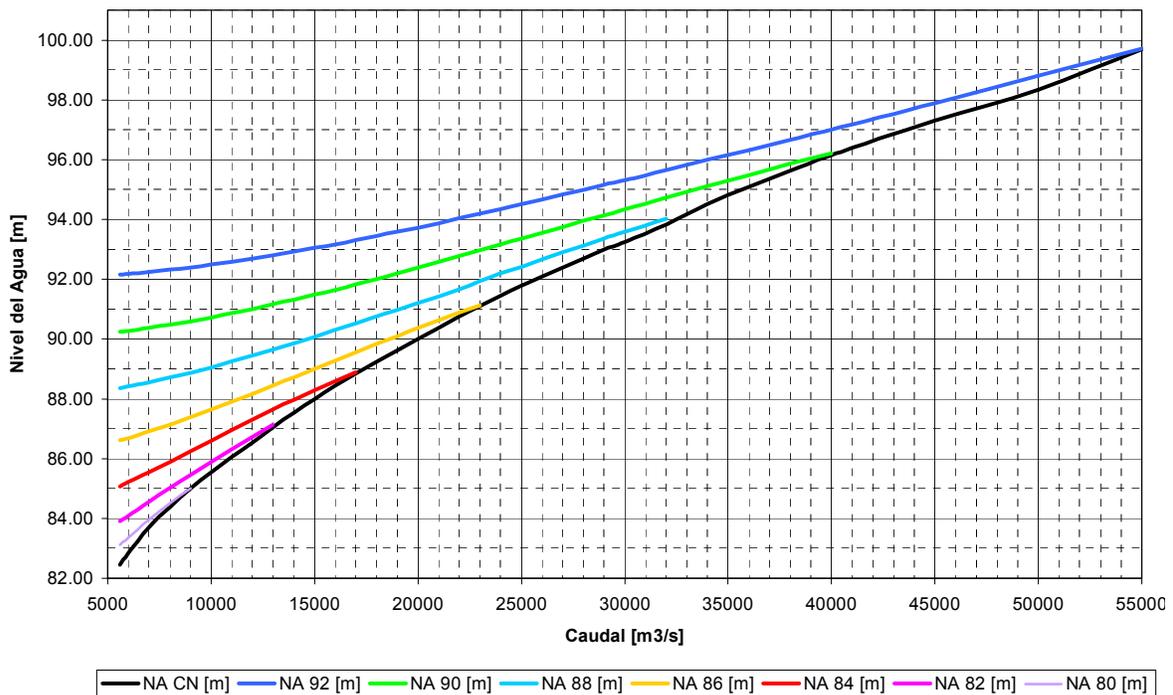
Fuente: Elaboración propia

Si una reducción del coeficiente de Manning podría justificarse debido al incremento de la profundidad de flujo relativa a la rugosidad del lecho, el valor establecido por los consultores brasileños es probablemente arbitrario. Más aún, no es posible justificar la misma reducción de n en las secciones junto a la represa, donde la profundidad de flujo aumentará en 10-20 m, que en las secciones más alejadas (como la 338), donde la profundidad aumentará solamente 1 a 2 m, según los cálculos de los propios consultores.

Las características del lecho del río Madera, predominantemente rocoso, con sedimentos en el orden de arenas finas ($d_{50}=0.2$ mm), sugieren que predomina la rugosidad de forma sobre la rugosidad del grano. La rugosidad de forma decrece al aumentar la profundidad, pero esto se ve reflejado al correr el modelo HEC-RAS con la opción “Vertical variation in n -values”, que fue la usada tanto en los estudios brasileños como en el presente estudio (ver tablas A.2.1 y A.2.2). Para una profundidad de flujo más grande, como es la situación con embalse, el modelo usa la rugosidad correspondiente a esa profundidad, que será menor a la rugosidad en condiciones naturales. Solamente se requeriría extrapolar los coeficientes de rugosidad obtenidos para condiciones naturales hacia los niveles/cotas más altos que se producirían para la situación con embalse. Esta es la opción que se eligió en el presente estudio y con la que se construyó la figura 3.14.

La figura 3.15 muestra los mismos resultados de la figura 3.14, pero disminuyendo el valor de n en 0.005 para todas las secciones del tramo Jirau-Abuná. La similitud con las curvas de Furnas-Odebrecht (figura 3.13) evidencia que la arbitraria disminución del coeficiente de rugosidad n es la principal razón de las diferencias entre las figuras 3.13 y 3.14.

Figura 3.15: Nivel de agua NA versus caudal en la sección 338, con influencia del embalse de Jirau y coeficiente n reducido en 0.005



En resumen, la respuesta a la primera pregunta planteada al inicio del subcapítulo 3.4, es que la curva guía de operación del embalse de Jirau con niveles variables, citada en la resolución ANA 555, modificará el nivel natural del agua en el tramo binacional del río Madera, para todo el rango de caudales registrados en el río.

La otra pregunta, consecuencia de la anterior, es si existe alguna otra curva de operación del embalse de Jirau que permitiría evitar ese efecto de remanso. La curva guía de la tabla 3.4 propone un nivel de operación de 82.5 m junto a la represa para el caudal medio mínimo de 5600 m³/s en septiembre. La figura 3.14 muestra que con un nivel de operación de 78.0 (de 80.0 con las curvas de la figura 3.13) ya no habría efecto de remanso en la estación de Abuná para ese caudal. Un nivel de operación de 80.0 evitaría el efecto de remanso para caudales iguales o superiores a 15000 m³/s, según la figura 3.14. Un nivel de operación de 82.0 evitaría ese efecto para caudales iguales o superiores a 23000 m³/s, un nivel de 84.0 para caudales iguales o superiores a 33000 m³/s y un nivel de 86.0 no produciría remanso para caudales iguales o superiores a 40000 m³/s.

Por tanto, es posible construir una curva de operación del embalse de Jirau, que no produzca efecto de remanso hidráulico en el tramo binacional. El problema es que la nueva curva estaría 4 a 5 metros por debajo de la curva guía de la tabla 3.4, lo que reduciría mucho la energía generada por la central hidroeléctrica. Más aún, para evitar el efecto de remanso el nivel de operación máximo normal del embalse debería limitarse a 86.0 y no a los 90.0 propuestos. Con toda probabilidad, la nueva curva haría económicamente inviable a la central hidroeléctrica de Jirau.

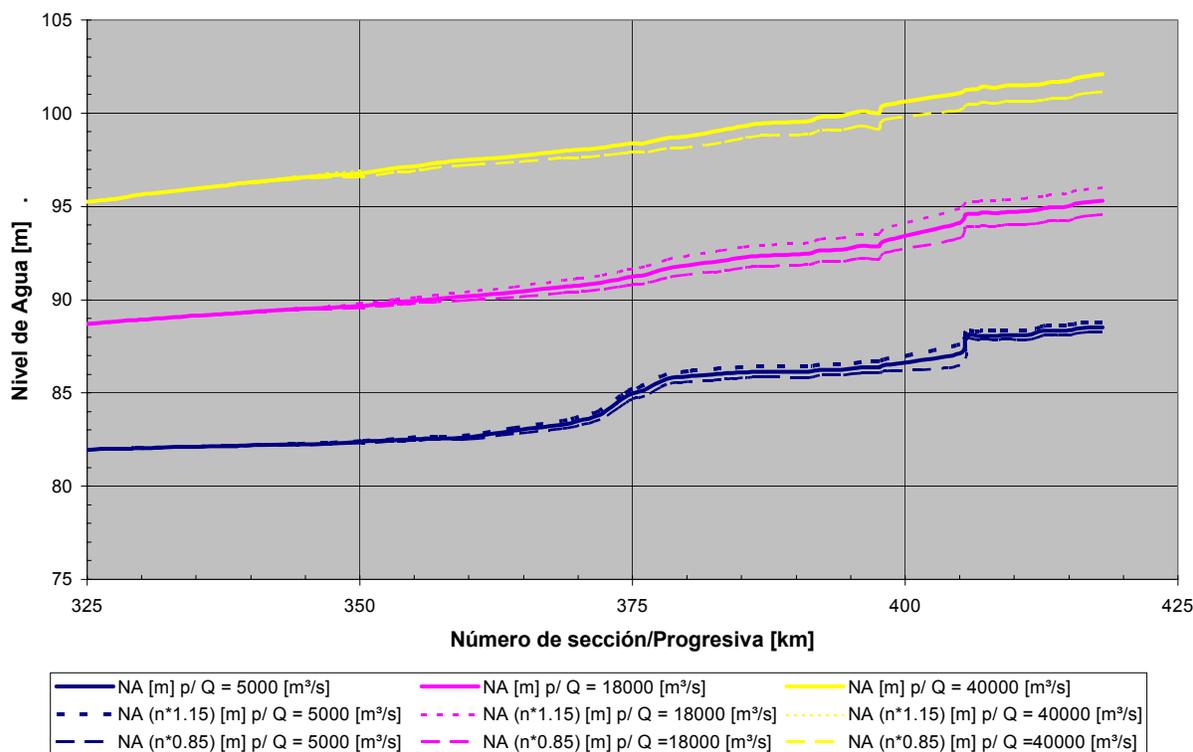
3.4.3 Análisis de sensibilidad

Generalmente el análisis de sensibilidad se realiza para uno o más de los parámetros de calibración de un modelo. Como se vio en el subcapítulo 3.2, el principal parámetro de calibración del módulo de flujo permanente de HEC-RAS es el coeficiente de rugosidad n . En un sentido amplio, el inciso 3.4.2 ya incluyó un análisis de sensibilidad preliminar, al analizar el efecto de la reducción de n sobre los niveles de agua en el tramo binacional.

La figura 3.16 muestra los perfiles hidráulicos del tramo Jiraú-Abuná-Cachuela en condiciones naturales, para una variación de $\pm 15\%$ en el coeficiente n estimado por calibración en las secciones situadas aguas arriba de la estación hidrométrica de Abuná-Vila (sección 338). Como era de esperar, los niveles de agua calculados con n modificado se alejan más del perfil original a medida que aumenta la distancia a la sección 338: en la sección 418.1 el cambio es de ± 0.7 m para el caudal de 18000 m³/s. El cambio de niveles aumenta también con el caudal, por el aumento de velocidad y por tanto de las pérdidas de energía.

No tiene mucho interés variar el coeficiente n en tramos donde la calibración se ha podido realizar para un rango amplio de caudales/perfiles. Es por eso que el análisis de sensibilidad se realizó solamente para el subtramo arriba de la sección 338, para el que solamente se dispuso de dos perfiles hasta la cachuela de Araras (sección 375).

Figura 3.16: Perfiles hidráulicos con variación del coeficiente n ($\pm 15\%$), tramo Abuná-Cachuela Madera



Un análisis de los resultados obtenidos durante el proceso de calibración mostró que el cálculo de los niveles de agua en las proximidades de las cachuelas es sensible con respecto al número y distancia entre las secciones transversales a lo largo, arriba y abajo de la cachuela. Esto está asociado a su comportamiento hidráulico (ver figura 2.8). El problema es que en general, las secciones topobatimétricas disponibles son insuficientes para describir adecuadamente ese comportamiento. Por esa razón, se realizó un análisis aumentando el número de secciones en los sectores de cachuela, usando las opciones disponibles en HEC-RAS para copiar e interpolar secciones. Se probaron varias alternativas, como por ejemplo:

- Aumentar una sección inmediatamente aguas arriba del extremo superior de la cachuela, copiando una sección aguas arriba. Este es el caso de la sección 405.5 de la cachuela Ribeirao, que es una copia de la sección 406.6.
- Colocar una sección intermedia, interpolando entre las secciones arriba y abajo de la cachuela, o copiando la más próxima.

Los resultados fueron evaluados en base a los perfiles hidráulicos medidos o al comportamiento medido o descrito en algunos informes (SENAMHI-ENDE, 2007). Como consecuencia, algunas de las secciones así creadas fueron usadas en las simulaciones, como la sección 405.5 en la cachuela de Ribeirao o la sección 211 en Jirau, que ya había sido usada en los estudios de factibilidad.

3.4.4 Conclusiones preliminares

- Los niveles de agua del río Madera y la profundidad de flujo aumentarán considerablemente en las cercanías de las dos represas, como consecuencia de los niveles de operación de los embalses. El aumento de la profundidad será particularmente grande (entre 12 y 25 m) en el embalse de Santo Antonio, debido a que este embalse operará con un nivel constante de 70 m durante todo el año.
- Desaparecerán las cachuelas situadas en el tramo de río situado dentro de los futuros embalses, incluyendo las dos cachuelas más importantes: Teotonio y Jirau.
- Las velocidades naturales de flujo se reducirán mucho cerca de las presas y en las cachuelas. El cambio más dramático es el de la cachuela de Teotonio, donde las velocidades de flujo en época de aguas bajas se reducirán a menos de 10% de su valor natural.
- El embalse de Jirau, aún sin considerar sedimentación y aplicando la curva de operación con niveles variables, afectará los niveles de agua y velocidades en el tramo binacional, entre la confluencia con el río Abuná (sección 329.2) y la cachuela Ribeirao (sección 398), y muy probablemente hasta la cachuela Madera (sección 418.1). La sobre-elevación de los niveles de agua en el tramo binacional tiene dos consecuencias directas:
 - a) Disminuye la carga hidráulica y por tanto provoca la pérdida de energía potencial del tramo binacional. Un cálculo preliminar considerando un caudal medio de 17500 m³/s en la estación de Abuná-Vila muestra que cada metro de subida del nivel de agua significa una pérdida de energía potencial bruta del orden de 170 MW. Al aplicar los niveles inducidos por el embalse de Jirau (tabla 3.4) a los caudales medios mensuales (tabla 2.2), se puede estimar que la pérdida de energía potencial en el tramo binacional está en el orden de 250 MW. La Constitución brasileña en su artículo 20, define a la energía potencial hidráulica como un “bien de la Unión”, junto con las corrientes de agua en su territorio o que provengan o sirvan de límite con un territorio extranjero, por lo que la pérdida que sufrirá Bolivia viola la propia Constitución brasileña.
 - b) Incrementará los riesgos de inundación en el tramo binacional. Esto se puede ilustrar con el caso de la Capitanía boliviana de Puerto Manoa (figura 2.11), situada frente a la estación hidrométrica de Abuná-Vila (sección 338). El desborde en Puerto Manoa se inicia con un caudal de aproximadamente 40000 m³/s. La figura 3.14, con la curva correspondiente a un nivel de operación de 90.0 m en el embalse de Jirau, muestra que el desborde se produciría con un caudal de solamente 35000 m³/s, que se presenta con más frecuencia (o que tiene una probabilidad de ocurrencia más alta).

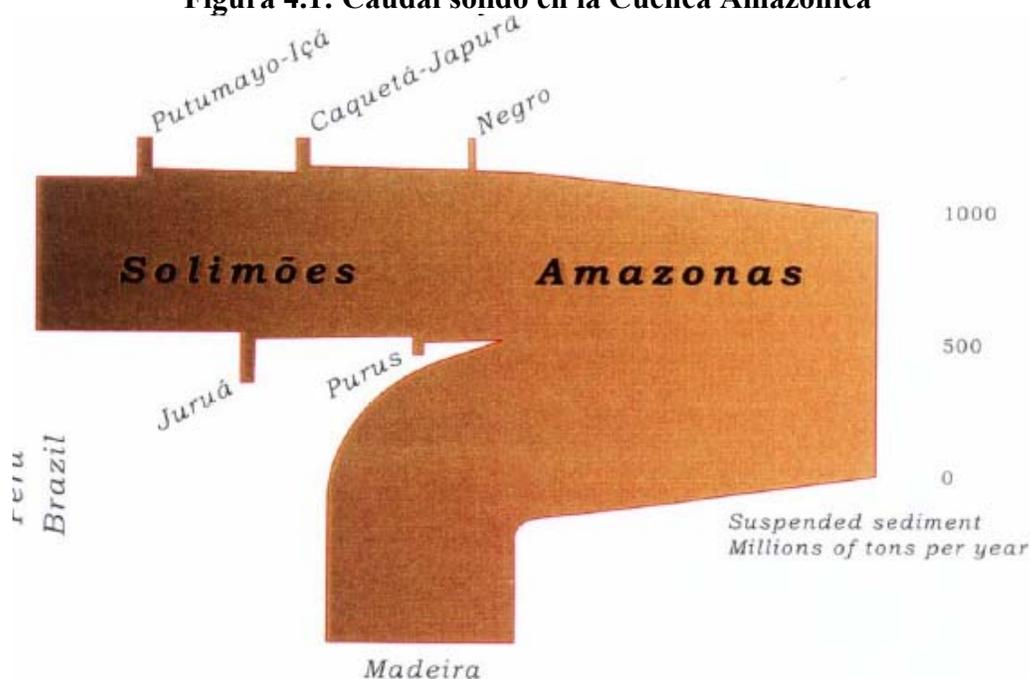
Por otro lado, la disminución de la velocidad de flujo asociada a la sobre-elevación de niveles incrementa los riesgos de sedimentación en el tramo afectado. Ese efecto será estudiado en el capítulo 5 del presente informe.

Capítulo 4

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Una evaluación de la carga y tamaño de los sedimentos transportados por el río Madera es esencial para cualquier estudio que pretenda analizar la posible deposición de sedimentos que provocarían las represas de Jirau y Santo Antonio. Esa evaluación es especialmente relevante en el presente caso, debido a que el río Madera es la fuente principal de sedimentos en suspensión y sólidos disueltos de la cuenca amazónica (figura 4.1).

Figura 4.1: Caudal sólido en la Cuenca Amazónica



Fuente: Meade, citado en Estudios de impacto ambiental, río Madeira, 2004

Para ello se realizó un análisis de los datos hidrosedimentológicos que se pudo obtener en Bolivia y Brasil. Las principales fuentes de información fueron:

- El programa HIBAM (Hidrodinámica actual de la Cuenca Amazónica, www.mpl.ird.fr/hybam) que agrupa a 5 países bajo coordinación del IRD de Francia.
- Los estudios complementarios de EIA del Complejo hidroeléctrico Madera (Furnas-Odebrecht, 2006) y las Respuestas del Gobierno brasileño (2007) al Gobierno de Bolivia.
- Los datos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Bolivia.

Se usaron principalmente (pero no exclusivamente) los datos de tres estaciones: Cachuela Esperanza sobre el río Beni, Guayaramerín sobre el Mamoré y Porto Velho sobre el Madera, intentando integrar, hasta donde fue posible, la información proveniente de las tres. Las dos primeras son bolivianas y la tercera brasileña. Estas estaciones están situadas en los extremos de arriba y abajo del tramo de estudio, como se muestra en la figura 4.2.

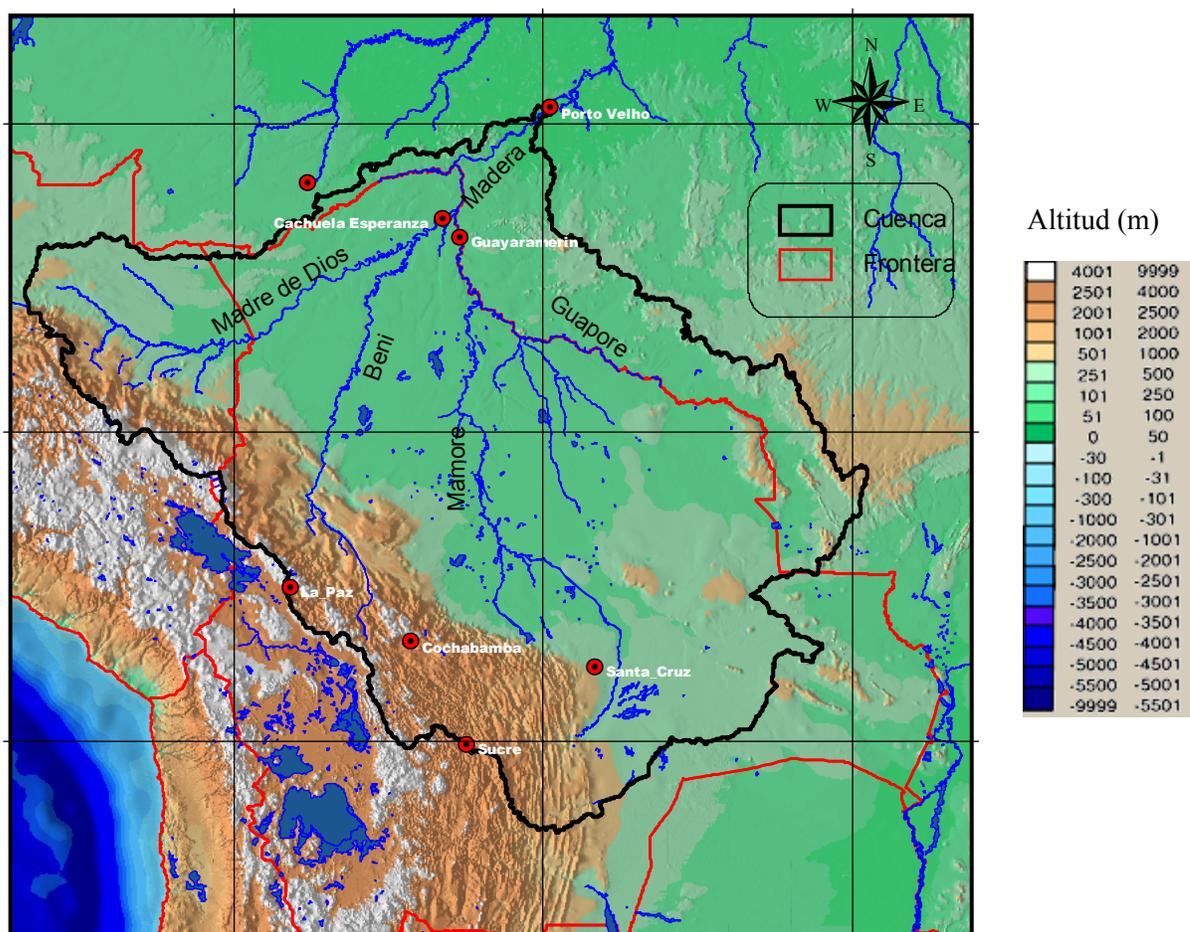
El análisis tuvo por objeto definir, de la mejor manera posible, los siguientes parámetros que requiere el modelo de simulación:

- a) Caudal sólido y su variación en el tiempo
- b) Tamaño del material del lecho del río
- c) Tamaño del material transportado

4.1 CAUDAL SÓLIDO

El río Madera es el único afluente de la margen derecha del Amazonas que nace en la cordillera de Los Andes. La figura 4.2 muestra la cuenca hasta Porto Velho, los ríos principales y algunas poblaciones, como Porto Velho, Cachuela Esperanza y Guayaramerín. Tres de los cuatro ríos principales de su cuenca (figura 4.2) nacen en esa cordillera, pero la mayor parte del sedimento proviene de uno de ellos, el río Beni (Guyot, 1992).

Figura 4.2: Relieve de la cuenca y ríos principales



Es mucho más complejo medir el caudal sólido Q_s que el caudal líquido Q . Más aún, en el caso de grandes ríos de las características del río Madera, la medición directa del transporte de fondo puede ser muy riesgosa o simplemente imposible. Bajo estas condiciones, no es extraño que las estimaciones de transporte de material sólido para un mismo río y lugar varíen mucho (Guyot, 1995). Influyen además el método de cálculo y el criterio utilizado.

La tabla 4.1 ilustra esas diferencias. Usando los mismos datos y el mismo método de cálculo, las estimaciones de Furnas-Odebrecht (2006) superan en 17.5% a las de Vauchel (2008), para el promedio anual del periodo común 1967-07 (se usó el año hidrológico septiembre-agosto). En los meses de marzo y abril la diferencia es de más del 40%.

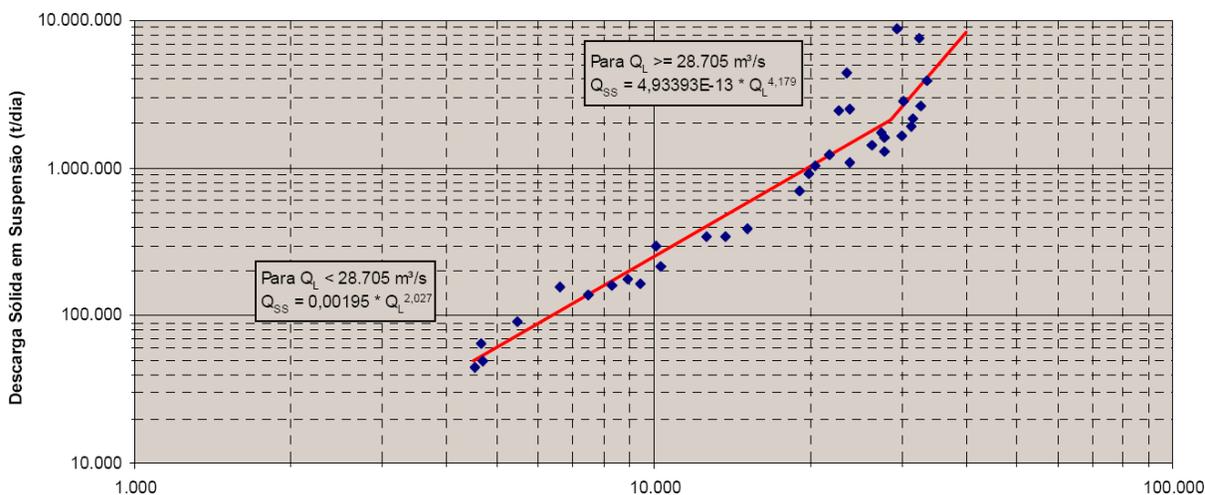
Tabla 4.1: Caudal sólido medio en suspensión (miles ton/día), río Madera en Porto Velho

Fuente	Periodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Furnas	1931-01*	1872	3022	5398	3896	1661	712	314	127	86	133	310	820	1529
Odebrecht	1967-07*	1518	3111	5517	5271	2204	862	361	128	82	124	287	708	1681
Vauchel	1967-07	1761	2885	3915	3729	2157	995	371	118	70	107	288	784	1432

*Los datos de Furnas-Odebrecht (2006) de transporte total se dividieron por un factor de 1.06 para obtener sedimentos en suspensión

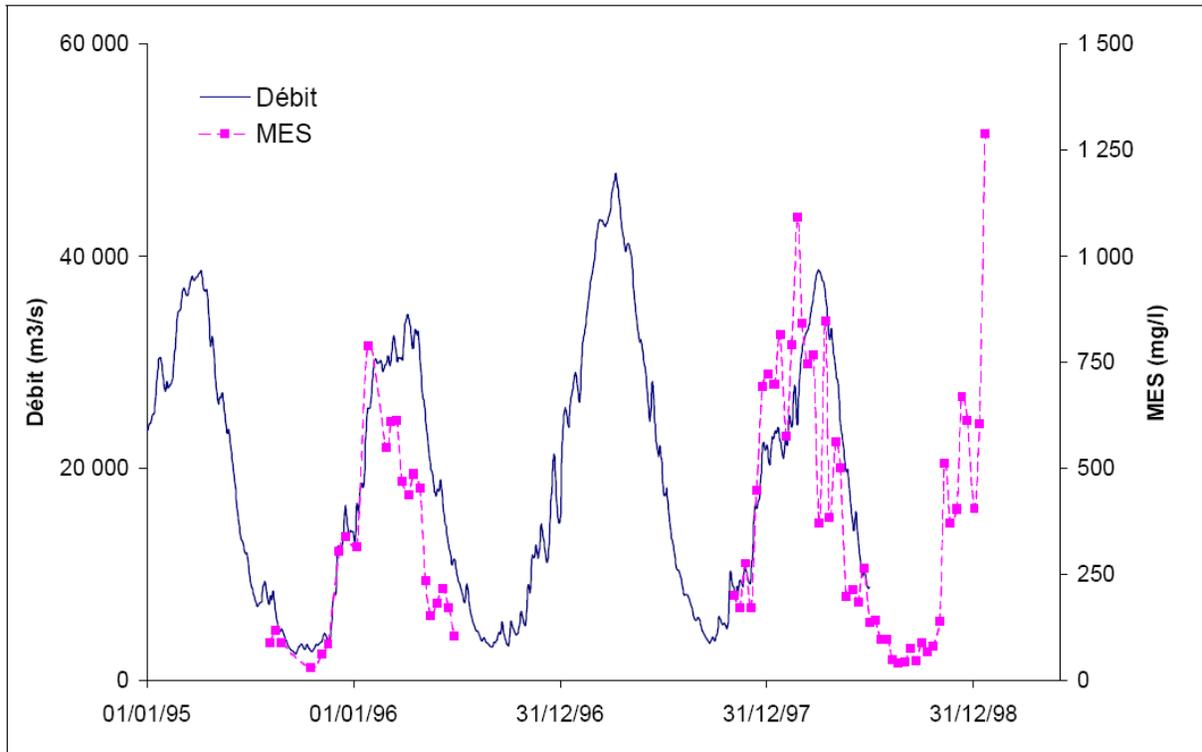
Furnas-Odebrecht (2005, 2006) usaron una relación $Q_s=f(Q)$ (Q_s =caudal sólido, Q =caudal líquido) para calcular el transporte de sedimentos del río Madera en Porto Velho. La figura 4.3 muestra esa relación, formada por dos tramos de pendiente diferente, para caudales líquidos por encima y debajo de 28705 m³/s. Esta forma de cálculo se usa con frecuencia por la falta de registros continuos de sedimentos, ya que permite extender las series de caudal sólido si se tienen series continuas y extensas de caudal líquido. Sin embargo, sus limitaciones e imprecisión han sido puestas en evidencia por varios autores. Una de esas limitaciones es que lleva a que los máximos de Q y Q_s coincidan forzosamente. Por el contrario, Guyot et al (1999a) mostraron que en el río Madera las concentraciones máximas se producen dos meses antes que el caudal máximo anual (figura 4.4).

Figura 4.3: Curva $Q_s=f(Q)$ en Porto Velho, según Furnas-Odebrecht (2004)
Curva-Chave de Sedimentos



Fuente: Furnas-Odebrecht (2005, 2006)

Figura 4.4: Variación temporal del caudal líquido (débit) y la concentración de sedimentos en suspensión (MES), río Madera en Porto Velho



Fuente: Guyot et al (1999a)

Existen otras opciones para calcular Q_s . La relación $Q_s=Q \cdot C$ (C =concentración media en la sección de flujo) puede usarse si se dispone de mediciones continuas y periódicas de C . Otra opción fue propuesta por Dunne (citado por Filizola et al, 1999): aplicar la relación $Q_s=f(Q, dQ/dt)$, donde dQ/dt es la variación de caudal con el tiempo.

Las figuras 4.5 y 4.6 muestran el caudal Q y el caudal sólido en suspensión Q_{ss} calculados por Vauchel (2008) en Cachuela Esperanza sobre el río Beni y Guayaramerín sobre el río Mamoré, para el periodo 2002-07. El cálculo se realizó con las opciones $Q_{ss}=f(Q)$ y $Q_{ss}=Q \cdot C$ para la serie de caudales diarios. Se midieron concentraciones superficiales una vez por semana y se realizaron tres aforos sólidos por año, tal como se describe más adelante.

Las figuras 4.5 y 4.6 muestran valores mensuales resultado de promediar los valores diarios. En el caso de Cachuela Esperanza, se observa que los máximos de caudal líquido y sólido coinciden, incluso si este último se calcula mediante $Q_{ss}=Q \cdot C$. La curva $Q_{ss}=f(Q)$ lleva a sobrestimar las descargas sólidas para caudales altos, lo que está muy relacionado con el hecho de que las concentraciones máximas no se producen para los caudales máximos (ver figura 4.7). En promedio el cálculo con $Q_{ss}=f(Q)$ dio valores 5% más altos que con el otro método.

En Guayaramerín el máximo (pico) de caudal sólido calculado con $Q_{ss}=Q \cdot C$ precedió en promedio dos meses al caudal líquido en cuatro de los cinco años del periodo. La excepción

notable a este comportamiento fue el año hidrológico 2004-05, que fue también un año hidrológicamente seco. Esto se debe a que las concentraciones máximas se presentan generalmente en la rama de subida del hidrograma anual. En promedio la relación $Q_{ss}=f(Q)$ dio valores 12.5% inferiores a los estimados por el método $Q_{ss}=Q \cdot C$.

Figura 4.5: Caudal Q(m³/s) y caudal sólido en suspensión (ton/s), río Beni en Cachuela Esperanza

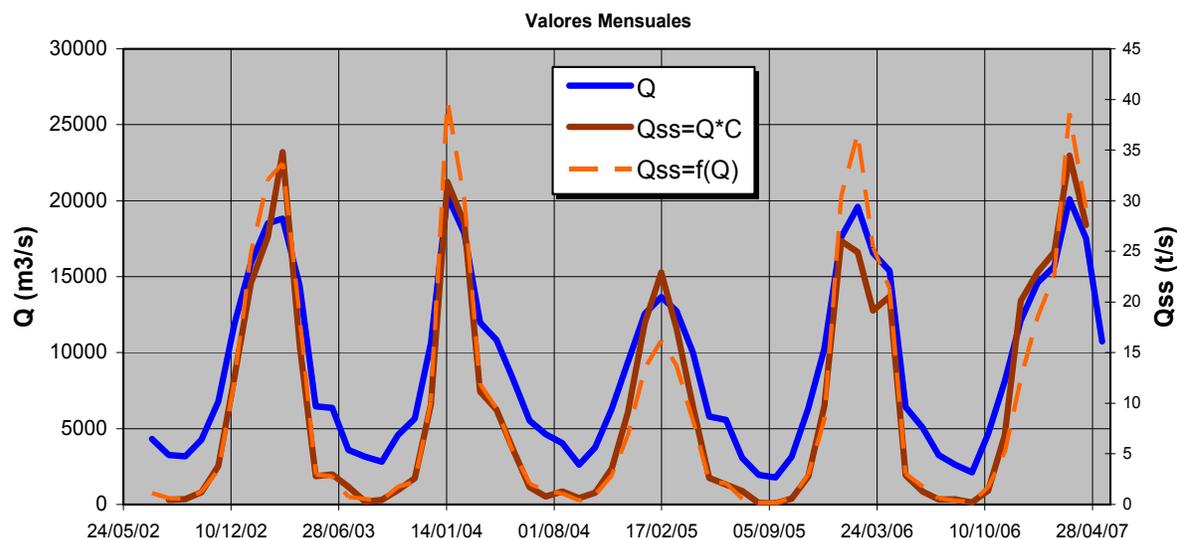
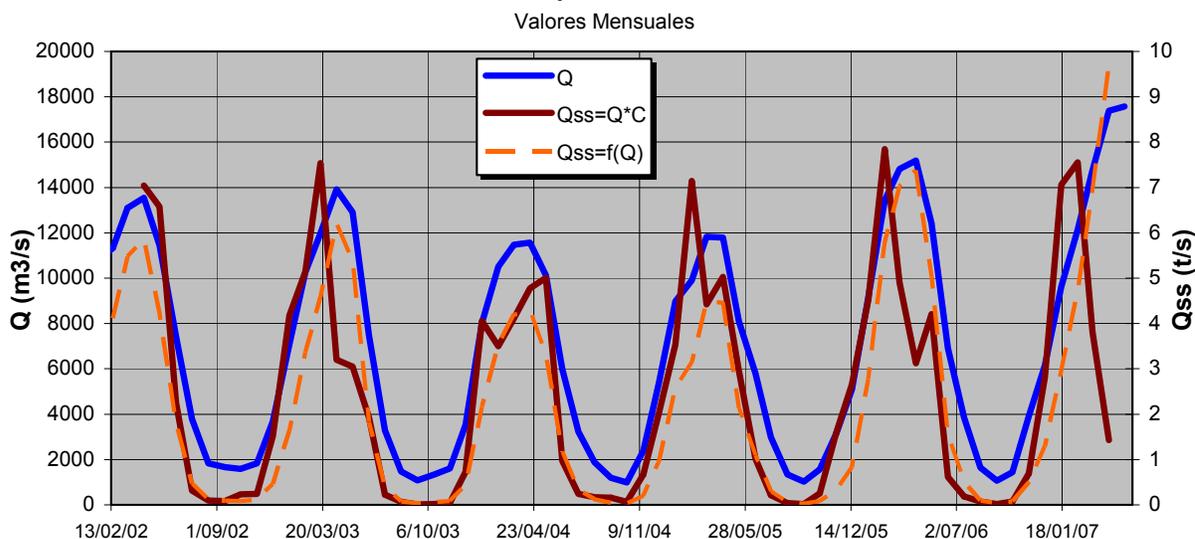


Figura 4.6: Caudal Q(m³/s) y caudal sólido en suspensión (ton/s), río Mamoré en Guayaramerín

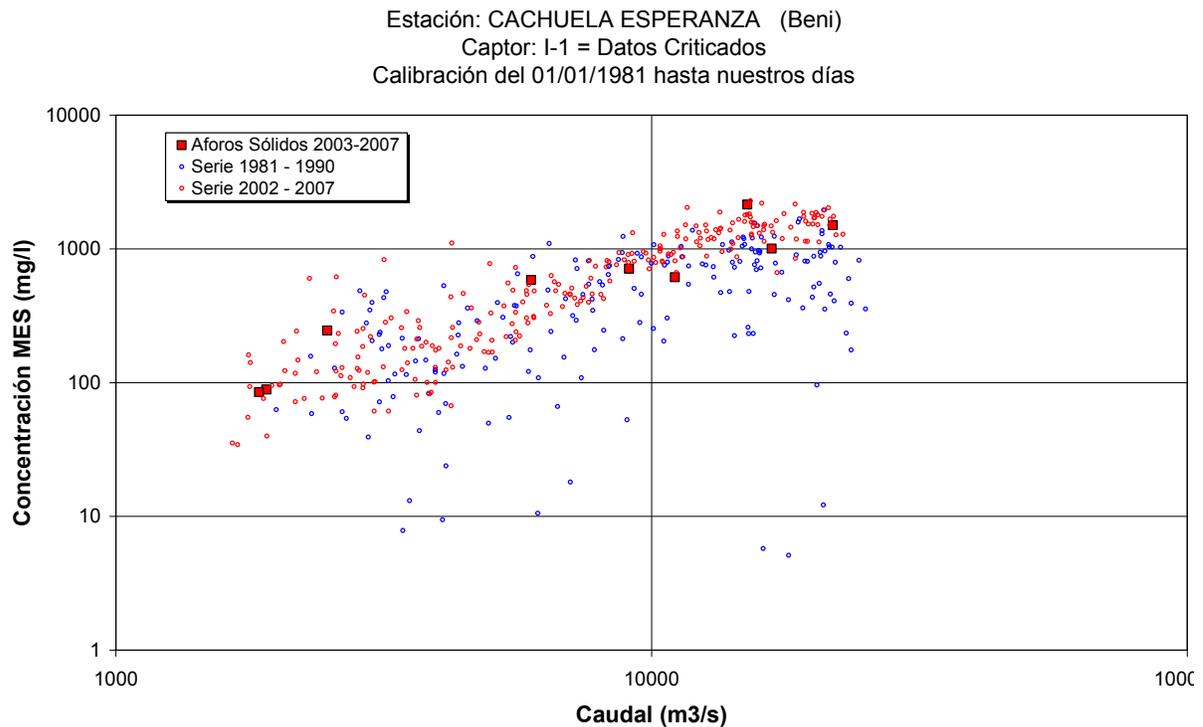


Fuente: Vauchel (2008)

La figura 4.7 muestra la concentración de sedimentos en suspensión (MES) en función del caudal Q en Cachuela Esperanza. La serie de MES 2002-2007 y los aforos sólidos del mismo periodo forman una nube de puntos bastante homogénea, pero los valores de MES de 1981-1990 son más dispersos y tienden a ubicarse por debajo de la serie anterior. Vauchel (2008) pone en duda la validez de la serie antigua 1981-90, sin poder establecer claramente la causa

de esas diferencias. Los datos de concentración C y los aforos sólidos del periodo 2002-07 (en color rojo en la figura 4.7) sugieren que la concentración permanece constante o decrece ligeramente a partir de un cierto valor del caudal Q . Este tendencia es aún más marcada en Guayaramerín, donde la concentración parece incluso disminuir a partir de un cierto Q .

Figura 4.7: Concentración media en la sección (MES) según caudal, río Beni en Cachuela Esperanza



Fuente: Vauchel (2008)

La estimación de la concentración media en la sección C introduce otra fuente de incertidumbre. Con frecuencia C debe ser estimada de valores puntuales medidos en la superficie, ya sea en el centro del río o en una orilla. Para convertir estos valores de superficie a valores de C se requieren de aforos sólidos que, por el esfuerzo y tiempo que requieren, son mucho menos frecuentes. En los aforos sólidos se mide la concentración en varias verticales ubicadas sobre todo el ancho de la sección. Se grafica la concentración media así obtenida frente a la concentración de superficie, buscando establecer una relación aceptable. Si esa relación existe, se la puede usar para convertir los valores de superficie a concentraciones medias en la sección. Si no es así, solamente podrían utilizarse los aforos sólidos.

4.1.1 Caudal sólido en suspensión

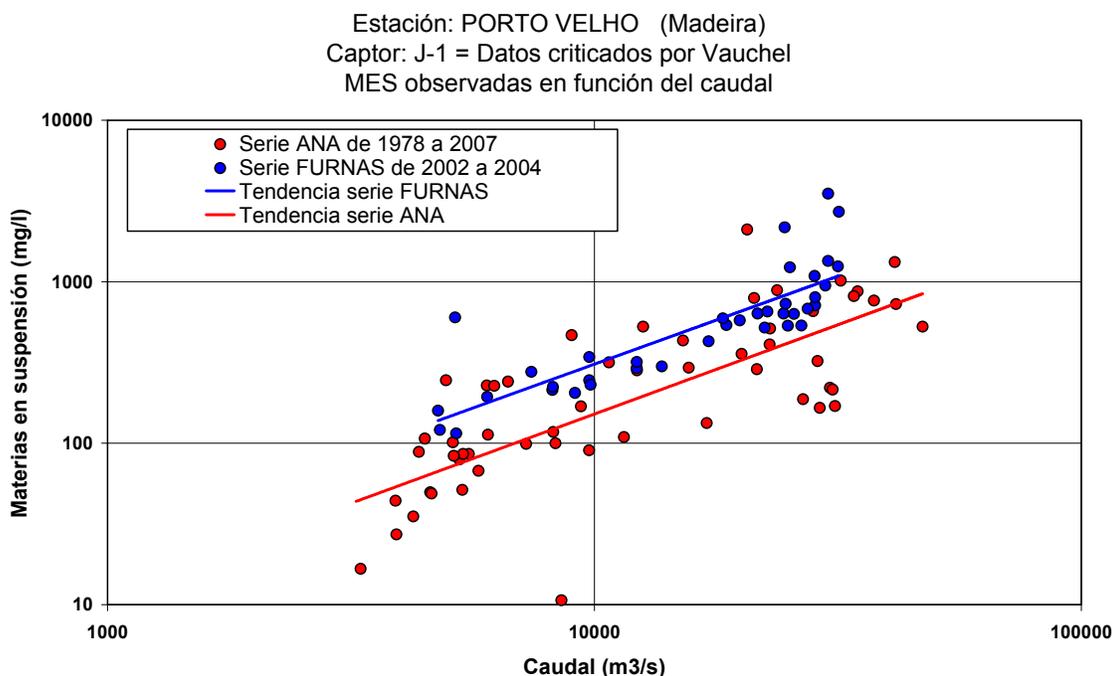
La falta de registros continuos en número y frecuencia suficientes en Porto Velho, obligó a usar el método $Q_{ss}=f(Q)$ como primera opción. En Porto Velho se dispuso de dos series de datos de concentración C (materias en suspensión). La primera serie fue obtenida de la base de datos de la ANA en HIDROWEB. Tiene 106 valores de concentración de 1978 a 2007. No está claro si todos esos datos corresponden a valores medios en la sección. La única referencia

de los estudios de EIA (2005) es que las mediciones de descarga sólida fueron realizadas y procesadas en conformidad con las normas de la DNAEE (1970) y la OMM y con la Guía de Prácticas Sedimentométricas.

La segunda serie proviene de los estudios sobre el complejo hidroeléctrico del Río Madeira (Furnas-Odebrecht, 2005). Comprende 3 valores en el 2002, 1 valor en el 2003 y 34 valores en el 2004. No se tuvo acceso a los datos mencionados en la tabla 3.10 de los Estudios complementarios (2006), que menciona un número de muestras mucho más grande.

La figura 4.8 muestra las dos series de C en función del caudal líquido Q y las respectivas curvas de tendencia. La curva de tendencia de la serie FURNAS se ubica significativamente por encima de la serie ANA. Más aún, los datos ANA parecen indicar que a partir de un cierto valor de caudal, la concentración no aumenta, lo que está en correspondencia con los registros de las estaciones bolivianas de Cachuela Esperanza y Guayaramerín (figura 4.7). La serie FURNAS incluye algunos valores de C muy altos para caudales del orden de 25000 a 30000 m³/s. La concentración más alta, de 3500 mg/l (ver tabla A.3.1 del Anexo 1), corresponde a un caudal de 29350 m³/s registrado el 16/02/2004, durante la subida del hidrograma anual.

Figura 4.8: Concentración de sedimentos en suspensión en Porto Velho



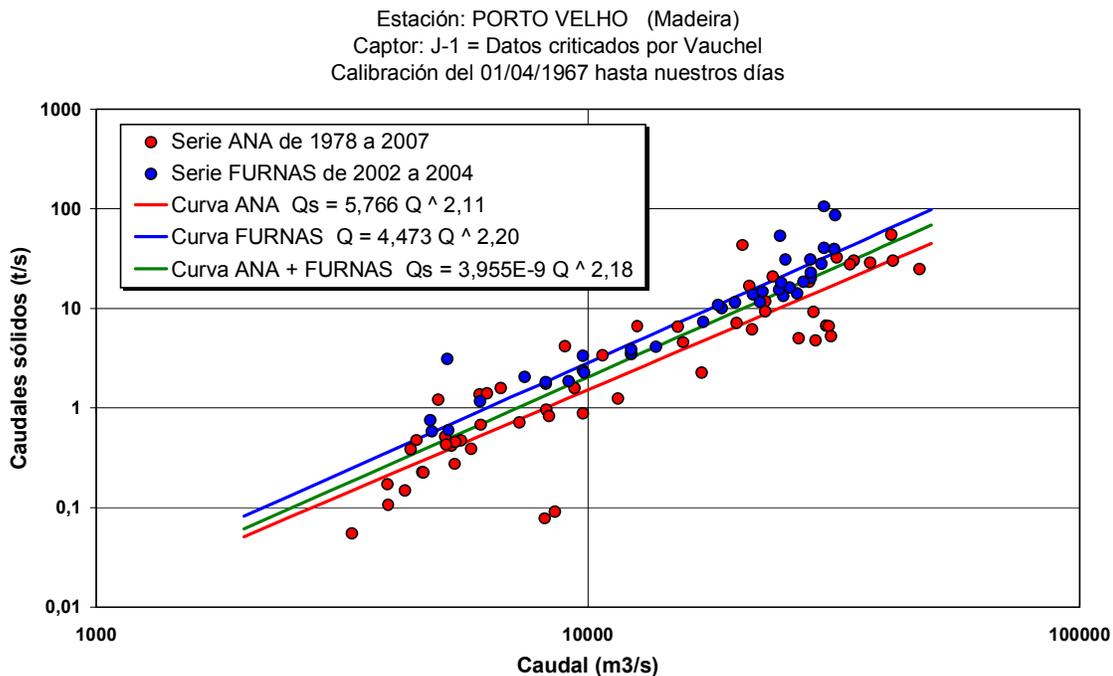
Fuente: Vauchel (2008)

Los datos presentados hasta aquí y las conclusiones de varios especialistas indican que la curva $Q_s=f(Q)$ utilizada por FURNAS (figura 4.3) para estimar las series de caudal sólido no tiene sustento técnico. Para aplicar una relación $Q_s=f(Q)$ con un exponente superior a 4 se requiere disponer de un gran número de registros confiables. Intentar establecer una relación de ese tipo con solamente algunos puntos (que no corresponden a caudales altos), significa atribuir una validez general a datos que no tienen valor estadístico. Más aún, los datos de la ANA, así como los de las estaciones bolivianas de Cachuela Esperanza y Guayaramerín

(figuras 4.5, 4.6 y 4.7), muestran una tendencia inversa: la concentración parece disminuir para los caudales más altos. Esto se traduce en que la pendiente de la función $Q_s=f(Q)$, que en gráficos en escala logarítmica representa el exponente de la función, disminuye para caudales altos. Es decir que la extrapolación de FURNAS va en contra de la tendencia estadística de las series y sobre lo que se conoce sobre el transporte de sedimentos en el río Madera.

La figura 4.9 muestra el caudal sólido en suspensión Q_{ss} calculado con los registros de concentración C de la figura 4.8. Se muestran también tres curvas de tendencia del caudal sólido en función del caudal líquido Q : una para la serie ANA, una para la serie FURNAS, y una intermedia que combina los datos de ANA y FURNAS.

Figura 4.9: Caudal sólido en suspensión y caudal líquido en Porto Velho



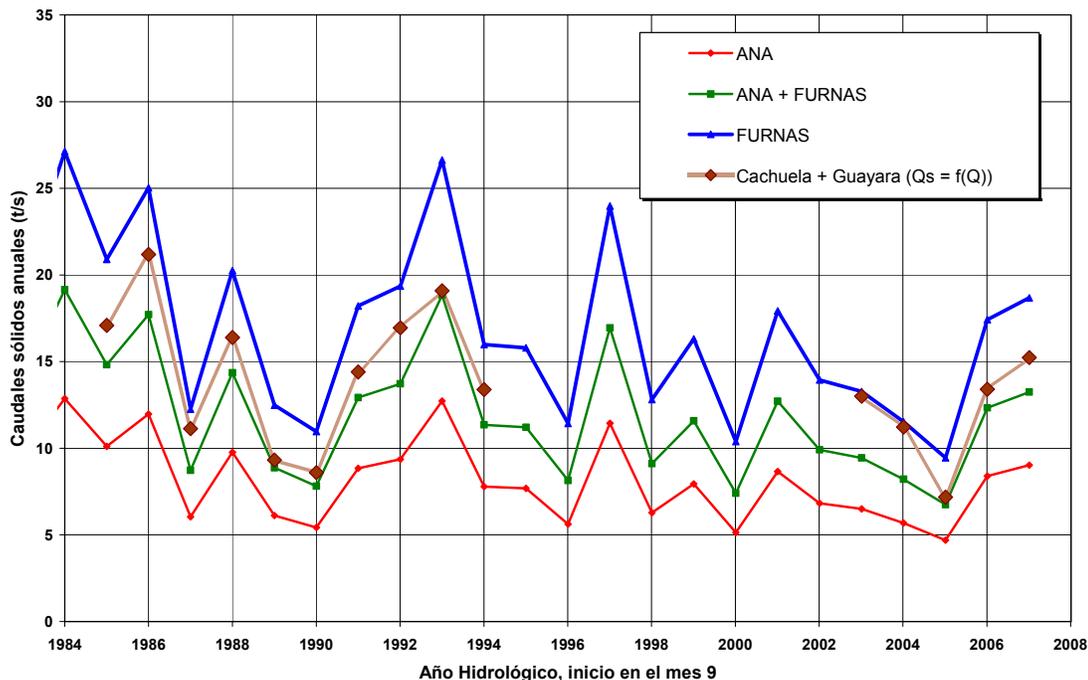
Fuente: Vauchel (2008)

Para evaluar las tres curvas de la figura 4.9, se calcularon los caudales sólidos en suspensión en las estaciones de Cachuela Esperanza y Guayaramerín, también mediante relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ establecidas con los registros del periodo 2002-2007. La figura 4.10 muestra los caudales sólidos anuales obtenidos para Porto Velho con las 3 curvas de calibración y con la suma de los caudales anuales de Cachuela Esperanza más Guayaramerín, sobre el periodo común de funcionamiento. La suma de Cachuela Esperanza más Guayaramerín está comprendida entre las curvas FURNAS y ANA + FURNAS, acercándose un poco más a esta última que a la primera.

La serie calculada únicamente a partir de las concentraciones del banco de datos de la ANA tiende a subestimar los caudales sólidos. El estudio de factibilidad (Furnas-Odebrecht, 2004) menciona diferencias de metodología, sin describir la metodología empleada por la ANA. Se debe destacar que el uso de los datos de concentración del periodo 1981-90 en Cachuela Esperanza y Guayaramerín también lleva a calcular caudales sólidos Q_{ss} muy inferiores a los

calculados con una curva $Q_s=f(Q)$ establecida sobre el periodo 2002-07. Vauchel (2008) considera probable que la causa de esas diferencias sea las diferencias en los métodos de muestreo y de aforo de caudales sólidos. ¿Es esta también la razón de las diferencias entre los muestreos de la ANA y de FURNAS?

Figura 4.10: Comparación de los caudales sólidos anuales en Porto Velho y la suma de las estaciones de Cachuela Esperanza y Guayaramerín



Fuente: Vauchel (2008)

Para evitar el riesgo de subestimar los caudales sólidos en Porto Velho, se decidió usar la relación $Q_{ss}=4.473*Q^{2.20}$ (Q en m³/s, Q_{ss} en ton/s) establecida a partir de los muestreos de FURNAS. Para caudales altos, esta curva da resultados netamente inferiores a los estimados por Furnas-Odebrecht (2004) con la curva de la figura 4.3. Las diferencias a nivel mensual y anual se mostraron en la tabla 4.1.

La relativa imprecisión de una relación $Q_s=f(Q)$ fue puesta en evidencia por Filizola et al (1999) usando los registros de la estación de Fazenda Alegre, situada en el curso inferior del río Madera cerca de la confluencia con el río Amazonas. El caudal sólido estimado con la relación $Q_{ss}=f(Q)$ era muy similar al calculado con la relación $Q_{ss}=Q*C$. En cambio, la relación $Q_{ss}=f(Q, dQ/dt)$ llevó a estimar un caudal sólido 50% más grande que el estimado con los otros dos métodos. Esta relación generalmente describe mejor la variación temporal de Q_s , incluyendo el desfase observado entre los máximos anuales de caudal sólido y líquido. Por tanto, su aplicación se justifica si se dispone de los datos necesarios.

En resumen, se generó una serie de caudales sólidos en suspensión con una relación $Q_{ss}=f(Q)$, que dio valores inferiores a la relación de Furnas-Odebrecht (2005). Se realizó una evaluación

preliminar del grado de incertidumbre de los datos, que permitirá definir más adelante las condiciones del análisis de sensibilidad/incertidumbre del modelo.

4.1.2 Transporte de fondo y caudal sólido total

Existe muy poca información que permita evaluar el transporte de fondo. El Anexo 3 muestra los datos de Furnas-Odebrecht (2006), sintetizados en la tabla A.3.1 que muestra mediciones de caudal sólido en suspensión Q_{ss} y estimaciones del caudal sólido total Q_{st} , así como la relación Q_{ss}/Q_{st} . El promedio de Q_{st}/Q_{ss} para los datos de la tabla es de 1.06, lo que equivale a decir que el transporte de fondo representa un 6% del caudal sólido en suspensión. Este valor fue usado por Furnas-Odebrecht para calcular las series de caudal sólido total. Como no se dispuso de más datos, se usó el mismo valor en el presente estudio. Como consecuencia, el caudal sólido total se calculó con la relación $Q_{st}=1.06*4.473*Q^{2.20}$ (Q en m³/s, Q_{st} en ton/s). La serie resultante de aplicar a los caudales diarios (la tabla 2.2 muestra Q mensuales) de Porto Velho, en miles ton/día, se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Serie de caudal sólido total (miles ton/día) en Porto Velho

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
1967				1722	778	377	115	66	34	39	151	259	
1968	503	1663	3065	1896	529	124	56	33	60	60	136	408	711
1969	1418	1822	1818	1697	665	381	158	49	32	35	119	515	726
1970	753	1413	2267	2250	1559	811	259	77	58	57	99	313	826
1971	1138	2810	3480	2335	1014	307	159	55	45	111	211	611	1023
1972	1105	2134	3452	3450	1494	733	209	151	255	282	275	1094	1219
1973	1669	3204	4297	3970	2182	1185	463	200	114	121	444	1161	1584
1974	2451	3681	5669	4074	2653	1137	396	147	72	95	322	555	1771
1975	1480	3107	4339	3764	1900	828	450	115	55	142	192	912	1440
1976	2301	4057	4849	4023	2251	965	239	65	46	52	171	453	1623
1977	1950	2700	5140	4147	2650	1080	395	139	80	137	503	1102	1669
1978	2286	3491	5161	3712	1978	930	432	89	30	49	164	1337	1638
1979	2867	4126	4680	5534	3662	1435	369	100	63	64	125	341	1947
1980	1239	2164	3811	4019	2486	1570	521	163	131	177	207	408	1408
1981	1057	2631	4152	4147	2698	1747	412	90	49	139	434	1268	1569
1982	3481	4449	6055	7308	4892	2407	1122	313	113	418	1003	1567	2761
1983	2042	3067	3961	3106	2956	1845	1317	495	87	75	190	472	1634
1984	2319	4216	6023	7960	5355	2292	787	165	69	82	699	1334	2608
1985	2780	3782	3967	4119	3662	1762	592	265	115	165	426	765	1867
1986	2051	4093	5986	6750	3879	2291	880	302	188	241	175	898	2311
1987	2230	3226	2584	1790	1525	532	159	67	31	63	276	1599	1173
1988	2314	3410	4028	5357	3226	1518	451	81	25	31	64	234	1728
1989	1425	2658	3361	3169	1871	657	277	75	70	49	84	284	1165
1990	1385	2548	2718	1916	1547	1031	439	93	54	119	647	1128	1135
1991	2433	3813	4291	3849	2141	1208	391	121	38	60	204	653	1600
1992	2023	2299	4783	4401	3433	1879	1238	270	408	639	639	1598	1968
1993	3068	5120	6239	6510	3583	1268	307	122	101	95	419	1129	2330
1994	1984	3471	3738	3760	2142	644	181	71	22	59	486	781	1445
1995	2154	2738	4350	3997	1899	647	199	126	30	30	75	526	1398
1996	1123	2624	2873	3236	1329	573	190	49	50	80	373	714	1101
1997	1946	3515	6446	7111	3819	1700	575	164	58	119	248	892	2216

1998	1409	1843	3662	3842	1472	415	135	49	43	102	544	1341	1238
1999	2301	3784	3846	3624	1579	593	284	70	31	41	88	563	1400
2000	1112	2100	3159	2464	1096	536	200	74	98	46	256	726	989
2001	1897	3515	5644	4200	2109	962	294	108	45	73	360	838	1670
2002	1643	2549	4184	2931	1672	823	217	78	49	85	196	687	1260
2003	1517	2753	3502	3542	1500	659	180	59	33	100	141	552	1212
2004	2366	2880	2333	2239	1309	496	200	98	40	53	208	654	1073
2005	1407	1899	2748	2131	753	421	123	27	13	41	194	660	868
2006	2157	4343	4801	4641	1717	548	197	58	26	89	396	945	1660
2007	1895	2634	4519	5160	3289	1260	294	114	28	63	398	1244	1741
2008	2405	4457	5218	6273									
Media	1859	3036	4123	3903	2276	1063	401	127	76	115	300	818	1508

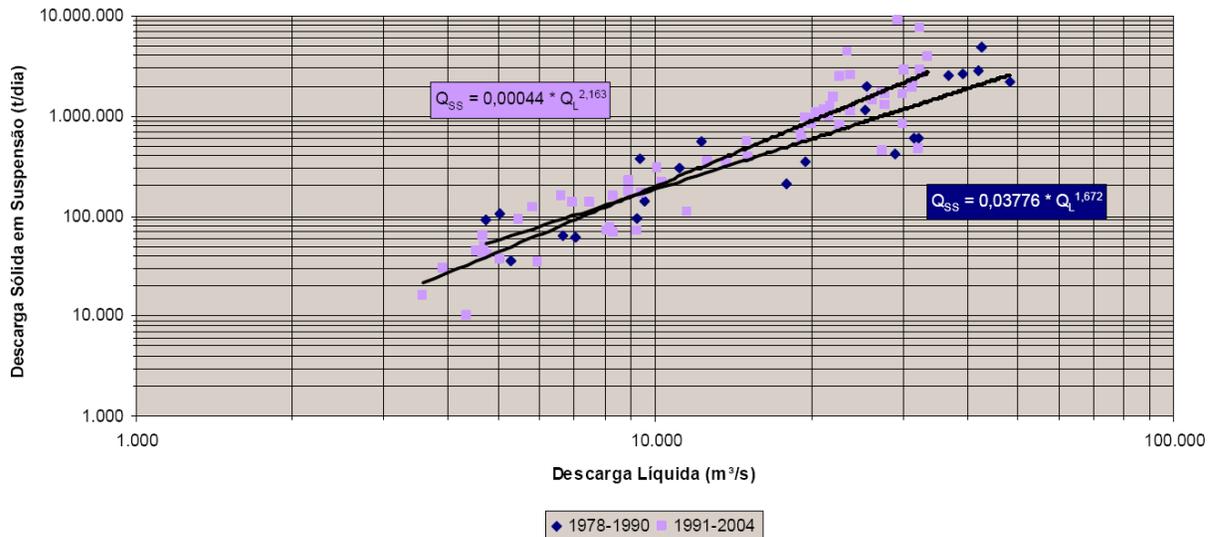
Fuente: Vauchel (2008)

4.1.3 Tendencia de las series de caudal sólido

Los estudios sedimentológicos que forman parte del EIA (Furnas-Odebrecht, 2005) hallaron una tasa de aumento con el tiempo del transporte de sedimentos en el río Madera, atribuida a la acción antrópica en la cuenca. Debido al importante efecto que tiene ese hallazgo en los resultados de la modelación, se analizará el tema en este subcapítulo.

Los autores de esos estudios separaron las mediciones en Porto Velho en dos grupos: el primero con los datos de 1978 a 1990 (en color violeta en la figura 4.11) y el segundo con los datos de 1991 a 2004 (en azul). El primer grupo está formado exclusivamente por datos del banco de datos de la ANA, mientras que el segundo incluye datos más recientes de FURNAS. Estos dos grupos dieron origen a dos relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ diferentes, que se muestran en la figura 4.11. La relación en color violeta tiene una pendiente más grande que la otra, por lo que predice caudales sólidos más altos.

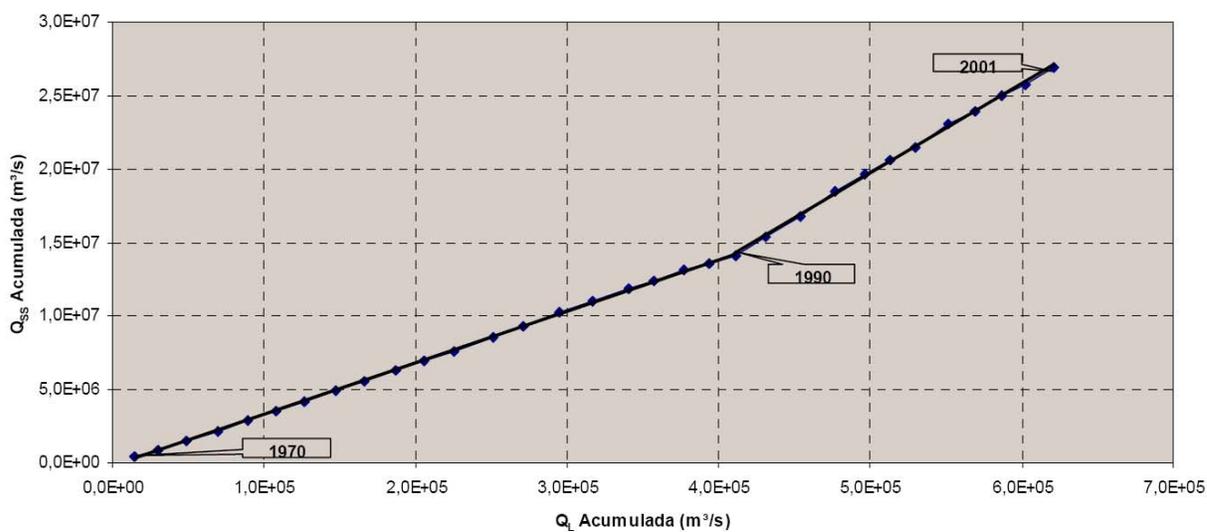
Figura 4.11: Relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ en Porto Velho, según Furnas



Fuente: Furnas-Odebrecht (2005, 2006)

Usando esas dos relaciones, los consultores calcularon series de caudal sólido Q_{ss} en Porto Velho para el periodo 1970-2001 y con esas series se construyó una curva doble acumulada de caudales sólidos y líquidos, que se muestra en la figura 4.12. Esta curva muestra un quiebre a partir del año 1990, que indicaría un aumento de la producción de sedimentos de la cuenca que son transportados por el río Madera. La tasa media anual de aumento fue estimada en 1.83% a partir de 1991, por lo que fue “adoptado conservadoramente un valor de 2%”.

Figura 4.12: Curva de doble masa del río Madera en Porto Velho, según Furnas



Fuente: Furnas-Odebrecht (2005, 2006)

¿Puede atribuirse ese aparente cambio a la acción del hombre en la cuenca, que estaría provocando un aumento de la tasa de erosión? La respuesta inicial de los consultores brasileños fue otra: “*As medições realizadas por FURNAS na campanha mais recente de medição apresentaram valores de concentração superiores ao restante para uma mesma faixa de descarga líquida. Como já exposto no item 7.11.2.1, isto se deve principalmente a diferença de metodologia de amostragem utilizada na campanha*” (Estúdio de viabilidade AHE Jirau, p. 151).

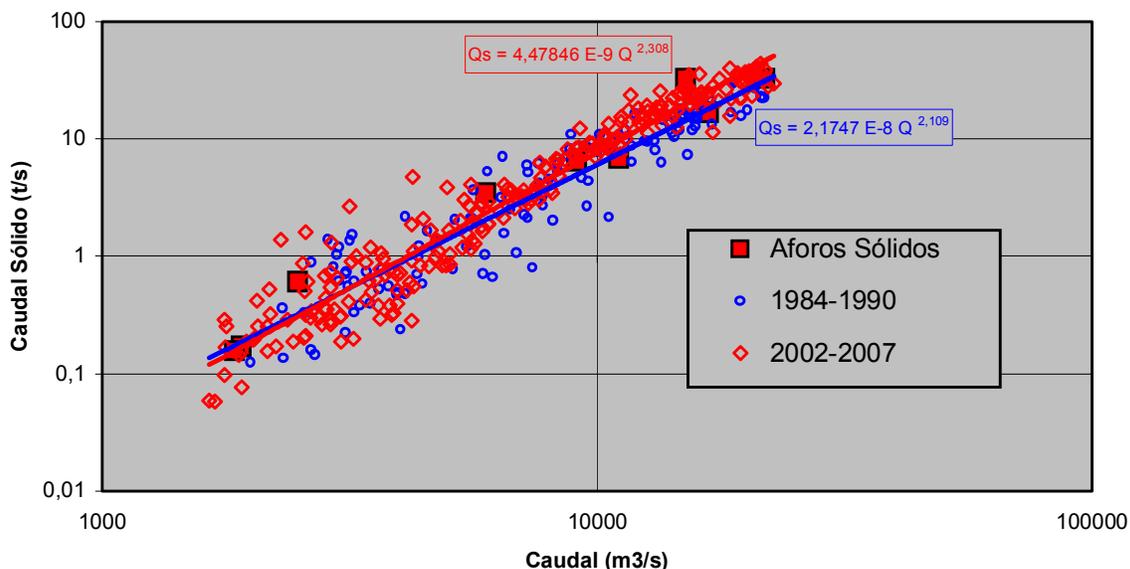
Lo que se observa en primer lugar es que la metodología empleada es muy cuestionable, ya que mezcla las series de concentraciones obtenidas por la ANA durante el periodo 1978-2005, con las concentraciones obtenidas por FURNAS durante sus campañas del 2002-2003 y sobre todo del 2004, para luego sacar conclusiones sobre una tendencia a largo plazo. La inclusión de los valores más altos de FURNAS tiende a elevar la pendiente de la curva de calibración del periodo 1991-2004 y por tanto, a mostrar un aumento de los caudales sólidos en el periodo reciente. Finalmente, el cálculo de la tendencia está basado en las relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ y no en las mediciones, lo que debilita aún más una conclusión.

Si bien la metodología es cuestionable, ¿existen otros argumentos que sustenten la hipótesis de un aumento de los caudales sólidos con el curso del tiempo? Los datos de las estaciones bolivianas de Cachuela Esperanza y Guayaramerín, que se muestran en las figuras 4.13 y 4.14, parecen sustentarla. Se observa que la curva del periodo 2002-2007 tiene una pendiente una

pendiente ligeramente más fuerte que la de 1984-1990 en Cachuela Esperanza y marcadamente más fuerte en Guayaramerín. No hubo mediciones de caudal sólido en el periodo 1991-2001. En los dos casos es difícil saber si se debe a un cambio del método de muestreo y de cálculo entre los dos periodos (que si existió) o a un aumento efectivo de las concentraciones en el periodo 2002-07 para caudal igual.

Figura 4.13: Relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ en Cachuela Esperanza

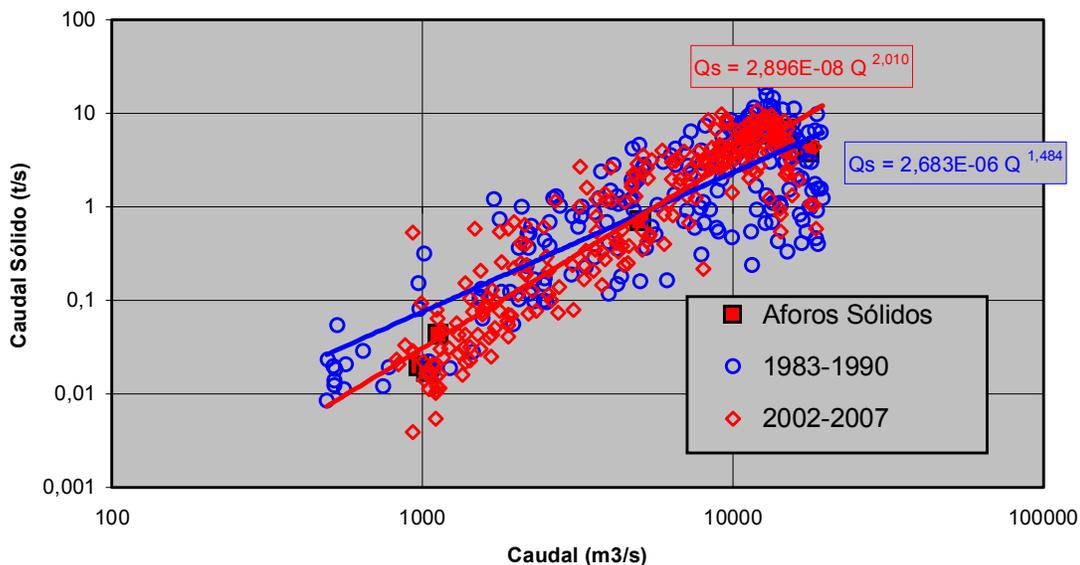
Estación: CACHUELA ESPERANZA (Río Beni)
Curvas $Q_s = f(Q)$ para 1984-1990 y 2002-2007



Fuente: Vauchel (2008)

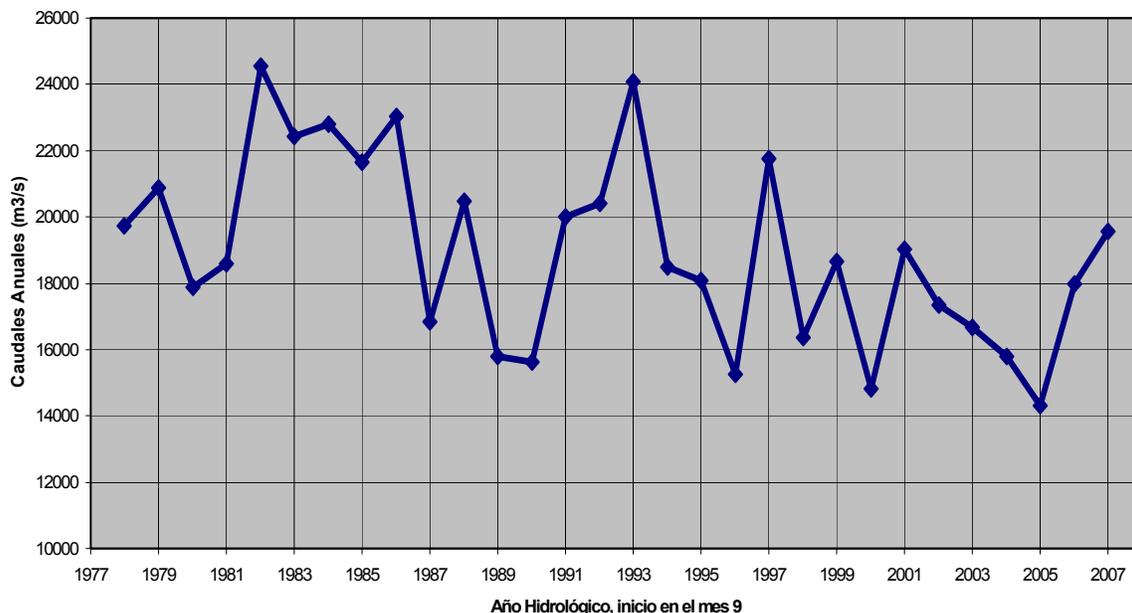
Figura 4.14: Relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ en Guayaramerín

Estación: GUAYARA MERIN (Río Mamoré)
Curvas $Q_s = f(Q)$ para 1983-1990 y 2002-2007



La figura 4.15 muestra los caudales líquidos medios anuales en Porto Velho durante el periodo 1978-2007. Se observa una clara tendencia al decrecimiento. En particular, en el periodo 1998-2007 se presentaron caudales bajos. Esto llevaría a pensar que las concentraciones aumentaron en años recientes: para caudales iguales, son más altas que las del periodo 1978-1990. Sin embargo, debe recordarse que las concentraciones tienden a disminuir para los caudales más altos tanto en el río Beni como en el Mamoré, especialmente este último.

Figura 4.15: Caudales medios anuales en Porto Velho, 1978-2007



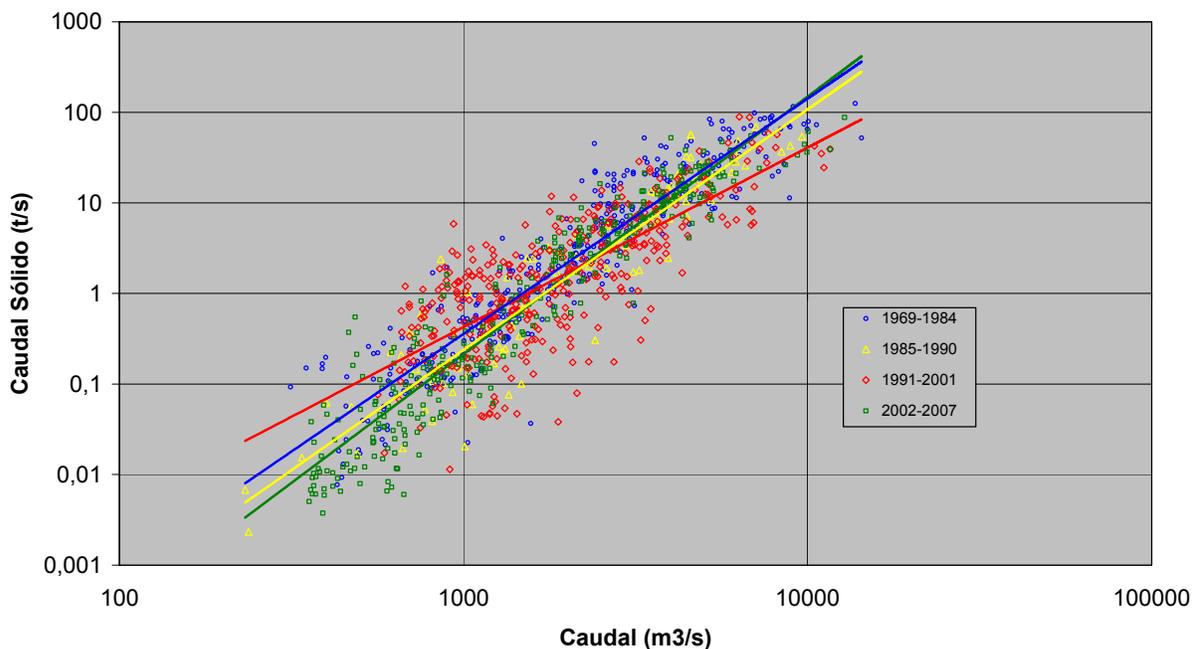
Fuente: Vauchel (2008)

¿Qué pasó en la parte andina de la cuenca, de donde se supone que viene casi todo el sedimento? La figura 4.16 muestra más de 1400 mediciones de caudal sólido en Rurrenabaque, donde el río Beni sale de Los Andes e ingresa a la llanura amazónica. Los datos están agrupados según cuatro periodos distintos, cada uno correspondientes a diferentes estudios, con métodos de muestreo y cálculo que variaron ligeramente: 1969 a 1984, 1985 a 1990, 1991 a 2001 y 2002 a 2007. La curva 1969-1984 (azul) está ligeramente por encima de las curvas 1985-1990 (amarillo) y 2002-2007 (verde) que son casi iguales. La curva 1991-2001 (roja) tiene una pendiente marcadamente inferior a las demás curvas, con mediciones que presentan más dispersión que las otras y tiene pocas mediciones de aguas bajas.

En Puerto Villarroel, sobre el río Ichilo (uno de los dos ríos que da origen al Mamoré) y al pie de Los Andes, se tienen 94 valores de concentración en superficie antes de 1990 y 270 valores después de 2002. Como se quiere evaluar tendencias, se usaron directamente esos valores, sin convertirlos a concentraciones medias en la sección. La figura 4.17 muestra que en Puerto Villarroel, la curva del periodo 1986-1990 se ubica ligeramente por encima de la curva 2002-07, especialmente en aguas bajas.

Figura 4.16: Relaciones caudal líquido –caudal sólido en Rurrenabaque

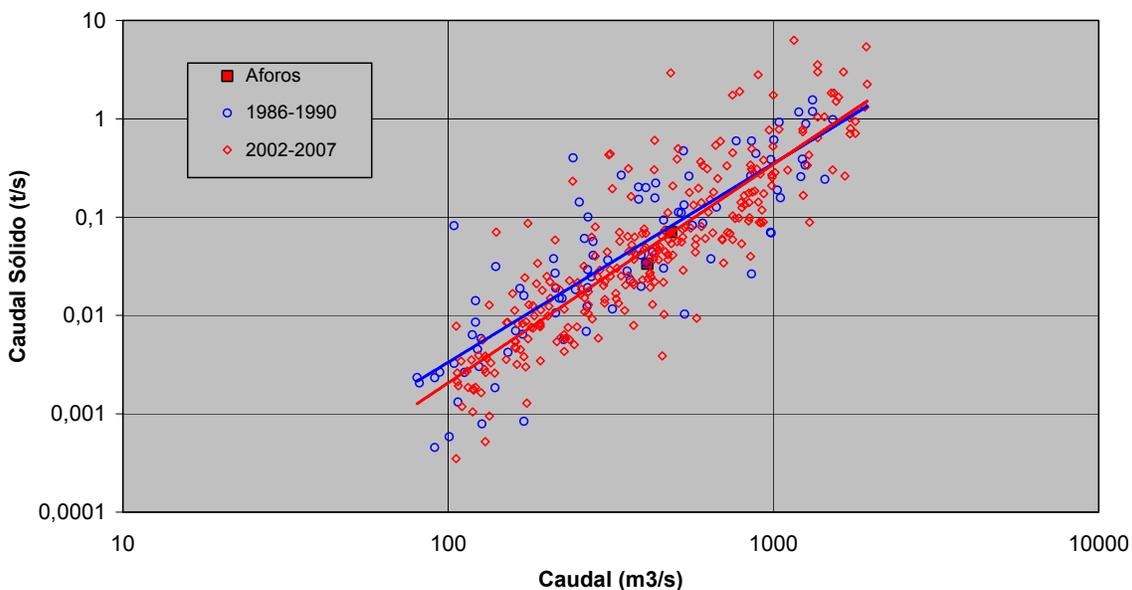
Estación: RURRENABAQUE (Río Beni)
Curvas $Q_s = f(Q)$ para varios periodos



Fuente: Vauchel (2008)

Figura 4.17: Relaciones caudal líquido –caudal sólido en Puerto Villarroel

Estación: PUERTO VILLARROEL (Río Ichilo)
Curvas $Q_s = f(Q)$ para 1986-1990 y 2002-2007



Fuente: Vauchel (2008)

En resumen, las estaciones de Puerto Villarroel y de Rurrenabaque no muestran un punto de quiebre alrededor de 1990 y tampoco una tendencia al aumento de las concentraciones con el tiempo, para caudales similares. Como estas dos estaciones son representativas de los aportes de sedimentos andinos al río Madeira y como tienen mediciones numerosas y relativamente confiables, es posible concluir que una posible tendencia al aumento de las concentraciones en Cachuela Esperanza, Guayaramerín y Porto Velho después de 1990, no se debe a un incremento de la erosión andina. Si es que el aumento de las concentraciones existe (la falta de la serie de datos y la metodología usada en Porto Velho impiden probarlo), ese aumento estaría asociado al comportamiento hidrológico e hidrodinámico de la zona de llanura de los ríos Beni y Mamoré.

4.2 TAMAÑO DEL SEDIMENTO

4.2.1 Tamaño del sedimento del lecho

Furnas-Odebrecht (2005) calcularon una curva granulométrica de los sedimentos del lecho del río Madera, promediando aritméticamente un grupo de muestras, que se incluyen en la tabla A.3.2 del Anexo 3. Todas las muestras provienen de Porto Velho. Esa curva, que se muestra en color azul en la figura 4.18, fue la que usaron los consultores brasileños como dato de entrada del modelo HEC-6. El diámetro mediano correspondiente a esa curva es $d_{50}=0.18$ mm, que está en el rango de las arenas finas (fine sand). Merter (citado por Guyot, 1995) obtuvo un $d_{50}=0.17$ mm, cerca de la confluencia del río Madera con el Amazonas. Estos valores son más bajos que los de otros grandes ríos de la región: 0.25 mm para el Amazonas y 0.4 mm para el Orinoco.

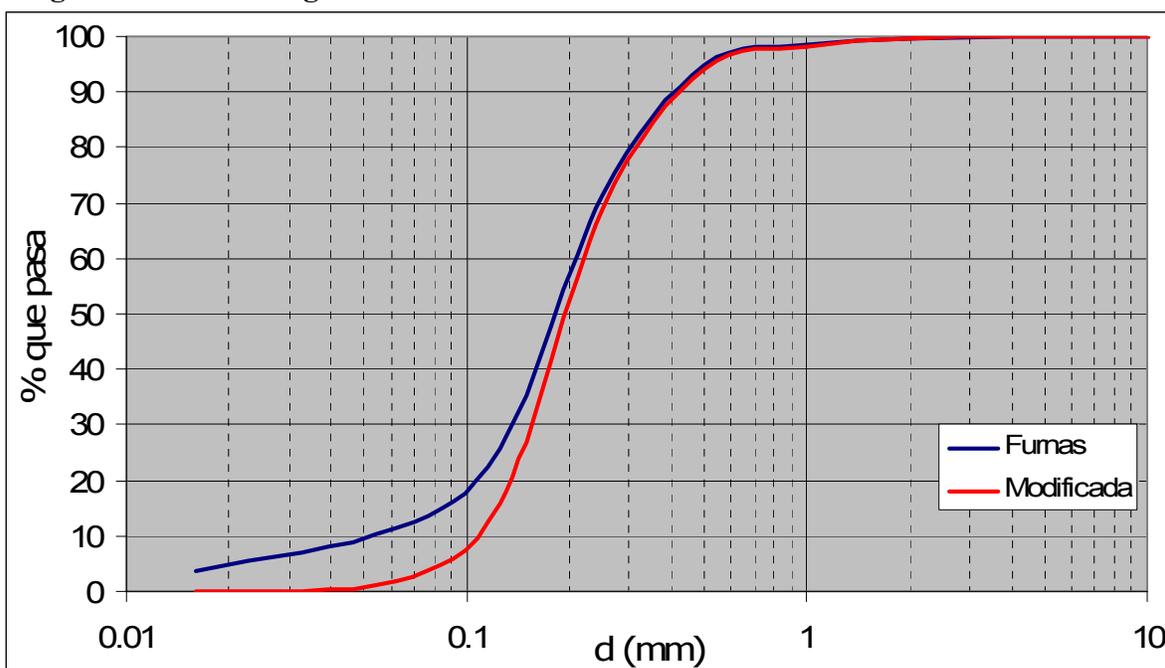
Por otro lado, la tabla A.3.1 muestra la composición de los sedimentos en suspensión y del material del lecho para otro grupo de muestras, parte de las cuales corresponden a las de la tabla A.3.2. Se siguió la clasificación usada en HEC-6: arcilla para granos menores a 0.004 mm, limo para granos entre 0.004 y 0.063 mm, arena para granos entre 0.063 y 2 mm y grava para tamaños mayores a 2 mm.

Según la tabla A.3.2 el porcentaje promedio de material fino (limo más arcilla) en el lecho del río Madera es de 11.48%. Este es un valor considerablemente más alto que el estimado por otros investigadores para los formadores del río Madera. Guyot (1992) halló que el porcentaje de granos menores a 0.063 mm en el lecho del curso inferior del río Beni, que es el principal aportante de sedimentos al Madera, oscilaba entre 1 y 4%, con un valor medio de 2%. Según Taborga (citado por Guyot, 1992) en el lecho del río Guaporé o Itenez, que lleva poco sedimento en suspensión por su origen en el Escudo precámbrico, no se detecta arcilla. En el lecho de este río predominan las arenas finas y medias, con un $d_{50}=0.34$ mm.

La tabla A.3.1 indica que en promedio, la cantidad de material fino en el lecho es de 9% (arcilla=1.2%, limo=7.8%). Un nuevo cálculo de los datos de la tabla A.3.1, usando un promedio ponderado por el caudal sólido de fondo correspondiente a cada muestreo, indica que el material fino presente en el lecho representa solamente 4.8% (0.6% arcilla y 4.2% limo). Se obtiene el mismo valor para los datos de la tabla A.3.2 que cuentan con datos de caudal sólido.

Tomando en cuenta lo anterior y que en el modelo STA-HECRAS el tamaño del sedimento del lecho y del transporte de fondo son correspondientes, se decidió construir una nueva curva granulométrica para Porto Velho, usando solamente el promedio de las muestras de la tabla A.3.2 en que no se detectó sedimento inferior a 0.016 mm. Esa curva modificada se muestra en color rojo en la figura 4.18. Tiene un $d_{50}=0.196$ mm, ligeramente mayor a la curva de Furnas, pero es casi idéntica a esta última en su parte superior. Se diferencia en su parte inferior, debido a que el contenido de material fino es de solamente 1.7%. La tabla 4.3 muestra los valores correspondientes a la curva modificada de la figura 4.18, según la clasificación de tamaños que se usa en HEC-6 y en STA-HECRAS.

Figura 4.18: Curvas granulométricas medias del lecho del río Madera en Porto Velho



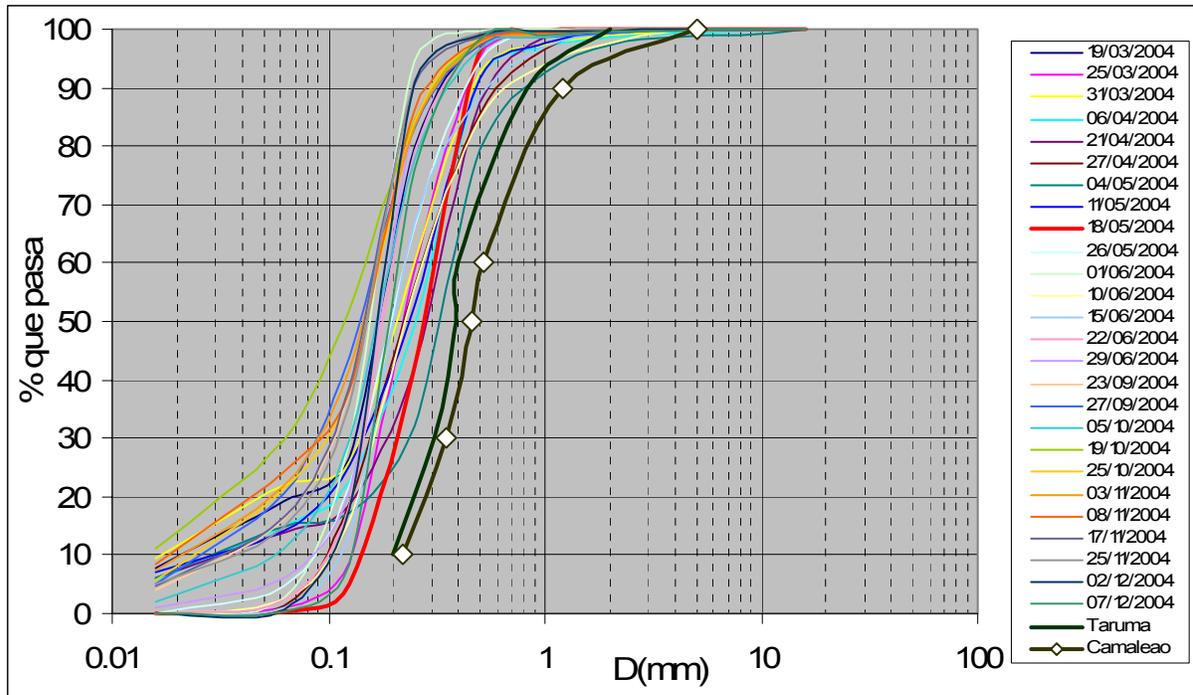
Fuente: Elaboración propia en base a datos de Furnas (2005)

Tabla 4.3: Granulometría modificada del lecho del río Madera en Porto Velho

Diámetro (mm)	% que pasa
16	100.0
8	100.0
4	99.90
2	99.51
1	98.34
0.5	94.14
0.25	68.63
0.125	15.82
0.062	1.69
0.016	0.00

El uso de una sola curva granulométrica del lecho para representar todo el tramo de estudio es fuente de incertidumbre y de posibles errores en la modelación. Esto es de especial relevancia en el caso del río Madera, cuyas condiciones hidrodinámicas varían fuertemente a lo largo del tramo de estudio (ver capítulo 3). Las escasas muestras en otros puntos de ese tramo, como las tomadas por Alam (2007) junto a las islas de Taruma y Camaleao, parecen indicar que el tamaño del sedimento del lecho también varía significativamente. El sedimento junto a esas islas (líneas negras en la figura 4.19) es considerablemente más grueso que en Porto Velho y no presenta arcilla ni limo.

Figura 4.19: Curvas granulométricas del lecho en Porto Velho, Taruma y Camaleao



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Furnas (2005) y Alam (2007)

Por otro lado, la figura 4.19 muestra que las curvas granulométricas del material de fondo en Porto Velho varían en el tiempo. Por ejemplo la línea roja, que representa la muestra tomada el 18/5/05, tiene un $d_{50}=0.275$ mm. Esta muestra está formada por arenas finas y medias, sin presencia de arcilla o limo. Fue utilizada en el análisis de sensibilidad (capítulo 5).

4.2.2 Tamaño del sedimento en suspensión y total

El promedio aritmético de los datos de la tabla A.3.1 indica que 26.5% del sedimento en suspensión es arcilla y 63.7% es limo. Combinando con los promedios del transporte de fondo que figuran en esa misma tabla, ponderados por la relación $Q_{sf}=0.06*Q_{ss}$, Furnas-Odebrecht (2005) obtuvieron los valores de la tabla 4.4 para el caudal sólido total.

Sin embargo, recalculando los datos de la tabla A.3.1 mediante el promedio ponderado según el caudal sólido, la arcilla compone solamente 23.9% del sedimento en suspensión. Por otro lado, los datos de Guyot (1995) indican que la arcilla representa entre 17 y 18% de las

muestras en suspensión tomadas en los ríos Beni, Mamoré y Guaporé/Itenez, formadores del Madera. Tomando en cuenta esa información y la curva modificada del material de fondo (figura 4.18), en el presente estudio se usó una curva granulométrica (ver capítulo 5) del caudal sólido total, compuesta de 18% de arcilla, 66% de limo y 16% de arena.

Tabla 4.4: Porcentajes ponderados de arcilla, limo y arena en las muestras de Furnas

Material	% Arcilla	% Limo	% Arena
Suspensión Q _{ss}	25.0	60.1	9.3
Carga de Fondo Q _{sf}	0.1	0.4	5.2
Total Q _{st}	25.0	60.6	14.4

Furnas-Odebrecht (2005)

Guyot (1992) no encontró una relación entre el tamaño del sedimento transportado en suspensión y el caudal líquido para el río Beni. Esto debe tomarse en cuenta en la tabla granulométrica de caudal sólido total que se proporciona al modelo como información de entrada.

REFERENCIAS

Angulo, G., Al Mar por las Hidrovías de la Integración Sudamericana

Guyot, J.L., 1992: Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, Francia.

Guyot, J.L., Quintanilla, J., Cortés, J & Filizola, N. 1995. Les flux de matières dissoutes et particulaires des Andes de Bolivie vers le río Madeira en Amazonie Brésilienne. En Memorias del Seminario Internacional de Aguas Glaciares y Cambios climáticos en los Andes Tropicales.

Guyot, J.L., Filizola, N. Laraque, A. Seyler, P., 1999a. La variabilité saisonnière des flux sédimentaires dans le bassin de l'Amazonie. Proceedings of the Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins, Manaus 99.

Guyot, J.L., Jouanneaub, J.M., Wasson, J.G., 1999b. Characterisation of river bed and suspended sediments in the Rio Madeira drainage basin (Bolivian Amazonia). Journal of South American Earth Sciences 12 (1999), p401-410

Filizola, N., Guyot, J.L., Boaventura, G. 1999. Fluxo de sedimentos em suspensão na Amazônia - uma análise a partir da base de dados da ANEEL. Proceedings of the Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins, Manaus 99.

Furnas Centrais Elétricas SA y CNO-Constructora Noberto Odebrecht SA, 2002. Inventário Hidrelétrico do rio Madeira, trecho Porto Velho – Abunã, relatório final. Noviembre 2002.

Furnas, Odebrecht, 2004. Complejo hidrelétrico do rio Madeira, Estudos de Viabilidade do AHE Jirau, nov. 2004, Brasil.

Furnas, Odebrecht, 2004. Complejo hidrelétrico do rio Madeira, Estudos de Viabilidade do AHE Santo Antônio, nov. 2004, Brasil.

Furnas, Odebrecht, 2005. Estudos de Impacto Ambiental, Rio Madera – RO. Mayo 2005.

Furnas, Odebrecht, 2006. Complementação e adequação dos estudos ambientais dos aproveitamentos hidrelétricos Santo Antônio e Jirau, Rio Madeira, Rondônia, Tomo I: Meio Físico. Agosto 2006.

Furnas, Odebrecht, 2007. Estudos de Viabilidade do AHE Jirau, Relatório Complementar. Marzo 2007.

Furnas, Odebrecht, 2007. Estudos de Viabilidade do AHE Santo Antonio, Relatório Complementar. Marzo 2007.

SENAMHI-ENDE, 2007. Secciones transversales en los ríos Madera y Abuná. Topografía y batimetría. Noviembre 2007.

Vauchel, P., 2008. Estudio hidrológico de la confluencia del Río Madera, informe interno. Mayo 2008.

ANEXO 1

Tabla A.1.1: Secciones transversales entre Santo Antonio y Jirau

Sección	Distancia entre secciones (m)	Distancia Acumulada (m)	Observaciones
81	0	0	AHE Santo Antônio - Est. Lim. Cachuela Santo Antonio aguas arriba
88	6777	6777	
96	7726	14503	
98	2650	17153	Cachuela de Teotonio
105	6500	23653	
110	4977	2863	
120	10312	38942	
128	7925	46867	Cachuela Morrinho
139	11047	57914	
145	6011	63925	Ilha Liverpool
151	5772	69697	Ilha Sao Patricio
158	7312	77009	Ilha Niteroi
166	7929	84938	
172	5416	90354	Ilha Santana
184	12103	102457	Ilha da Pedra
190	6198	108655	
195	4757	113412	
200	5083	118495	Cachuela do Inferno
207	7312	125807	AHE Jirau - Est. Lim. Cachuela Jirau aguas abajo

Tabla A.1.2: Secciones transversales entre Jirau y Villa Bella

Sección	Distancia entre secciones (m)	Distancia acumulada (m)	Observaciones
207	0	0	AHE Jirau - Est. Lim. Cachuela Jirau aguas abajo
210	2755	2755	Cachuela Jirau - Aguas arriba
211	1000	3755	Copia de la sección 228
228	17331	21086	
243	15217	36303	
253	9420	45723	
255	2133	47856	Ilha Tres Irmaos
256	970	48826	Cachuela Tres Irmaos
258	1995	50821	
267	9373	60194	
272	4536	64730	
279	7232	71962	
283	3673	75635	

286	3292	78927	Cachuela do Paredao
292	6172	85099	
301	8421	93520	
306	4940	98460	
309	3331	101791	Cachuela do Pederneira
315	6515	108306	
320	4169	112475	
327	7510	119985	
329	1747	121732	Confluencia río Abuná
329.2	686	122418	Confluencia río Abuná
330.1	956	123374	
334.1	3626	127000	
338	4057	131057	Estación hidrométrica Abuná-Vila
338.1	87	131144	Puerto Manoa
341.1	3282	134426	
344.1	3114	137540	
347.1	2813	140353	
350.1	3270	143623	
353.1	2146	145769	
355.1	2395	148164	
357.1	1967	150131	
360.1	4031	154162	
364.1	3404	157566	
369	5526	163092	
370.1	1311	164403	
372	1268	165671	Cachuela das Araras
374.1	2489	168160	
375	758	168918	
376.1	1142	170060	
378.1	2178	172238	
380.1	2191	174429	
383.1	2560	176989	
385.1	1617	178606	
387.1	2131	180737	
391.1	3911	184648	
392.1	1827	186475	
394.1	1886	188361	
396	1699	190060	
397.6	1581	191641	
398	542	192183	Cachuela do Ribeirao aguas abajo
405	6502	198685	Cachuela do Ribeirao aguas arriba
405.5	500	199185	Sección copia de la sección 406.6
406.6	678	199863	
407.1	423	200286	
408.3	1216	201502	

409.4	1094	202596	
411.1	1734	204330	
412.6	1431	205761	
413.4	860	206621	
414.8	1910	208531	
415.7	940	209471	
416.8	1153	210624	
418.1	1204	211828	Cachuela Madera aguas abajo
422.7	4760	216588	Cachuela Madera aguas arriba
423.2	500	217088	
424.9	1550	218638	Villa Bella

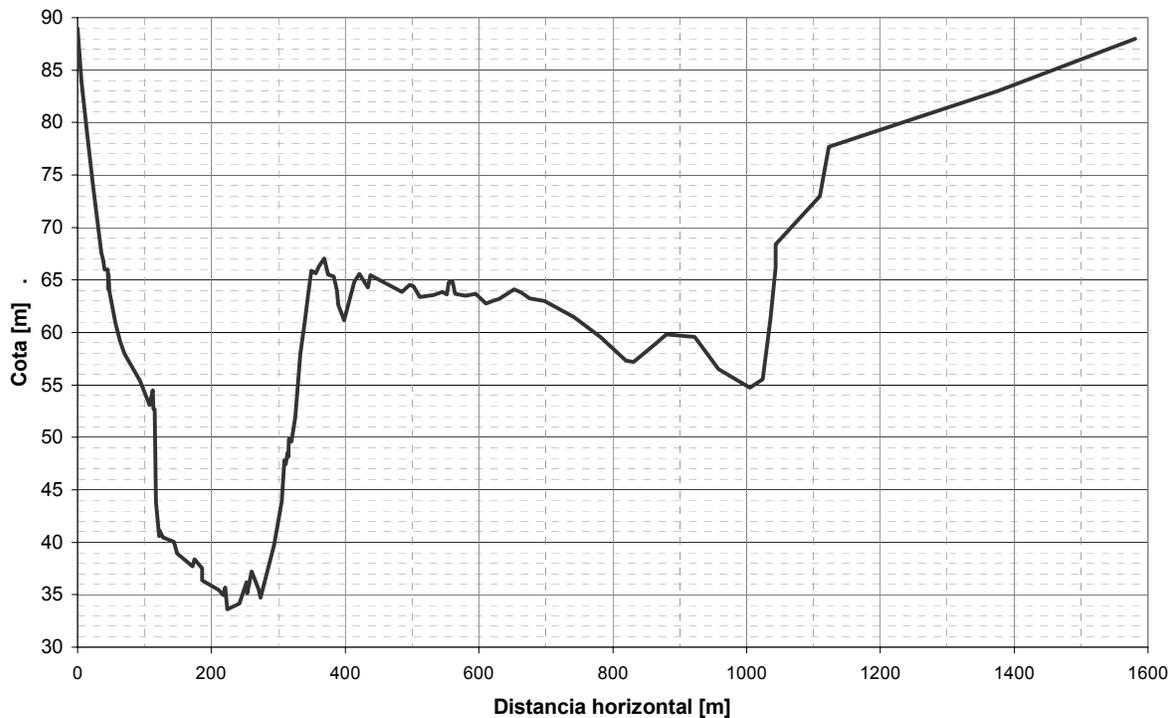
Fuente: Elaboración propia en base a datos de FURNAS-ODEBRECHT, SENAMHI-ENDE

Secciones transversales: Tramo Jirau – Cachuela Madera

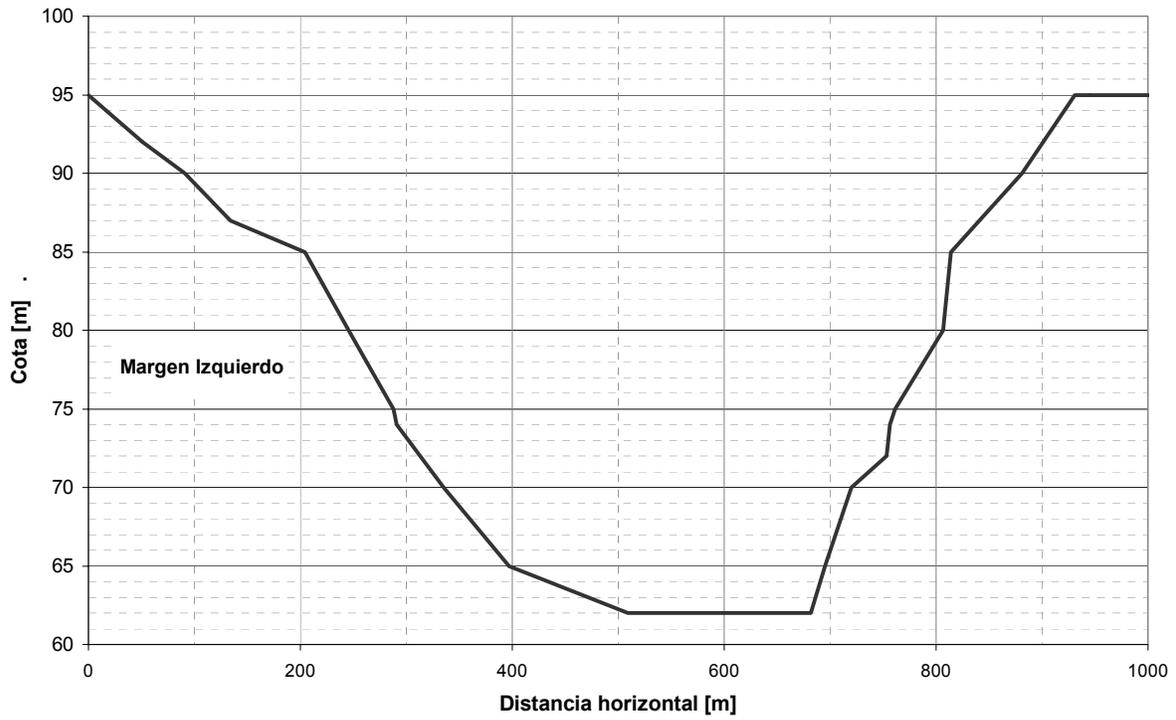
Notas

- Las cotas están referidas al sistema altitudinal brasileño
- En el tramo binacional, varias secciones fueron completadas con datos de la sección brasileña o boliviana más próxima

SECCIÓN TRANSVERSAL 207 (Cachuela Jirau aguas abajo)

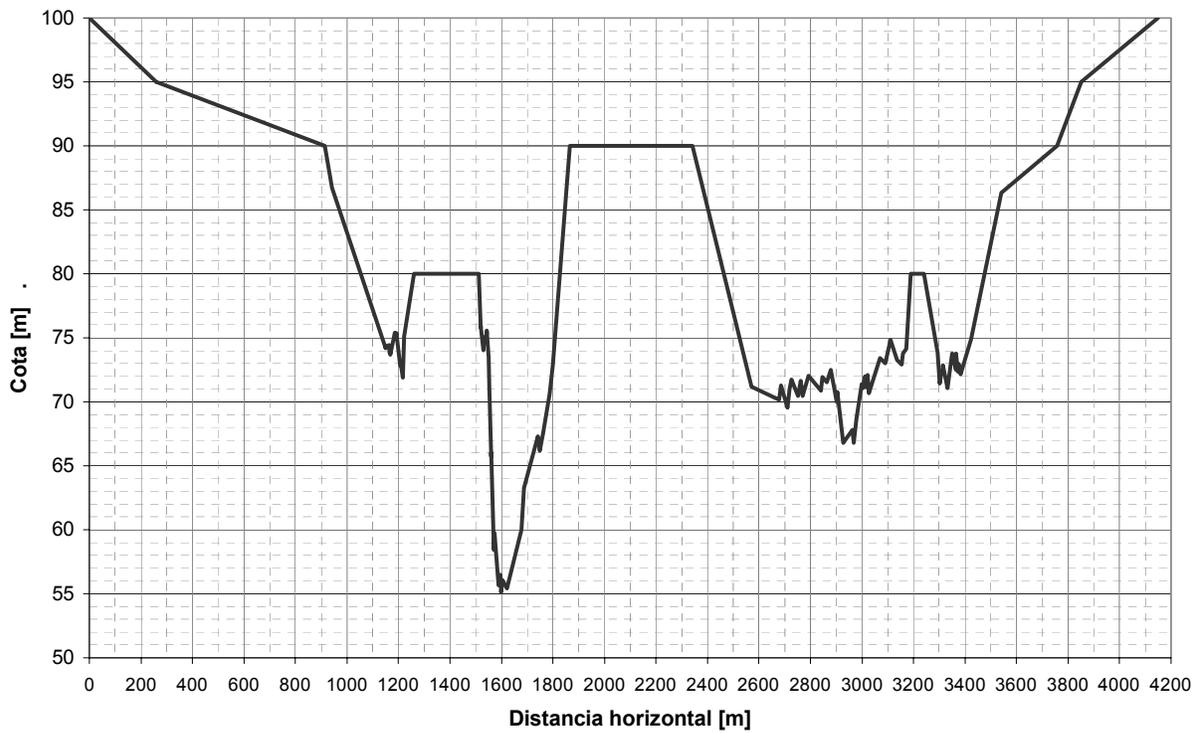


SECCIÓN TRANSVERSAL 210 (Cachuela Jirau aguas arriba)

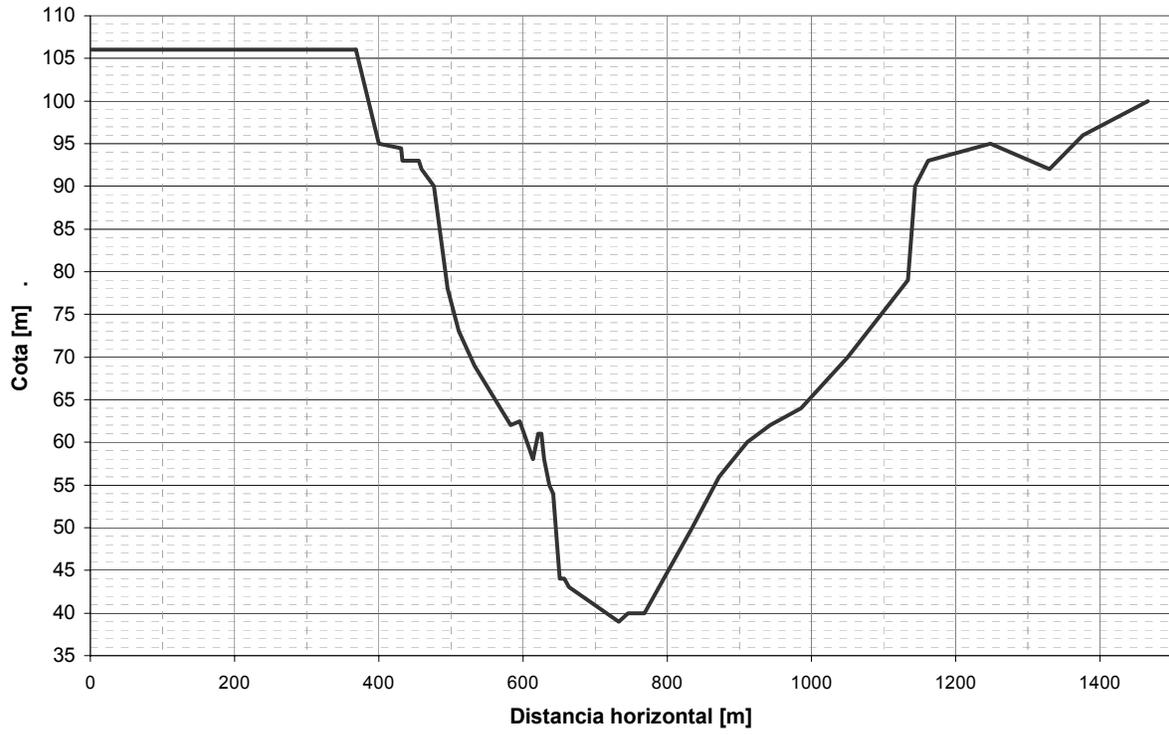


Fuente: Furnas-Odebrecht (2004) y SENAMHI-ENDE (2007)

SECCIÓN TRANSVERSAL 255 (Ilha Tres Irmaos)

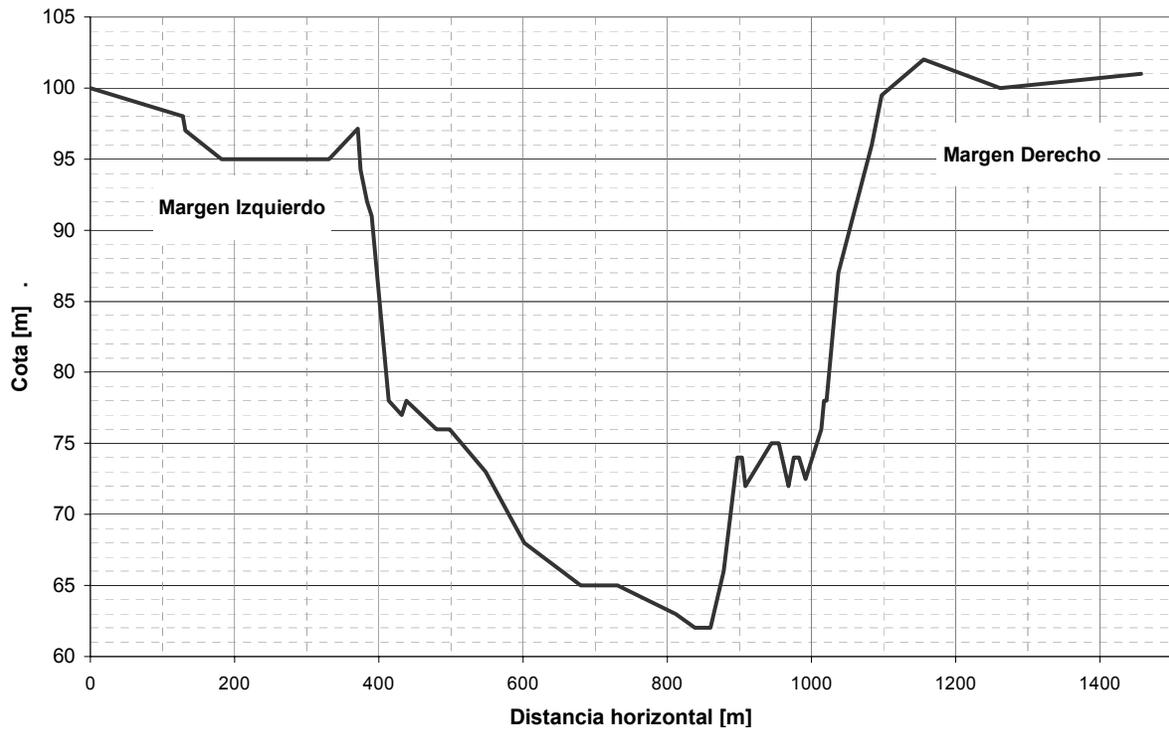


SECCIÓN TRANSVERSAL 329 (Abajo confluencia con río Abuná)

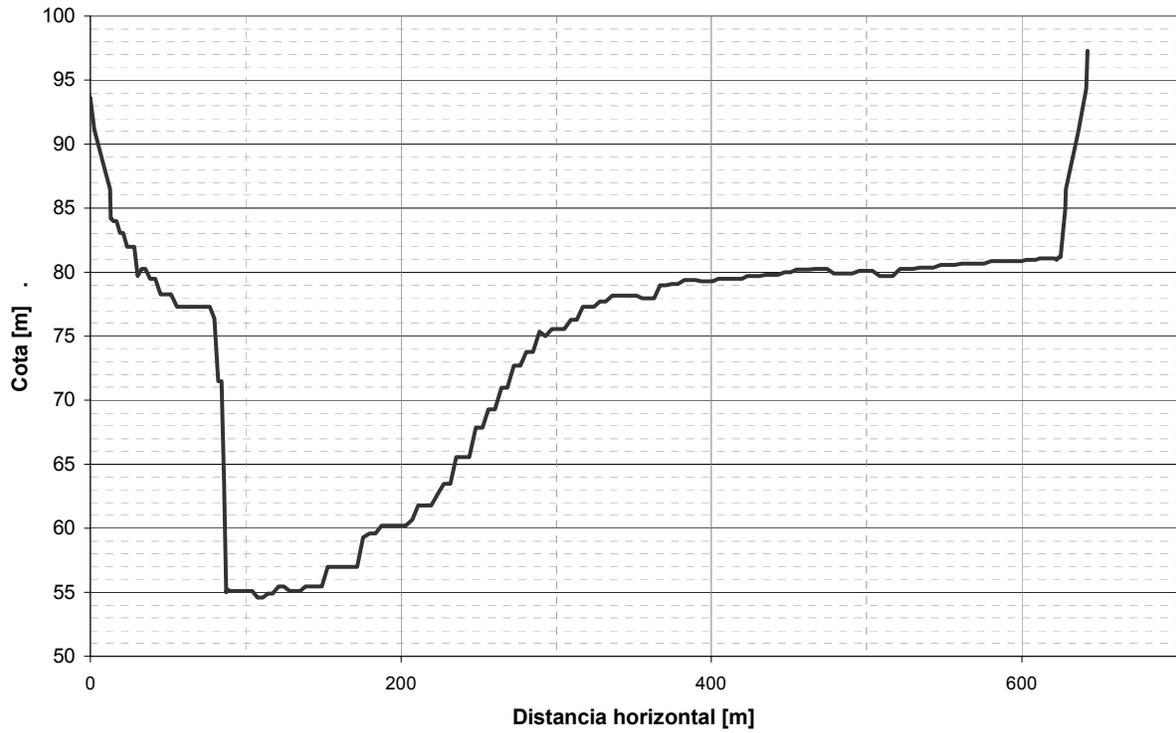


Fuente: Furnas-Odebrecht (2004) y SENAMHI-ENDE (2007)

SECCIÓN TRANSVERSAL 338 (Estación de Abuná-Vila)

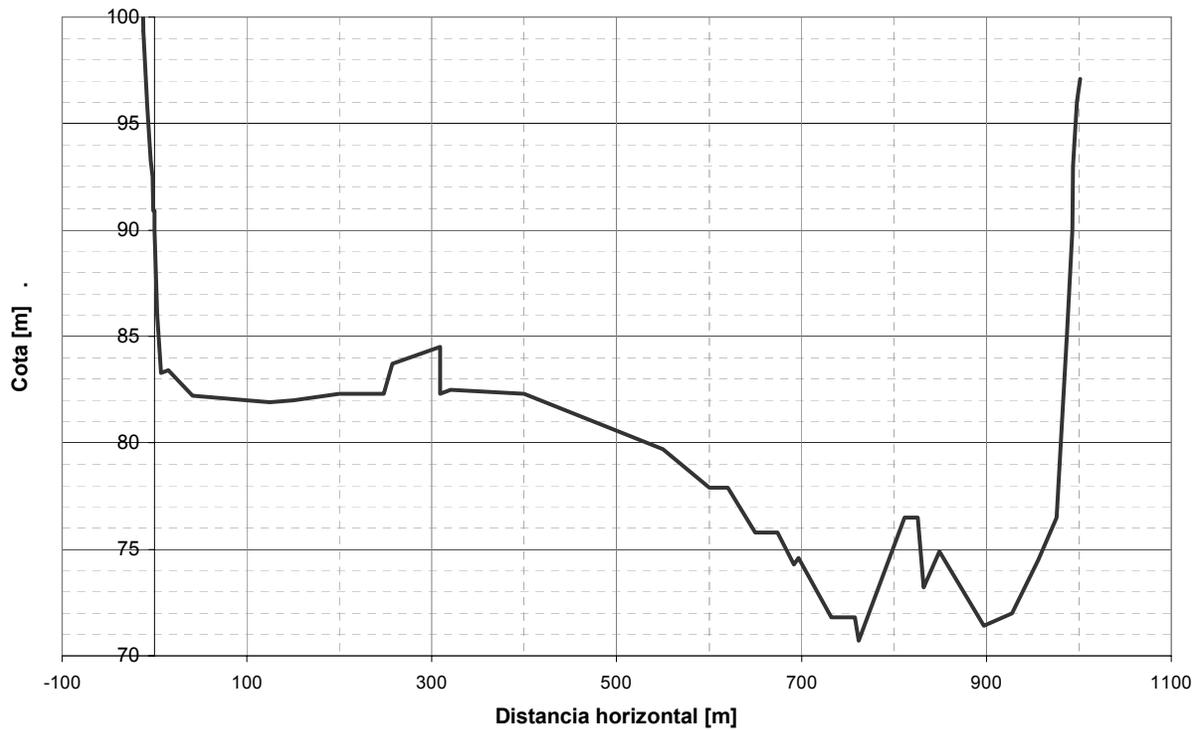


SECCIÓN TRANSVERSAL 350.1

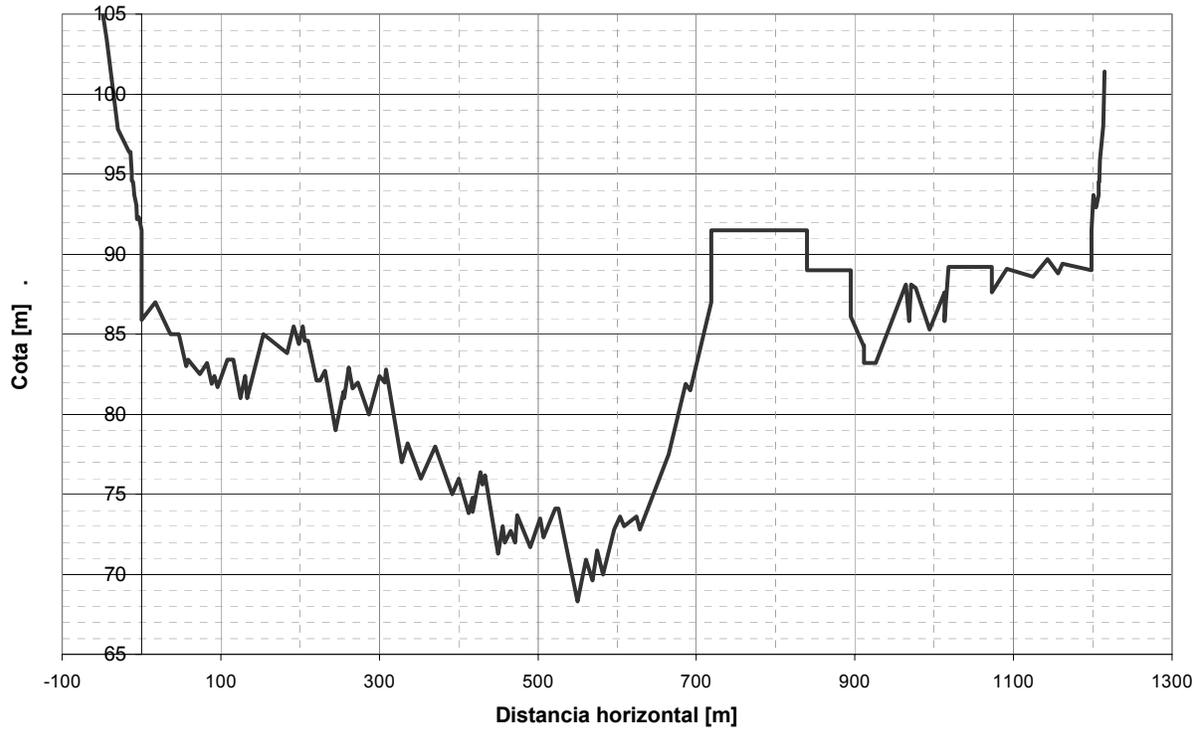


Fuente: Furnas-Odebrecht (2004) y SENAMHI-ENDE (2007)

SECCIÓN TRANSVERSAL 375 (Cachuela Araras - aguas arriba)

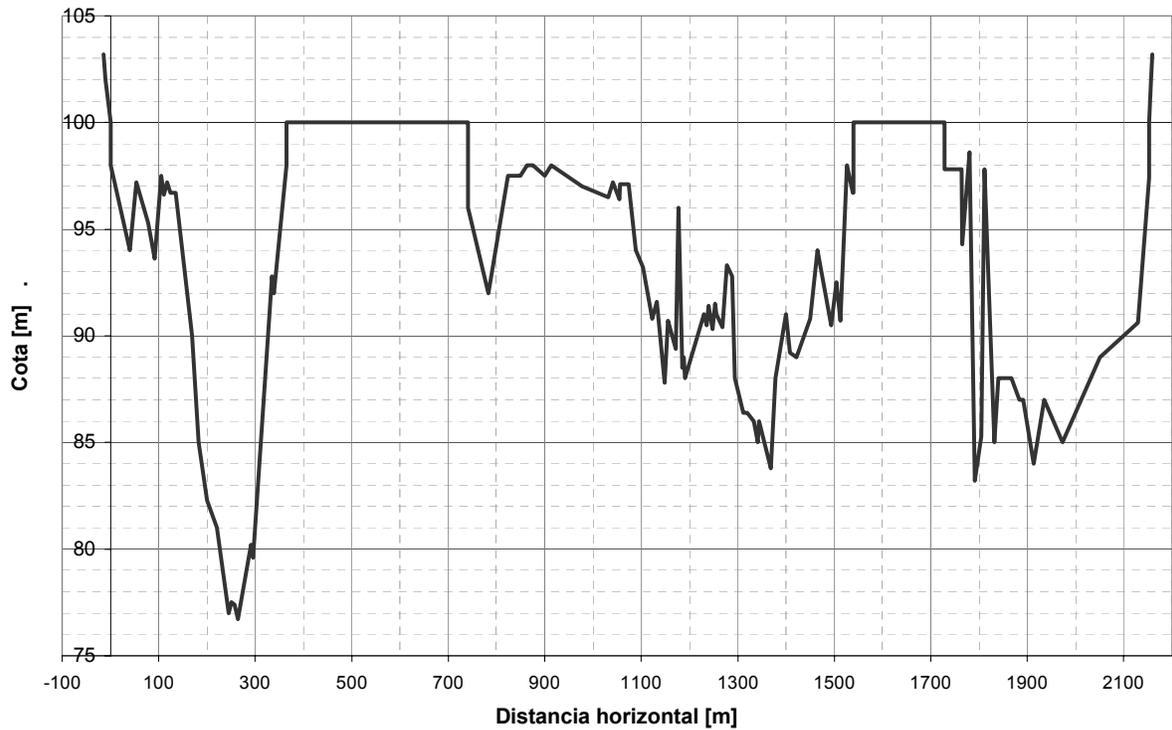


SECCIÓN TRANSVERSAL 398 (Cachuela Ribeirao - aguas abajo)

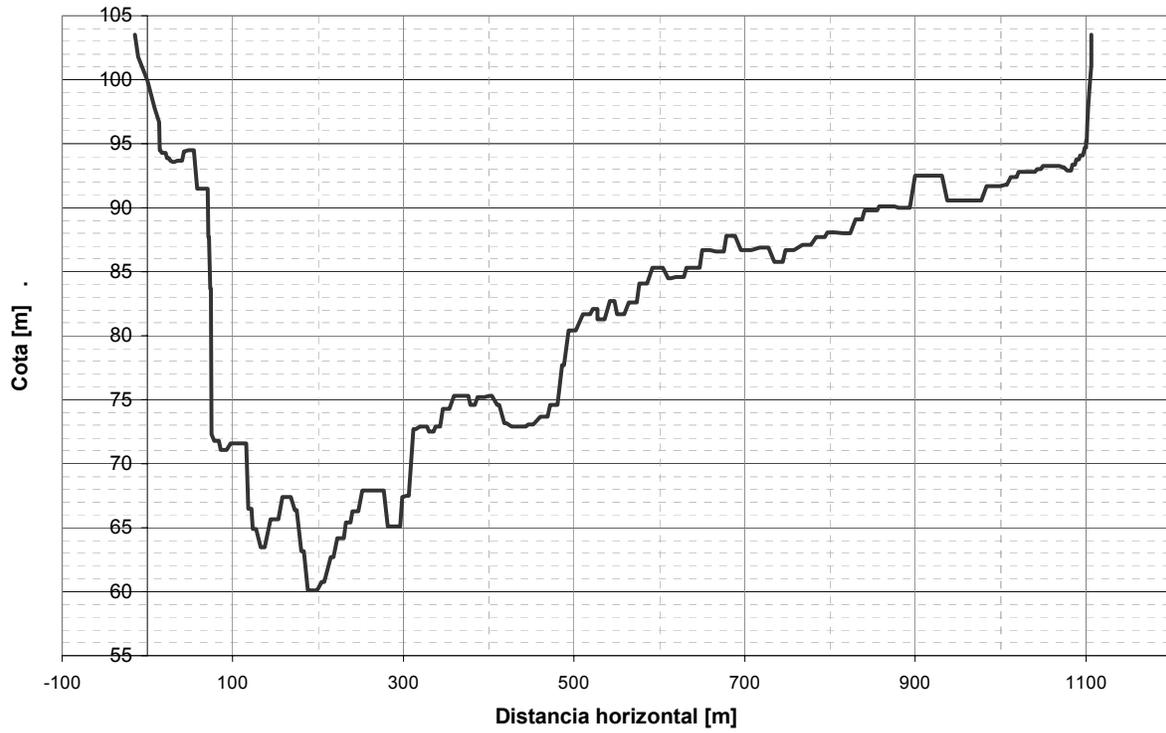


Fuente: Furnas-Odebrecht (2004) y SENAMHI-ENDE (2007)

SECCIÓN TRANSVERSAL 405 (Cachuela Ribeirao - aguas arriba)

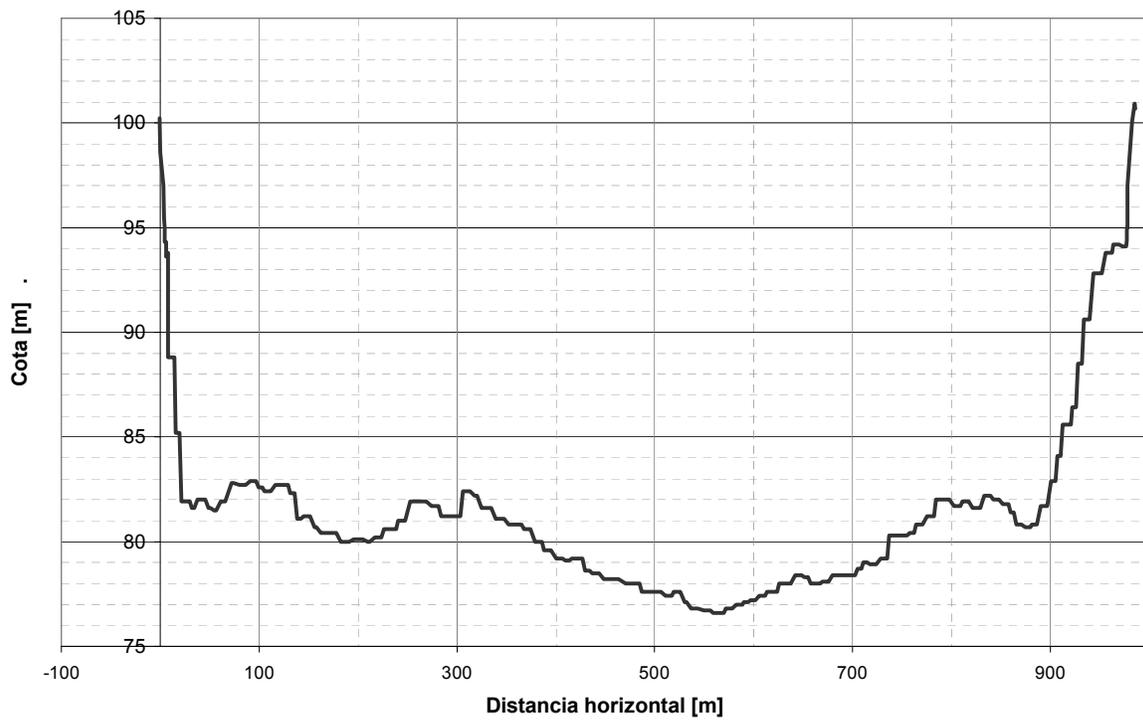


SECCIÓN TRANSVERSAL 406.6 (2 km arriba de Cachuela Ribeirao)



Fuente: Furnas-Odebrecht (2004) y SENAMHI-ENDE (2007)

SECCIÓN TRANSVERSAL 408.3 (3.5 km arriba de Cachuela Ribeirao)



ANEXO 2

Tabla A.2.1: Coeficientes de rugosidad en el tramo Santo Antonio-Jirau

Sección	H [m]	Coeficiente de Rugosidad		
		ni	nc	nd
207	74.08	0.070	0.039	0.070
	79.58	0.070	0.038	0.070
	82.59	0.070	0.037	0.070
	85.00	0.070	0.036	0.070
200	63.81	0.070	0.039	0.070
	70.09	0.070	0.038	0.070
	78.14	0.070	0.037	0.070
	78.91	0.070	0.035	0.070
	79.86	0.070	0.033	0.070
195	63.77	0.070	0.039	0.070
	69.97	0.070	0.038	0.070
	78.06	0.070	0.037	0.070
	78.91	0.070	0.035	0.070
	79.86	0.070	0.033	0.070
190	63.77	0.070	0.039	0.070
	69.97	0.070	0.038	0.070
	78.06	0.070	0.037	0.070
	78.91	0.070	0.035	0.070
	79.86	0.070	0.033	0.070
184	63.49	0.070	0.039	0.070
	69.56	0.070	0.038	0.070
	77.88	0.070	0.037	0.070
	78.91	0.070	0.035	0.070
	79.86	0.070	0.033	0.070
172	63.20	0.070	0.039	0.070
	68.99	0.070	0.038	0.070
	77.58	0.070	0.037	0.070
	78.91	0.070	0.035	0.070
	79.86	0.070	0.033	0.070
166	63.08	0.070	0.039	0.070
	68.75	0.070	0.038	0.070
	77.47	0.070	0.037	0.070
	77.55	0.070	0.036	0.070
	78.91	0.070	0.035	0.070
	79.86	0.070	0.033	0.070
158	62.96	0.070	0.039	0.070
	68.46	0.070	0.038	0.070
	77.32	0.070	0.037	0.070
	77.55	0.070	0.036	0.070
	78.91	0.070	0.035	0.070
	79.86	0.070	0.033	0.070
151	62.87	0.070	0.039	0.070
	68.22	0.070	0.038	0.070

	71.34	0.070	0.037	0.070
	77.23	0.070	0.037	0.070
	77.55	0.070	0.036	0.070
	78.91	0.070	0.035	0.070
	79.86	0.070	0.033	0.070
145	61.80	0.070	0.042	0.070
	62.65	0.070	0.042	0.070
	67.83	0.070	0.035	0.070
	70.76	0.070	0.034	0.070
	77.10	0.070	0.032	0.070
139	61.28	0.070	0.043	0.070
	62.11	0.070	0.042	0.070
	67.20	0.070	0.036	0.070
	70.10	0.070	0.034	0.070
	77.01	0.070	0.032	0.070
128	60.10	0.070	0.044	0.070
	60.97	0.070	0.043	0.070
	66.23	0.070	0.037	0.070
	69.19	0.070	0.034	0.070
	76.85	0.070	0.033	0.070
120	59.10	0.070	0.044	0.070
	60.00	0.070	0.044	0.070
	65.17	0.070	0.038	0.070
	68.02	0.070	0.037	0.070
	76.60	0.070	0.035	0.070
110	57.81	0.070	0.045	0.070
	58.59	0.070	0.045	0.070
	62.91	0.070	0.041	0.070
	65.32	0.070	0.040	0.070
	76.20	0.070	0.039	0.070
105	57.97	0.070	0.045	0.070
	61.93	0.070	0.042	0.070
	64.23	0.070	0.042	0.070
	65.94	0.070	0.040	0.070
	67.75	0.070	0.038	0.070
	69.31	0.070	0.035	0.070
99.5	57.97	0.070	0.045	0.070
	61.93	0.070	0.042	0.070
	64.23	0.070	0.042	0.070
	65.94	0.070	0.040	0.070
	67.75	0.070	0.038	0.070
	69.31	0.070	0.035	0.070
98	56.27	0.070	0.045	0.070
	59.95	0.070	0.042	0.070
	62.34	0.070	0.046	0.070
	64.08	0.070	0.043	0.070
	65.94	0.070	0.040	0.070
	67.75	0.070	0.038	0.070
	69.31	0.070	0.035	0.070

96	49.47	0.070	0.052	0.070
	55.89	0.070	0.050	0.070
	59.87	0.070	0.049	0.070
	62.34	0.070	0.046	0.070
	64.08	0.070	0.043	0.070
	65.94	0.070	0.040	0.070
	67.75	0.070	0.038	0.070
	69.31	0.070	0.035	0.070
88	47.82	0.070	0.052	0.070
	54.70	0.070	0.050	0.070
	58.88	0.070	0.049	0.070
	62.34	0.070	0.046	0.070
	64.08	0.070	0.043	0.070
	65.94	0.070	0.040	0.070
	67.75	0.070	0.038	0.070
	69.31	0.070	0.035	0.070
81	47.39	0.070	0.052	0.070
	53.88	0.070	0.050	0.070
	57.58	0.070	0.049	0.070
	57.93	0.070	0.049	0.070
	62.34	0.070	0.046	0.070
	64.08	0.070	0.043	0.070
	65.94	0.070	0.040	0.070
	67.75	0.070	0.038	0.070
69.31	0.070	0.035	0.070	

Tabla A.2.2: Coeficientes de rugosidad y de expansión/contracción en el tramo Jirau-Abuná-Cachuela Madera

Sección	Q [m³/s]	H [m]	Coeficiente de Rugosidad			Coeficiente	
			ni	nc	nd	Expansión	Contracción
210	4197	73.38	0.108	0.058	0.108	0.2	0.4
	5520	74.08	0.089	0.039	0.089		
	12000	77.09	0.080	0.033	0.080		
	18605	79.58	0.080	0.030	0.080		
	24500	81.24	0.071	0.025	0.071		
	29869	82.59	0.071	0.021	0.071		
	31026	83.13	0.071	0.021	0.071		
	50000	86.37	0.071	0.020	0.071		
211	4197	73.50	0.108	0.058	0.108	0.2	0.4
	5520	74.20	0.089	0.039	0.089		
	12000	77.37	0.080	0.033	0.080		
	18605	79.99	0.080	0.030	0.080		
	24500	81.75	0.071	0.025	0.071		
	29869	83.18	0.071	0.021	0.071		
	31026	83.72	0.071	0.021	0.071		
	50000	87.40	0.071	0.020	0.071		
228	4197	73.96	0.108	0.058	0.108	0.2	0.4
	5520	74.51	0.089	0.039	0.089		

	12000	78.00	0.080	0.033	0.080		
	18605	80.76	0.080	0.030	0.080		
	24500	82.54	0.071	0.025	0.071		
	29869	83.85	0.071	0.021	0.071		
	31026	84.39	0.071	0.021	0.071		
	50000	88.24	0.071	0.020	0.071		
243	4197	74.24	0.108	0.058	0.108	0.2	0.4
	5520	74.71	0.089	0.039	0.089		
	12000	78.36	0.080	0.033	0.080		
	18605	81.22	0.080	0.030	0.080		
	24500	83.00	0.071	0.025	0.071		
	29869	84.25	0.071	0.021	0.071		
	31026	84.79	0.071	0.021	0.071		
253	50000	88.77	0.071	0.020	0.071	0.2	0.4
	4197	74.49	0.107	0.057	0.107		
	5520	74.91	0.100	0.050	0.100		
	12000	78.62	0.089	0.042	0.089		
	18605	81.53	0.089	0.039	0.089		
	24500	83.30	0.083	0.036	0.083		
	29869	84.52	0.083	0.033	0.083		
255	31026	85.05	0.082	0.032	0.082	0.2	0.4
	50000	89.16	0.082	0.031	0.082		
	4197	74.72	0.107	0.057	0.107		
	5520	75.17	0.100	0.050	0.100		
	12000	78.83	0.089	0.042	0.089		
	18605	81.72	0.089	0.039	0.089		
	24500	83.48	0.083	0.036	0.083		
256	29869	84.70	0.083	0.033	0.083	0.2	0.4
	31026	85.23	0.082	0.032	0.082		
	50000	89.39	0.082	0.031	0.082		
	4197	74.94	0.107	0.057	0.107		
	5520	75.40	0.100	0.050	0.100		
	12000	78.98	0.089	0.042	0.089		
	18605	81.84	0.089	0.039	0.089		
258	24500	83.58	0.083	0.036	0.083	0.2	0.4
	29869	84.79	0.083	0.033	0.083		
	31026	85.30	0.082	0.032	0.082		
	50000	89.46	0.082	0.031	0.082		
	4197	75.06	0.107	0.057	0.107		
	5520	75.55	0.100	0.050	0.100		
	12000	79.12	0.089	0.042	0.089		
267	18605	81.96	0.089	0.039	0.089	0.2	0.4
	24500	83.69	0.083	0.036	0.083		
	29869	84.88	0.083	0.033	0.083		
267	31026	85.38	0.082	0.032	0.082	0.2	0.4
	50000	89.51	0.082	0.031	0.082		
	4197	75.47	0.107	0.057	0.107		
267	5520	76.01	0.100	0.050	0.100	0.2	0.4
	12000	79.74	0.089	0.042	0.089		

	18605	82.65	0.089	0.039	0.089		
	24500	84.41	0.083	0.036	0.083		
	29869	85.60	0.083	0.033	0.083		
	31026	86.06	0.082	0.032	0.082		
	50000	90.36	0.082	0.031	0.082		
272	4197	76.25	0.144	0.144	0.144	0.2	0.4
	5520	76.80	0.112	0.112	0.112		
	12000	80.66	0.107	0.088	0.107		
	18605	83.62	0.107	0.077	0.107		
	24500	85.41	0.098	0.068	0.098		
	29869	86.58	0.098	0.058	0.098		
	31026	87.05	0.090	0.060	0.090		
	50000	91.45	0.090	0.048	0.090		
279	4197	77.02	0.144	0.144	0.144	0.2	0.4
	5520	77.52	0.112	0.112	0.112		
	12000	81.61	0.107	0.088	0.107		
	18605	84.71	0.107	0.077	0.107		
	24500	86.54	0.098	0.068	0.098		
	29869	87.67	0.098	0.058	0.098		
	31026	88.22	0.090	0.060	0.090		
	50000	92.67	0.090	0.048	0.090		
283	4197	77.43	0.144	0.144	0.144	0.2	0.4
	5520	77.90	0.112	0.112	0.112		
	12000	82.06	0.107	0.088	0.107		
	18605	85.20	0.107	0.077	0.107		
	24500	87.03	0.098	0.068	0.098		
	29869	88.12	0.098	0.058	0.098		
	31026	88.70	0.090	0.060	0.090		
	50000	93.10	0.090	0.048	0.090		
286	4197	77.70	0.144	0.144	0.144	0.2	0.4
	5520	78.16	0.112	0.112	0.112		
	12000	82.44	0.107	0.088	0.107		
	18605	85.65	0.107	0.077	0.107		
	24500	87.51	0.098	0.068	0.098		
	29869	88.60	0.098	0.058	0.098		
	31026	89.21	0.090	0.060	0.090		
	50000	93.69	0.090	0.048	0.090		
292	4197	78.02	0.144	0.144	0.144	0.2	0.4
	5520	78.47	0.112	0.112	0.112		
	12000	82.86	0.107	0.088	0.107		
	18605	86.13	0.107	0.077	0.107		
	24500	88.03	0.098	0.068	0.098		
	29869	89.12	0.098	0.058	0.098		
	31026	89.78	0.090	0.060	0.090		
	50000	94.31	0.090	0.048	0.090		
301	4197	78.95	0.228	0.228	0.228	0.2	0.4
	5520	79.38	0.181	0.181	0.181		
	12000	83.78	0.105	0.107	0.105		
	18605	86.94	0.105	0.075	0.105		

	24500	88.90	0.100	0.067	0.100		
	29869	90.00	0.100	0.060	0.100		
	31026	90.69	0.100	0.060	0.100		
	50000	95.18	0.100	0.048	0.100		
306	4197	80.37	0.228	0.228	0.228	0.2	0.4
	5520	80.85	0.181	0.181	0.181		
	12000	84.90	0.105	0.107	0.105		
	18605	87.72	0.105	0.075	0.105		
	24500	89.69	0.100	0.067	0.100		
	29869	90.79	0.100	0.060	0.100		
	31026	91.47	0.100	0.060	0.100		
	50000	95.93	0.100	0.048	0.100		
309	4197	81.38	0.228	0.228	0.228	0.2	0.4
	5520	81.83	0.181	0.181	0.181		
	12000	85.59	0.105	0.107	0.105		
	18605	88.23	0.105	0.075	0.105		
	24500	90.21	0.097	0.066	0.097		
	29869	91.30	0.097	0.057	0.097		
	31026	91.97	0.097	0.057	0.097		
	50000	96.44	0.097	0.047	0.097		
315	4197	81.46	0.085	0.035	0.085	0.2	0.4
	5520	81.95	0.085	0.035	0.085		
	12000	85.81	0.083	0.034	0.083		
	18605	88.51	0.083	0.033	0.083		
	24500	90.53	0.080	0.032	0.080		
	29869	91.64	0.080	0.030	0.080		
	31026	92.31	0.080	0.030	0.080		
	50000	96.82	0.080	0.029	0.080		
320	4197	81.48	0.085	0.035	0.085	0.2	0.4
	5520	81.99	0.085	0.035	0.085		
	12000	85.90	0.083	0.034	0.083		
	18605	88.64	0.083	0.033	0.083		
	24500	90.67	0.080	0.032	0.080		
	29869	91.81	0.080	0.030	0.080		
	31026	92.47	0.080	0.030	0.080		
	50000	97.04	0.080	0.029	0.080		
327	4197	81.63	0.085	0.035	0.085	0.2	0.4
	5520	82.20	0.085	0.035	0.085		
	12000	86.20	0.083	0.034	0.083		
	18605	89.01	0.083	0.033	0.083		
	24500	91.07	0.080	0.032	0.080		
	29869	92.24	0.080	0.030	0.080		
	31026	92.89	0.080	0.030	0.080		
	50000	97.49	0.080	0.029	0.080		
329	4197	81.64	0.085	0.035	0.085	1	1
	5520	82.22	0.085	0.035	0.085		
	12000	86.26	0.083	0.034	0.083		
	18605	89.10	0.083	0.033	0.083		
	24500	91.18	0.080	0.032	0.080		

	29869	92.38	0.080	0.030	0.080		
	31026	93.02	0.080	0.030	0.080		
	50000	97.71	0.080	0.029	0.080		
329.2	4197	81.64	0.085	0.035	0.085	1	1
	5520	82.22	0.085	0.035	0.085		
	12000	86.26	0.083	0.034	0.083		
	18605	89.11	0.083	0.033	0.083		
	24500	91.19	0.081	0.033	0.081		
	29869	92.39	0.081	0.033	0.081		
	31026	93.04	0.080	0.033	0.080		
	50000	97.78	0.080	0.029	0.080		
330.1	4197	81.65	0.085	0.035	0.085	1	1
	5520	82.24	0.085	0.035	0.085		
	12000	86.29	0.083	0.034	0.083		
	18605	89.14	0.083	0.033	0.083		
	24500	91.23	0.081	0.033	0.081		
	29869	92.44	0.081	0.033	0.081		
	31026	93.09	0.080	0.033	0.080		
	50000	97.83	0.080	0.029	0.080		
334.1	4197	81.71	0.085	0.035	0.085	1	1
	5520	82.32	0.085	0.035	0.085		
	12000	86.42	0.083	0.034	0.083		
	18605	89.32	0.083	0.033	0.083		
	24500	91.44	0.081	0.033	0.081		
	29869	92.70	0.081	0.033	0.081		
	31026	93.34	0.080	0.033	0.080		
	50000	98.10	0.080	0.029	0.080		
338	4197	81.74	0.085	0.035	0.085	1	1
	5520	82.37	0.085	0.035	0.085		
	12000	86.52	0.083	0.034	0.083		
	18605	89.46	0.083	0.033	0.083		
	24500	91.62	0.081	0.033	0.081		
	29869	92.92	0.081	0.033	0.081		
	31026	93.56	0.080	0.033	0.080		
	50000	98.34	0.080	0.029	0.080		
338.1	4197	81.75	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3
	5520	82.38	0.085	0.035	0.085		
	12000	86.54	0.083	0.034	0.083		
	18605	89.48	0.083	0.033	0.083		
	24500	91.65	0.081	0.033	0.081		
	29869	92.96	0.081	0.033	0.081		
	31026	93.59	0.080	0.033	0.080		
	50000	98.38	0.080	0.028	0.080		
341.1	4197	81.79	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3
	5520	82.43	0.085	0.030	0.085		
	12000	86.62	0.083	0.029	0.083		
	18605	89.60	0.083	0.028	0.083		
	24500	91.79	0.081	0.027	0.081		
	29869	93.12	0.081	0.026	0.081		

	31026	93.76	0.080	0.026	0.080		
	50000	98.57	0.080	0.025	0.080		
344.1	4197	81.83	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3
	5520	82.47	0.085	0.030	0.085		
	12000	86.70	0.083	0.029	0.083		
	18605	89.72	0.083	0.028	0.083		
	24500	91.93	0.081	0.027	0.081		
	29869	93.29	0.081	0.026	0.081		
	31026	93.91	0.080	0.026	0.080		
347.1	4197	81.87	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3
	5520	82.51	0.085	0.030	0.085		
	12000	86.77	0.083	0.029	0.083		
	18605	89.80	0.083	0.028	0.083		
	24500	92.03	0.081	0.027	0.081		
	29869	93.40	0.081	0.026	0.081		
	31026	94.02	0.080	0.026	0.080		
350.1	4197	81.96	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3
	5520	82.60	0.085	0.030	0.085		
	12000	86.87	0.083	0.029	0.083		
	18605	89.91	0.083	0.028	0.083		
	24500	92.14	0.081	0.027	0.081		
	29869	93.52	0.081	0.026	0.081		
	31026	94.13	0.080	0.026	0.080		
353.1	4197	82.05	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3
	5520	82.70	0.085	0.030	0.085		
	12000	87.00	0.083	0.029	0.083		
	18605	90.09	0.083	0.028	0.083		
	24500	92.34	0.081	0.027	0.081		
	29869	93.76	0.081	0.026	0.081		
	31026	94.37	0.080	0.026	0.080		
355.1	4197	82.12	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3
	5520	82.77	0.085	0.030	0.085		
	12000	87.10	0.083	0.029	0.083		
	18605	90.20	0.083	0.028	0.083		
	24500	92.46	0.081	0.027	0.081		
	29869	93.88	0.081	0.026	0.081		
	31026	94.48	0.080	0.026	0.080		
357.1	4197	82.15	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3
	5520	82.81	0.085	0.030	0.085		
	12000	87.17	0.083	0.029	0.083		
	18605	90.30	0.083	0.028	0.083		
	24500	92.59	0.081	0.027	0.081		
	29869	94.04	0.081	0.026	0.081		
	31026	94.64	0.080	0.026	0.080		
360.1	4197	82.20	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3
	5520	82.86	0.085	0.030	0.085		
	12000	87.28	0.083	0.029	0.083		
	18605	90.43	0.083	0.028	0.083		
	24500	92.73	0.081	0.027	0.081		

364.1	29869	94.20	0.081	0.026	0.081	0.1	0.3			
	31026	94.79	0.080	0.026	0.080					
	4197	82.57	0.085	0.035	0.085					
	5520	83.19	0.085	0.030	0.085					
	12000	87.52	0.083	0.029	0.083					
	18605	90.65	0.083	0.028	0.083					
	24500	92.92	0.081	0.027	0.081					
	29869	94.39	0.081	0.026	0.081					
	31026	94.97	0.080	0.026	0.080					
	4197	82.96	0.085	0.035	0.085					
369	5520	83.55	0.085	0.030	0.085	0.1	0.3			
	12000	87.86	0.083	0.029	0.083					
	18605	90.97	0.083	0.028	0.083					
	24500	93.23	0.081	0.027	0.081					
	29869	94.71	0.081	0.026	0.081					
	31026	95.28	0.080	0.026	0.080					
	4197	83.12	0.085	0.045	0.085					
	5520	83.69	0.085	0.040	0.085					
	12000	87.92	0.083	0.033	0.083					
	18605	91.01	0.083	0.030	0.083			0.1	0.3	
370.1	24500	93.27	0.081	0.030	0.081					
	29869	94.74	0.081	0.029	0.081					
	31026	95.30	0.080	0.029	0.080					
	4197	83.45	0.085	0.045	0.085					
	5520	84.02	0.085	0.040	0.085					
	12000	88.10	0.083	0.033	0.083					
	372	18605	91.15	0.083	0.030	0.083	0.1			0.3
		24500	93.39	0.081	0.030	0.081				
		29869	94.88	0.081	0.029	0.081				
		31026	95.43	0.080	0.029	0.080				
4197		84.36	0.085	0.045	0.085					
5520		84.86	0.085	0.040	0.085					
12000		88.44	0.083	0.033	0.083					
374.1		18605	91.37	0.083	0.030	0.083		0.1	0.3	
		24500	93.60	0.081	0.030	0.081				
		29869	95.08	0.081	0.029	0.081				
	31026	95.62	0.080	0.029	0.080					
	4197	84.64	0.085	0.045	0.085					
	5520	85.16	0.085	0.040	0.085					
	12000	88.62	0.083	0.033	0.083					
	375	18605	91.48	0.083	0.030	0.083	0.1			0.3
		24500	93.68	0.081	0.030	0.081				
		29869	95.15	0.081	0.029	0.081				
31026		95.69	0.080	0.029	0.080	0.1		0.3		
376.1		4197	84.81	0.085	0.035				0.085	
		5520	85.32	0.085	0.030				0.085	
		12000	88.70	0.083	0.029				0.083	
		18605	91.53	0.083	0.028				0.083	
		24500	93.72	0.081	0.027				0.081	

378.1	29869	95.18	0.081	0.026	0.081	0.1	0.3		
	31026	95.72	0.080	0.026	0.080				
	4197	85.41	0.085	0.035	0.085				
	5520	85.94	0.085	0.030	0.085				
	12000	89.15	0.083	0.029	0.083				
	18605	91.90	0.083	0.028	0.083				
	24500	94.03	0.081	0.027	0.081				
	29869	95.49	0.081	0.026	0.081				
	31026	96.00	0.080	0.026	0.080				
	4197	85.54	0.085	0.035	0.085				
380.1	5520	86.08	0.085	0.030	0.085	0.1	0.3		
	12000	89.33	0.083	0.029	0.083				
	18605	92.07	0.083	0.028	0.083				
	24500	94.19	0.081	0.027	0.081				
	29869	95.65	0.081	0.026	0.081				
	31026	96.15	0.080	0.026	0.080				
	4197	85.66	0.085	0.035	0.085				
	5520	86.20	0.085	0.030	0.085				
	12000	89.53	0.083	0.029	0.083				
	18605	92.30	0.083	0.028	0.083				
383.1	24500	94.45	0.081	0.027	0.081	0.1	0.3		
	29869	95.92	0.081	0.026	0.081				
	31026	96.41	0.080	0.026	0.080				
	4197	85.74	0.085	0.035	0.085				
	5520	86.30	0.085	0.030	0.085				
	12000	89.68	0.083	0.029	0.083				
	18605	92.49	0.083	0.028	0.083				
	24500	94.65	0.081	0.027	0.081				
	29869	96.14	0.081	0.026	0.081				
	31026	96.63	0.080	0.026	0.080				
385.1	4197	85.77	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3		
	5520	86.34	0.085	0.030	0.085				
	12000	89.77	0.083	0.029	0.083				
	18605	92.61	0.083	0.028	0.083				
	24500	94.78	0.081	0.027	0.081				
	29869	96.30	0.081	0.026	0.081				
	31026	96.78	0.080	0.026	0.080				
	4197	85.77	0.085	0.035	0.085				
	5520	86.33	0.085	0.030	0.085				
	12000	89.82	0.083	0.029	0.083				
387.1	18605	92.70	0.083	0.028	0.083	0.1	0.3		
	24500	94.89	0.081	0.027	0.081				
	29869	96.40	0.081	0.026	0.081				
	31026	96.89	0.080	0.026	0.080				
	4197	85.87	0.085	0.035	0.085			0.1	0.3
	5520	86.45	0.085	0.030	0.085				
	12000	89.98	0.083	0.029	0.083				
	18605	92.88	0.083	0.028	0.083				
	24500	95.07	0.081	0.027	0.081				

394.1	29869	96.60	0.081	0.026	0.081	0.1	0.3			
	31026	97.08	0.080	0.026	0.080					
	4197	85.87	0.085	0.035	0.085					
	5520	86.45	0.085	0.030	0.085					
	12000	90.01	0.083	0.029	0.083					
	18605	92.92	0.083	0.028	0.083					
	24500	95.12	0.081	0.027	0.081					
	29869	96.66	0.081	0.026	0.081					
	31026	97.14	0.080	0.026	0.080					
	4197	85.98	0.085	0.035	0.085					
396	5520	86.60	0.085	0.030	0.085	0.1	0.3			
	12000	90.23	0.083	0.029	0.083					
	18605	93.19	0.083	0.028	0.083					
	24500	95.41	0.081	0.027	0.081					
	29869	96.99	0.081	0.026	0.081					
	31026	97.46	0.080	0.026	0.080					
	4197	86.00	0.085	0.035	0.085					
	5520	86.62	0.085	0.030	0.085					
	12000	90.25	0.083	0.029	0.083					
	18605	93.20	0.083	0.028	0.083					
397.6	24500	95.41	0.081	0.027	0.081	0.1	0.3			
	29869	96.97	0.081	0.026	0.081					
	31026	97.44	0.080	0.026	0.080					
	4197	86.10	0.085	0.035	0.085					
	5520	86.74	0.085	0.030	0.085					
	12000	90.50	0.083	0.029	0.083					
	18605	93.49	0.083	0.028	0.083					
	24500	95.73	0.081	0.027	0.081					
	29869	97.34	0.081	0.026	0.081					
	31026	97.81	0.080	0.026	0.080					
398	4197	86.76	0.085	0.045	0.085	0.1	0.3			
	5520	87.30	0.085	0.040	0.085					
	12000	91.57	0.083	0.037	0.083					
	18605	94.42	0.083	0.035	0.083					
	24500	96.49	0.081	0.033	0.081					
	29869	98.07	0.081	0.031	0.081					
	31026	98.48	0.080	0.030	0.080					
	4197	87.58	0.085	0.035	0.085					
	5520	88.31	0.085	0.030	0.085					
	12000	92.11	0.083	0.029	0.083					
405	18605	94.85	0.083	0.028	0.083	0.1	0.3			
	24500	96.86	0.081	0.027	0.081					
	29869	98.39	0.081	0.026	0.081					
	31026	98.78	0.080	0.026	0.080					
	4197	87.59	0.085	0.035	0.085					
	5520	88.32	0.085	0.030	0.085					
	12000	92.13	0.083	0.029	0.083					
	18605	94.88	0.083	0.028	0.083					
	24500	96.88	0.081	0.027	0.081					
	405.5	29869	98.39	0.081	0.026			0.081	0.1	0.3
31026		98.78	0.080	0.026	0.080					
4197		87.59	0.085	0.035	0.085					
5520		88.32	0.085	0.030	0.085					
12000		92.13	0.083	0.029	0.083					
18605		94.88	0.083	0.028	0.083					
24500		96.88	0.081	0.027	0.081					
406.6		29869	98.39	0.081	0.026	0.081	0.1	0.3		
		31026	98.78	0.080	0.026	0.080				
		4197	87.59	0.085	0.035	0.085				
	5520	88.32	0.085	0.030	0.085					
	12000	92.13	0.083	0.029	0.083					
	18605	94.88	0.083	0.028	0.083					
	24500	96.88	0.081	0.027	0.081					

407.1	29869	98.42	0.081	0.026	0.081	0.1	0.3
	31026	98.81	0.080	0.026	0.080		
	4197	87.60	0.085	0.035	0.085		
	5520	88.34	0.085	0.030	0.085		
	12000	92.17	0.083	0.029	0.083		
	18605	94.94	0.083	0.028	0.083		
408.3	24500	96.97	0.081	0.027	0.081	0.1	0.3
	29869	98.52	0.081	0.026	0.081		
	31026	98.91	0.080	0.026	0.080		
	4197	87.60	0.085	0.035	0.085		
	5520	88.33	0.085	0.030	0.085		
	12000	92.15	0.083	0.029	0.083		
409.4	18605	94.91	0.083	0.028	0.083	0.1	0.3
	24500	96.93	0.081	0.027	0.081		
	29869	98.47	0.081	0.026	0.081		
	31026	98.86	0.080	0.026	0.080		
	4197	87.62	0.085	0.035	0.085		
	5520	88.37	0.085	0.030	0.085		
411.1	12000	92.21	0.083	0.029	0.083	0.1	0.3
	18605	95.00	0.083	0.028	0.083		
	24500	97.03	0.081	0.027	0.081		
	29869	98.59	0.081	0.026	0.081		
	31026	98.98	0.080	0.026	0.080		
	4197	87.59	0.085	0.035	0.085		
412.6	5520	88.35	0.085	0.030	0.085	0.1	0.3
	12000	92.25	0.083	0.029	0.083		
	18605	95.03	0.083	0.028	0.083		
	24500	97.06	0.081	0.027	0.081		
	29869	98.61	0.081	0.026	0.081		
	31026	99.00	0.080	0.026	0.080		
413.4	4197	87.85	0.085	0.035	0.085	0.1	0.3
	5520	88.58	0.085	0.030	0.085		
	12000	92.40	0.083	0.029	0.083		
	18605	95.15	0.083	0.028	0.083		
	24500	97.15	0.081	0.027	0.081		
	29869	98.69	0.081	0.026	0.081		
414.8	31026	99.07	0.080	0.026	0.080	0.1	0.3
	4197	87.87	0.085	0.035	0.085		
	5520	88.61	0.085	0.030	0.085		
	12000	92.46	0.083	0.029	0.083		
	18605	95.22	0.083	0.028	0.083		
	24500	97.23	0.081	0.027	0.081		
414.8	29869	98.78	0.081	0.026	0.081	0.1	0.3
	31026	99.16	0.080	0.026	0.080		
	4197	87.87	0.085	0.035	0.085		
	5520	88.59	0.085	0.030	0.085		
	12000	92.45	0.083	0.029	0.083		
	18605	95.25	0.083	0.028	0.083		
	24500	97.27	0.081	0.027	0.081		

415.7	29869	98.81	0.081	0.026	0.081	0.1	0.3
	31026	99.19	0.080	0.026	0.080		
	4197	87.97	0.085	0.035	0.085		
	5520	88.70	0.085	0.030	0.085		
	12000	92.60	0.083	0.029	0.083		
	18605	95.42	0.083	0.028	0.083		
	24500	97.44	0.081	0.027	0.081		
	29869	98.98	0.081	0.026	0.081		
	31026	99.36	0.080	0.026	0.080		
	4197	88.03	0.085	0.035	0.085		
416.8	5520	88.77	0.085	0.030	0.085	0.1	0.3
	12000	92.70	0.083	0.029	0.083		
	18605	95.52	0.083	0.028	0.083		
	24500	97.55	0.081	0.027	0.081		
	29869	99.10	0.081	0.026	0.081		
	31026	99.48	0.080	0.026	0.080		
	4197	88.05	0.085	0.035	0.085		
	5520	88.79	0.085	0.030	0.085		
	12000	92.74	0.083	0.029	0.083		
	18605	95.58	0.083	0.028	0.083		
418.1	24500	97.61	0.081	0.027	0.081	0.1	0.3
	29869	99.17	0.081	0.026	0.081		
	31026	99.54	0.080	0.026	0.080		

ANEXO 3

Tabla A.3.1: Muestreos de caudal sólido y composición del sedimento por tamaño

Fecha	Q m ³ /s	C ppm	Qss t/día	Qst t/día	Qst/Qss	Sólidos suspensión (%)			Sólidos del lecho (%)		
						Arcilla	Limo	Arena	Arcilla	Limo	Arena
15/05/2002	21698	520	974567								
17/05/2002	21177	636	1164563								
21/05/2002	19468	576	968095								
01/11/2003	4701	601	244276	249592	1.022	25.5	71.1	3.4	2.7	27.3	70.0
27/01/2004	22711	1245	2443540	2560993	1.048	30.3	67.3	2.4			
03/02/2004	30372	1086	2848760	2968682	1.042	28.7	68.0	3.3			
10/02/2004	27820	535	1285705	1386947	1.079	23.0	72.5	4.5			
16/02/2004	29351	3506	8889566	9210329	1.036	25.5	73.4	1.1			
20/02/2004	32496	271	7608490	7923098	1.041	27.7	71.4	0.9			
02/03/2004	33672	1342	3904473	4214942	1.080	12.9	86.2	0.9			
09/03/2004	23877	1228	2533908	2626446	1.037	32.1	65.5	2.4			
15/03/2004	23527	2172	4414629			16.0	71.2	12.8			
19/03/2004	30128	632	1643851	1648834	1.003	19.8	73.7	6.5	4.0	15.3	80.7
25/03/2004	31252	713	1925748	2058831	1.069	16.8	72.8	10.4	0.0	0.9	99.1
31/03/2004	32682	946	2671242	2697488	1.010	18.8	74.7	6.5	3.9	18.0	78.1
06/04/2004	27879	680	1637972			24.8	66.9	8.3	2.1	12.7	85.2
15/04/2004	23840	534	1099310			23.5	61.9	14.6			
21/04/2004	26372	635	1446179			31.6	59.5	8.9	2.2	11.8	86.0
27/04/2004	31674	802	2193434	2321485	1.058	22.1	65.7	12.2	0.0	1.3	98.7
04/05/2004	27372	731	1728795			26.8	60.9	12.3	2.3	12.4	85.3
11/05/2004	21723	654	1227281	1328256	1.082	21.7	58.6	19.7	2.9	11.4	85.7
18/05/2004	19882	539	925049	939440	1.016	23.9	59.6	16.5	0.0	0.3	99.7
26/05/2004	19101	428	706822	774367	1.096	20.4	59.2	20.4	0.0	4.8	95.2
01/06/2004	20489	593	1049584	1140582	1.087	21.3	58.6	20.1	0.0	2.8	97.2
10/06/2004	15126	299	390113	427021	1.095	23.8	57.4	18.8	0.0	2.3	97.7
15/06/2004	13736	292	346895	376797	1.086	24.5	60.3	15.2	0.0	1.0	99.0
22/06/2004	12644	318	347617	377364	1.086	26.2	59.0	14.8	0.0	2.3	97.7
29/06/2004	10315	245	218534	227584	1.041	32.6	51.3	16.1	0.4	5.8	93.8
06/07/2004	10085	342	298246	314830	1.056	27.4	62.5	10.1	0.0	2.3	97.7
14/07/2004	7469	214	137783	144849	1.051	31.8	55.8	12.4	0.0	2.5	97.5
20/07/2004	8889	230	176722	187955	1.064	29.9	54.3	15.8	0.0	1.9	98.1
28/07/2004	6599	277	158164	160340	1.014	45.5	47.1	7.4	2.3	13.0	84.7
07/08/2004	9424	205	166756	182090	1.092	25.1	54.2	20.7	0.3	5.3	94.4
10/08/2004	8297	223	159650	167798	1.051	40.8	49.9	9.3	0.0	3.3	96.7
17/08/2004	5455	194	91532	93999	1.027	45.7	50.4	3.9			
24/08/2004	4671	121	48998			25.8	71.1	3.1	1.1	8.0	90.9
31/08/2004	4536	115	44956	49082	1.092	8.3	86.0	5.7	2.3	15.2	82.5
08/09/2004	4664	159	64107			45.7	52.0	2.3	3.0	13.6	83.4
Promedio aritmético					1.056	26.5	63.7	9.8	1.2	7.8	91.0

Q=caudal líquido, C=concentración, Qss=caudal sólido en suspensión, Qst=caudal sólido total
Fuente: Furnas-Odebrecht (2005)

Tabla A.3.2: Granulometría del material del lecho según los estudios de EIA

Fecha	% que pasa por el tamiz de tamaño (mm)									
	0.016	0.062	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16
19/03/2004	7.7	19.3	26.7	79.8	98.2	99.5	99.8	100	100	100
25/03/2004	0	0.9	8.7	58.8	95.2	99.2	99.8	99.9	100	100
31/03/2004	9.3	21.9	26.1	60.3	92.4	97.2	99.1	99.7	100	100
06/04/2004	5.9	14.8	22.8	49.4	91.5	97	98.7	99.4	99.6	100
21/04/2004	6.1	14	18.6	42.3	87.6	98.7	99.8	100	100	100
27/04/2004	0	1.3	18.8	56	85.6	96.7	99.5	100	100	100
04/05/2004	6.1	14.7	17.2	32	79.5	92.5	97.2	98.7	99.1	100
11/05/2004	7.1	14.3	25.4	52.8	91.6	97.7	99.3	99.9	100	100
18/05/2004	0	0.3	5	42.2	98.2	99.8	99.9	100	100	100
26/05/2004	0	4.8	22.1	66.1	94.5	99.2	99.9	100	100	100
01/06/2004	0	2.8	29.4	94.5	99.7	99.9	100	100	100	100
10/06/2004	0	2.3	15.9	55.9	84.8	94	97.5	99.5	100	100
15/06/2004	0	1	13.5	66.8	88.6	96.9	99.2	99.9	100	100
22/06/2004	0	2.3	18.6	79.2	97.6	99	100	100	100	100
29/06/2004	0.9	6.2	21.1	83.8	97.2	99	99.5	99.9	100	100
23/09/2004	3.9	16.3	38	90.5	98.7	99.5	99.8	100	100	100
27/09/2004	5	20.5	43.8	83	97.3	98.5	99.2	100	100	100
05/10/2004	2.1	11.2	29.7	77.7	96.5	98.6	99.6	100	100	100
19/10/2004	11.3	29.7	52.1	84.4	98	99.3	99.8	100	100	100
25/10/2004	5.9	21.3	38.4	84	98.8	99.8	100	100	100	100
03/11/2004	7.6	22	42	83.5	97.8	99.1	99.6	100	100	100
08/11/2004	8.5	24.2	38.3	86.1	98.1	99.4	99.9	100	100	100
17/11/2004	4.7	16.4	38.9	90.5	98.7	99.6	99.9	100	100	100
25/11/2004	5.2	14.7	35.7	91.2	99.3	99.8	99.9	100	100	100
02/12/2004	0	0.7	17.9	90.8	99	99.6	99.8	99.9	100	100
07/12/2004	0	0.5	8.3	76	98.2	99.1	99.5	99.8	100	100
Promedio	3.74	11.48	25.88	71.45	94.72	98.41	99.47	99.87	99.95	100.0

Fuente: Furnas-Odebrecht (2005)