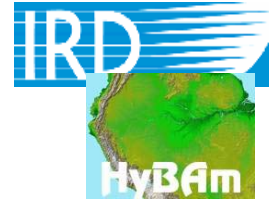




Instituto de Hidráulica e Hidrología



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 Guayamerín, 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.

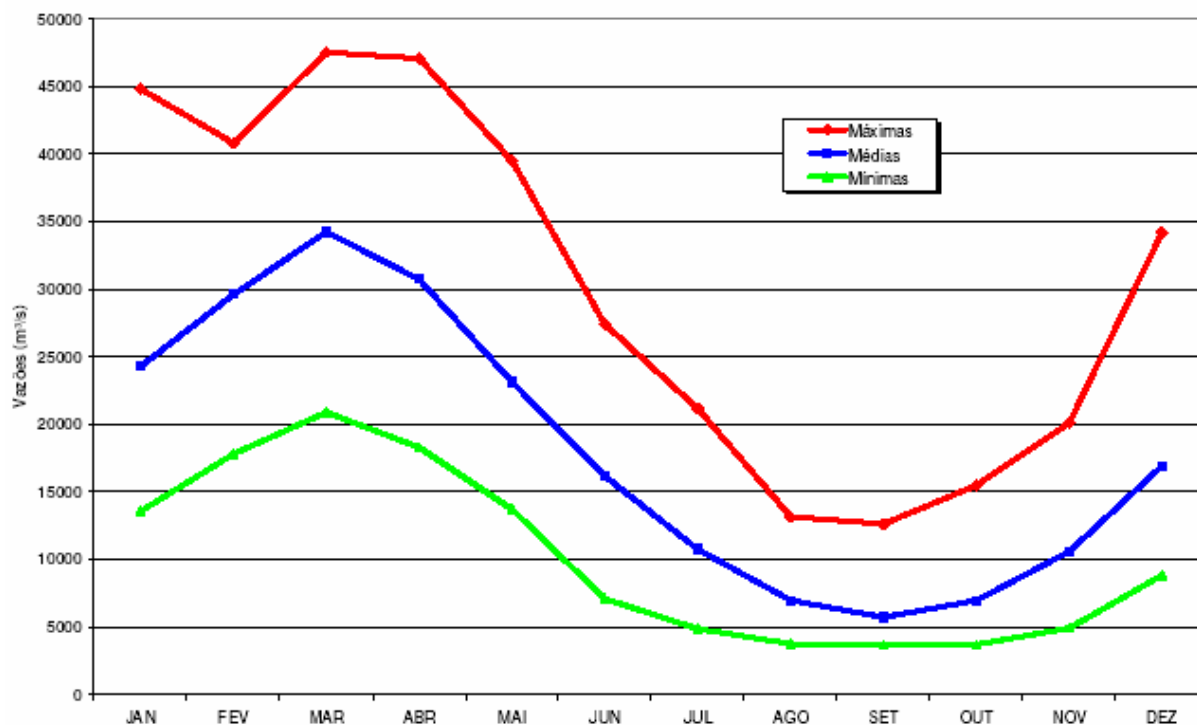
Tabla 2.1: Caudales medios mensuales de los ríos Mamoré y Madera

| 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

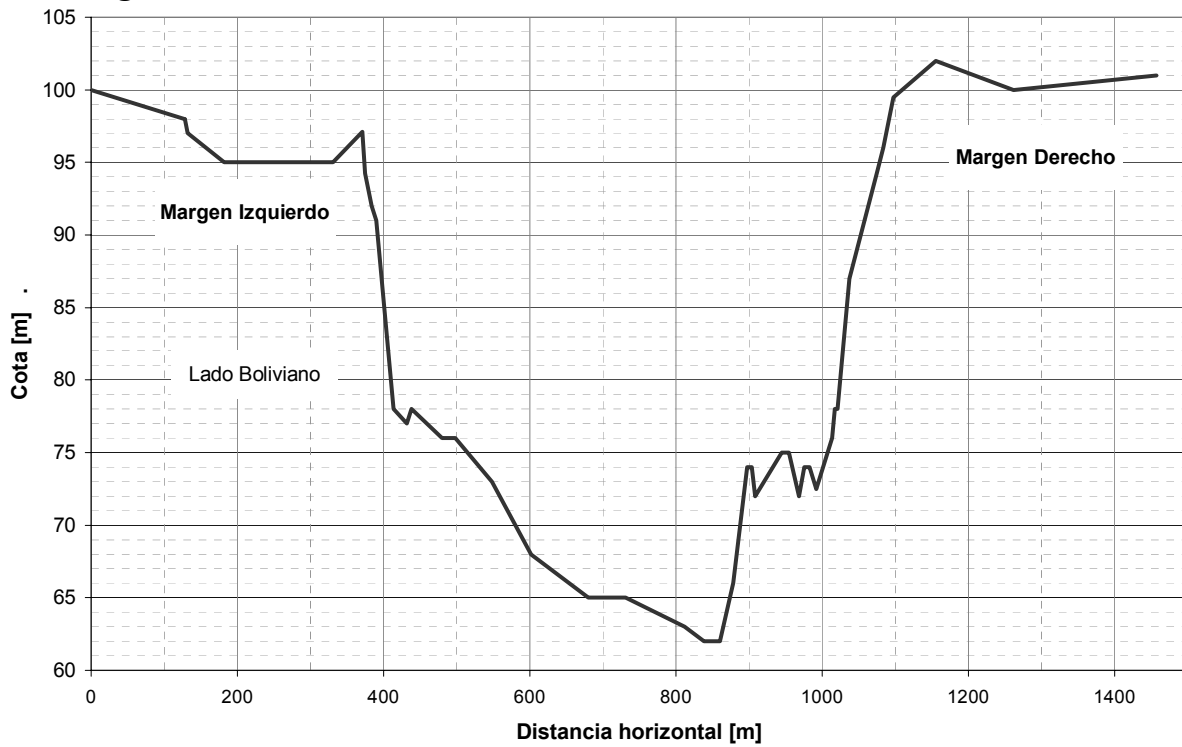


Fotos: J. Molina

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

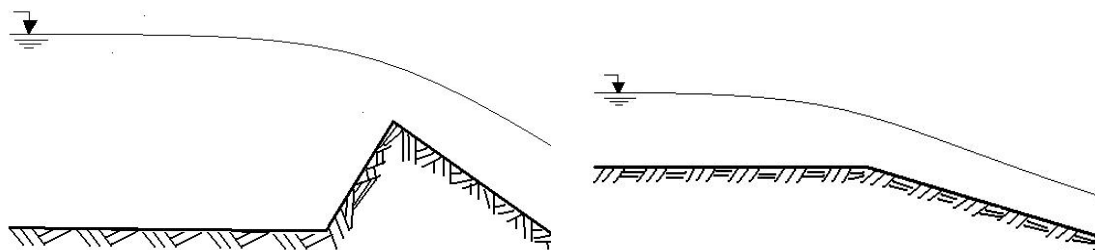


Foto: J. Molina

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.

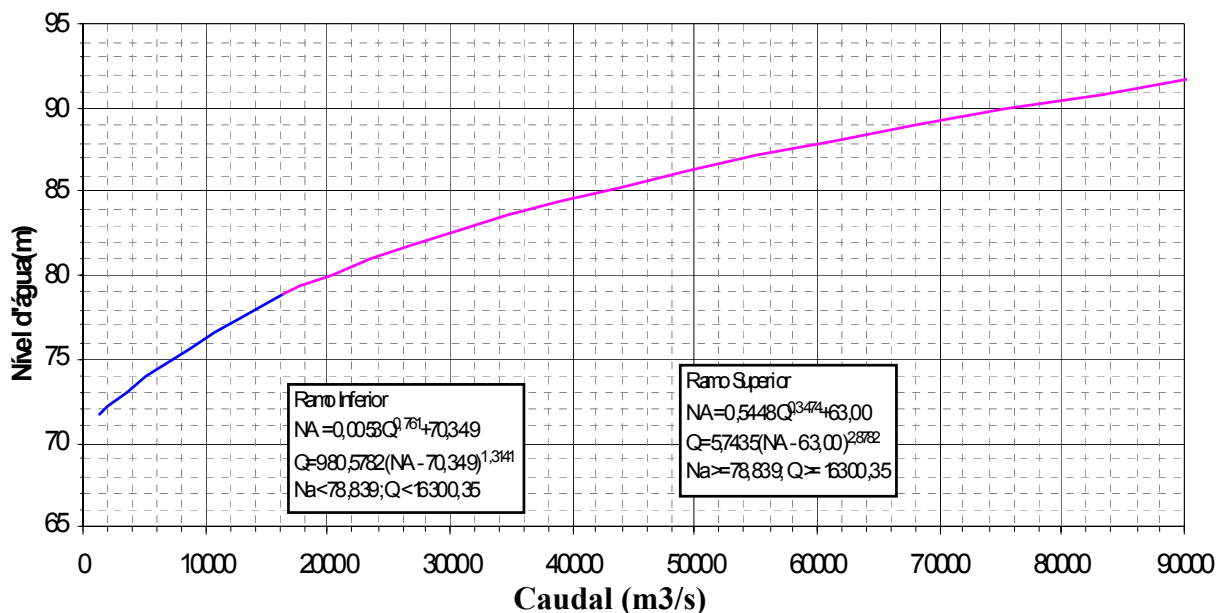
En el Anexo 1 se muestran también en forma gráfica varias secciones representativas o de interés del tramo Jirau-Cachuela Madera, en forma de coordenadas X, Z. Los valores siguen el formato HEC-RAS, en que el valor X se calcula a partir de la margen izquierda de la sección.

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)

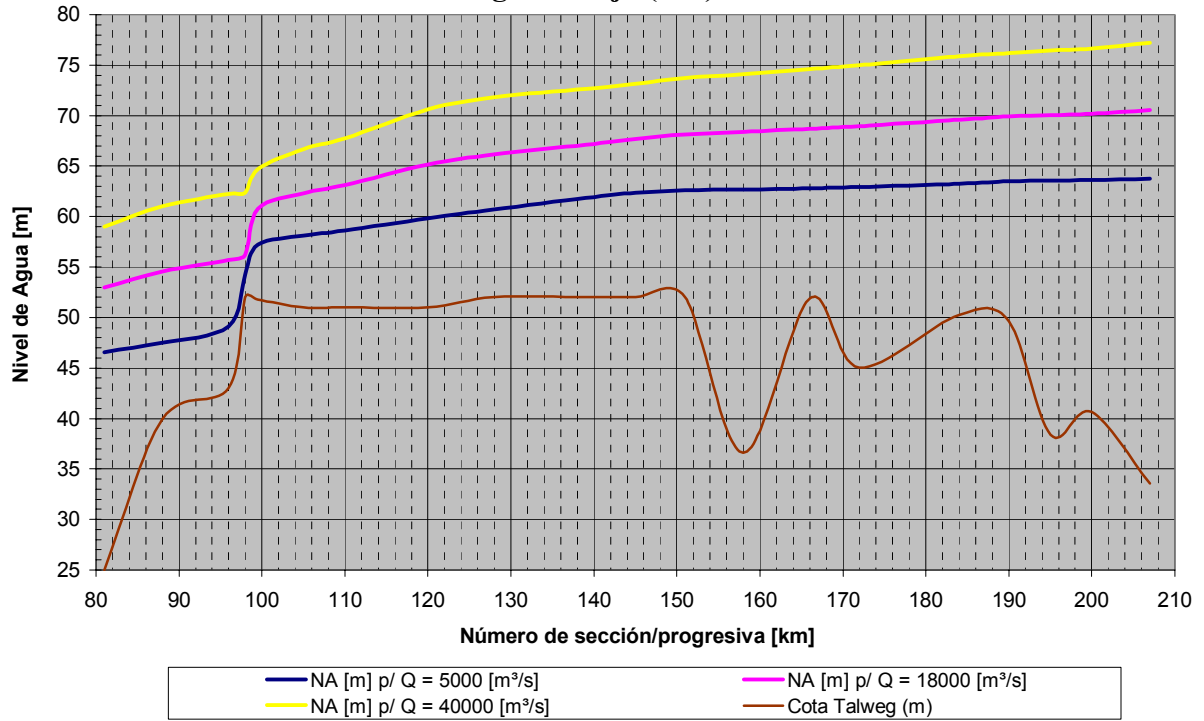
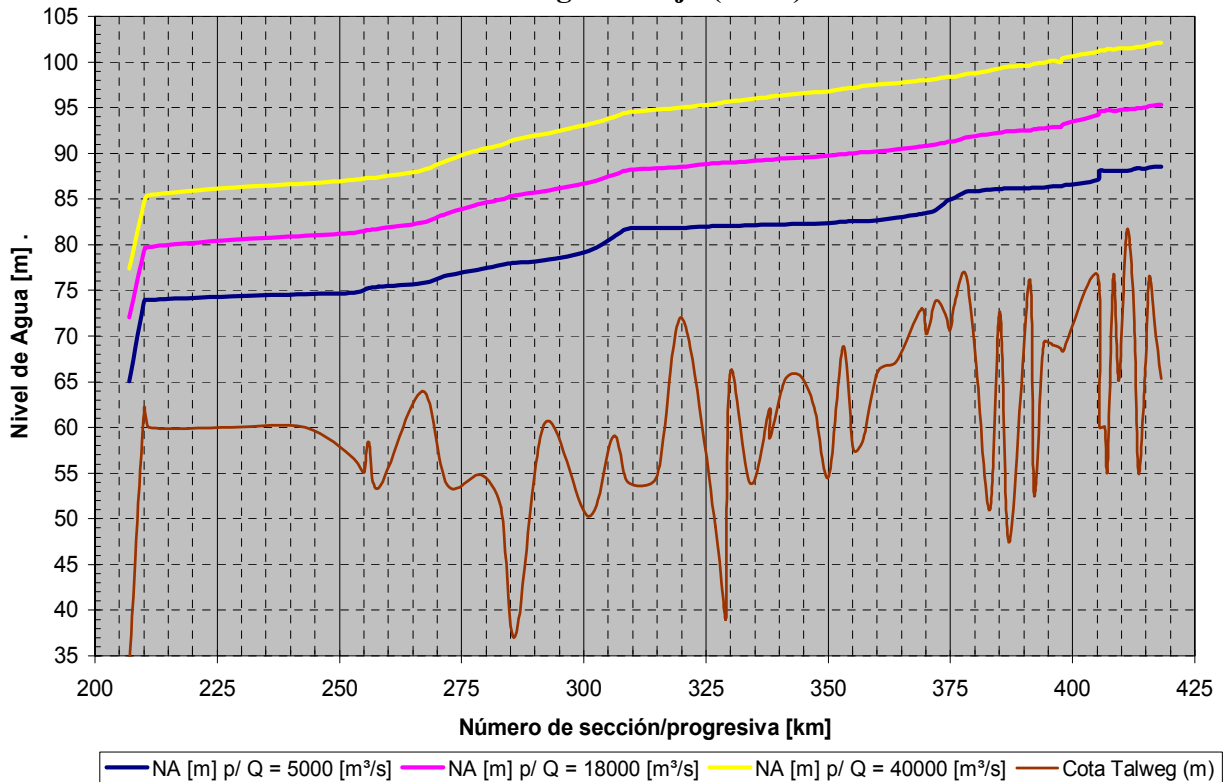


Figura 3.3: Perfil hidráulico entre secciones de Jirau aguas abajo (207) y cachuela Madera aguas abajo (418.1)



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 la localidad 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

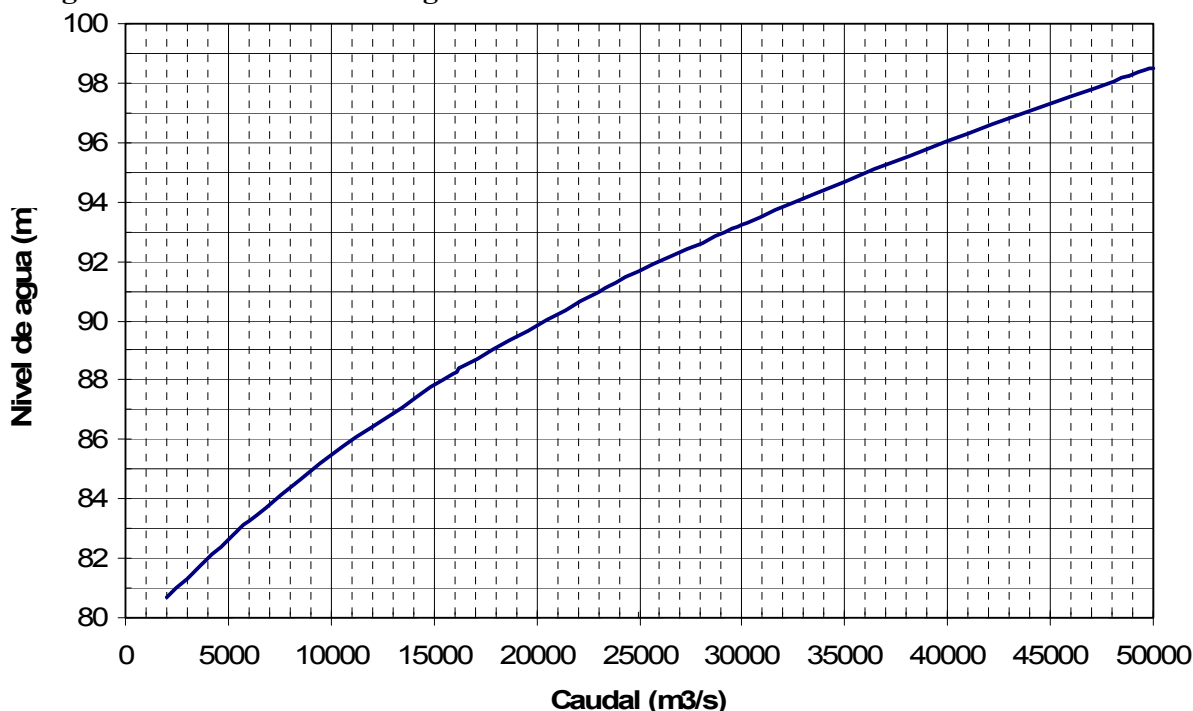
| Variable | Unidad | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|----------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Caudal | (Milm3/s) | 23.9 | 29.1 | 33.6 | 30.2 | 22.7 | 15.9 | 10.6 | 6.8 | 5.6 | 6.8 | 10.4 | 16.6 |
| 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)

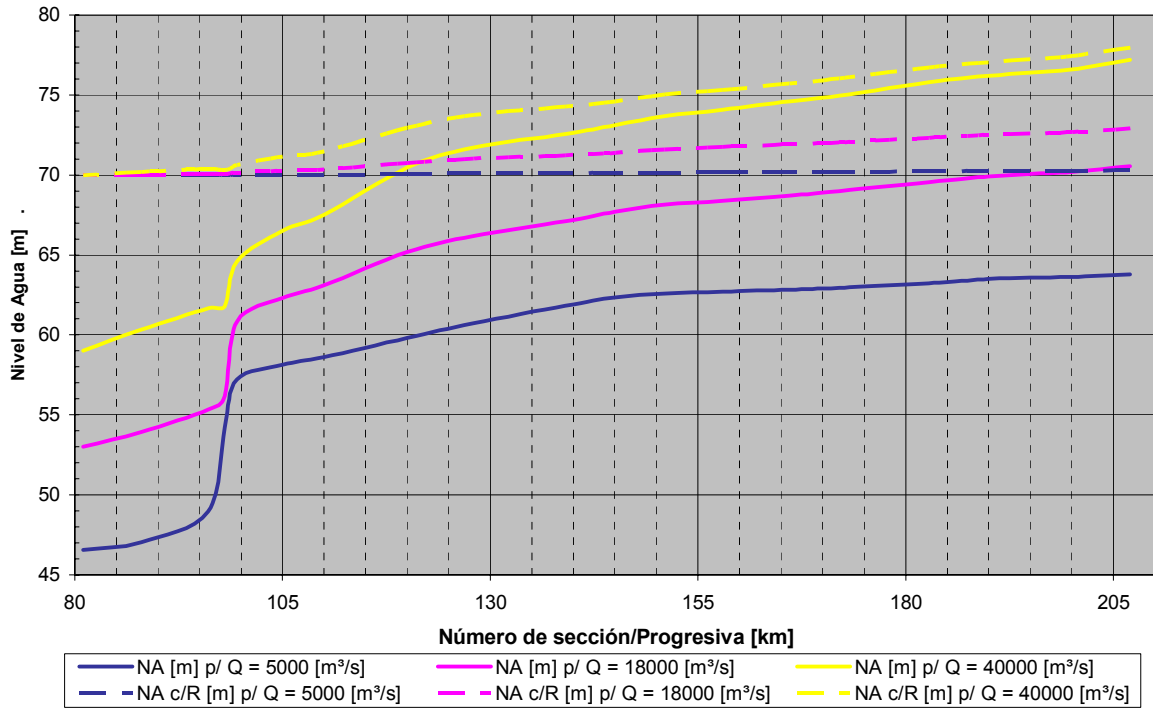
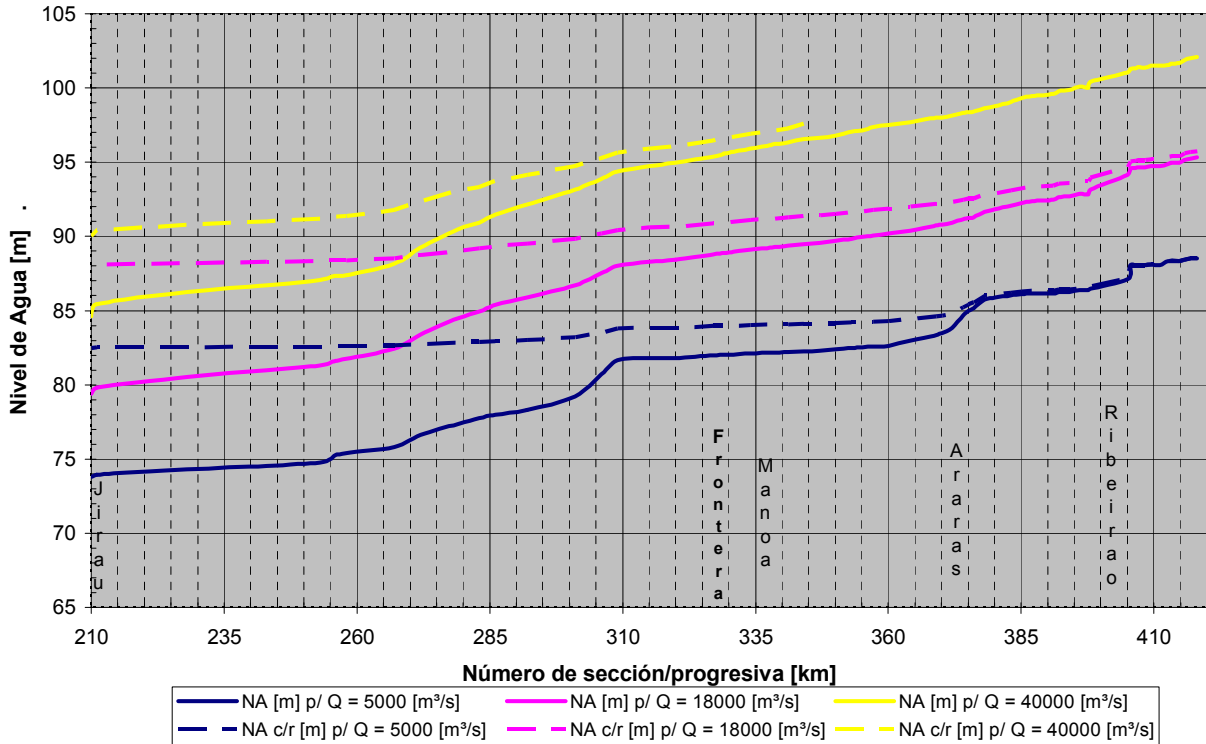


Figura 3.10: Perfil de la línea de agua entre Jirau (210) y cachuela Madera aguas abajo (418.1)



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

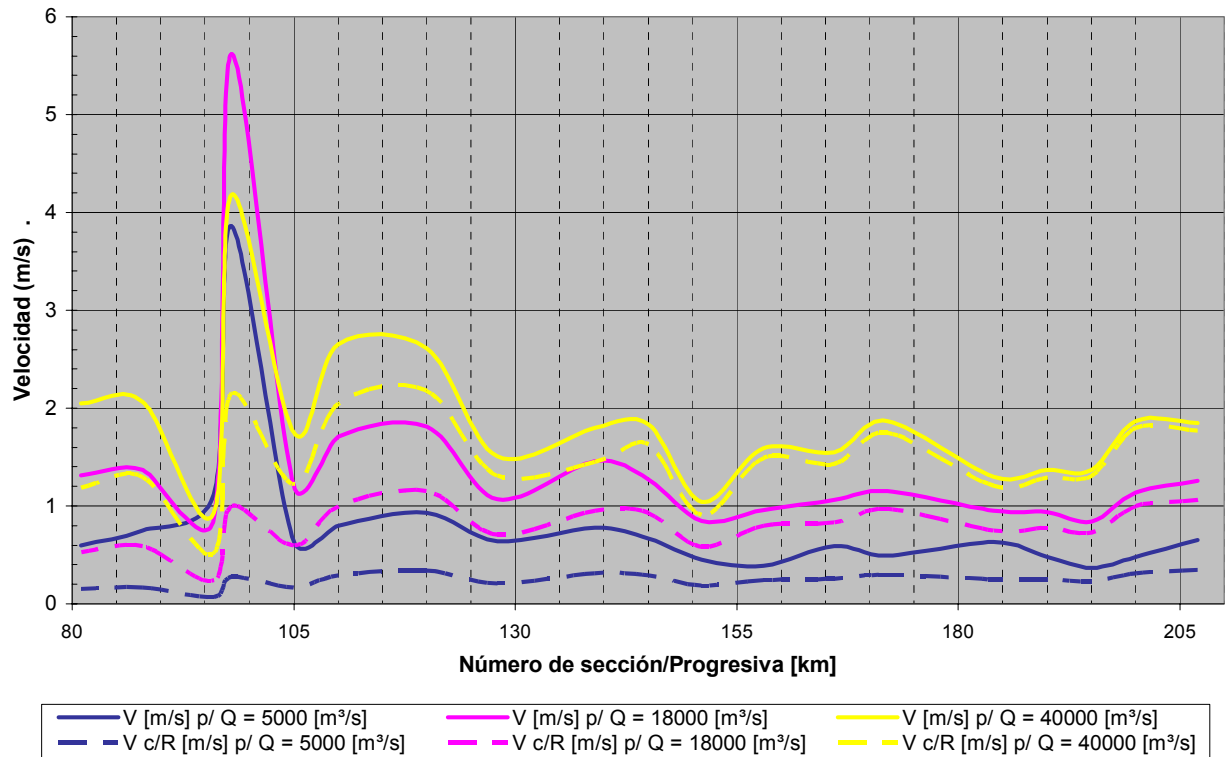
| Seccion | Q = 5000 [m³/s] | | | | Q = 18000 [m³/s] | | | | Q = 40000 [m³/s] | | | |
|---------|-----------------|------------|---------|-------------|------------------|------------|---------|-------------|------------------|------------|---------|-------------|
| | NA [m] | NA c/R [m] | V [m/s] | 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

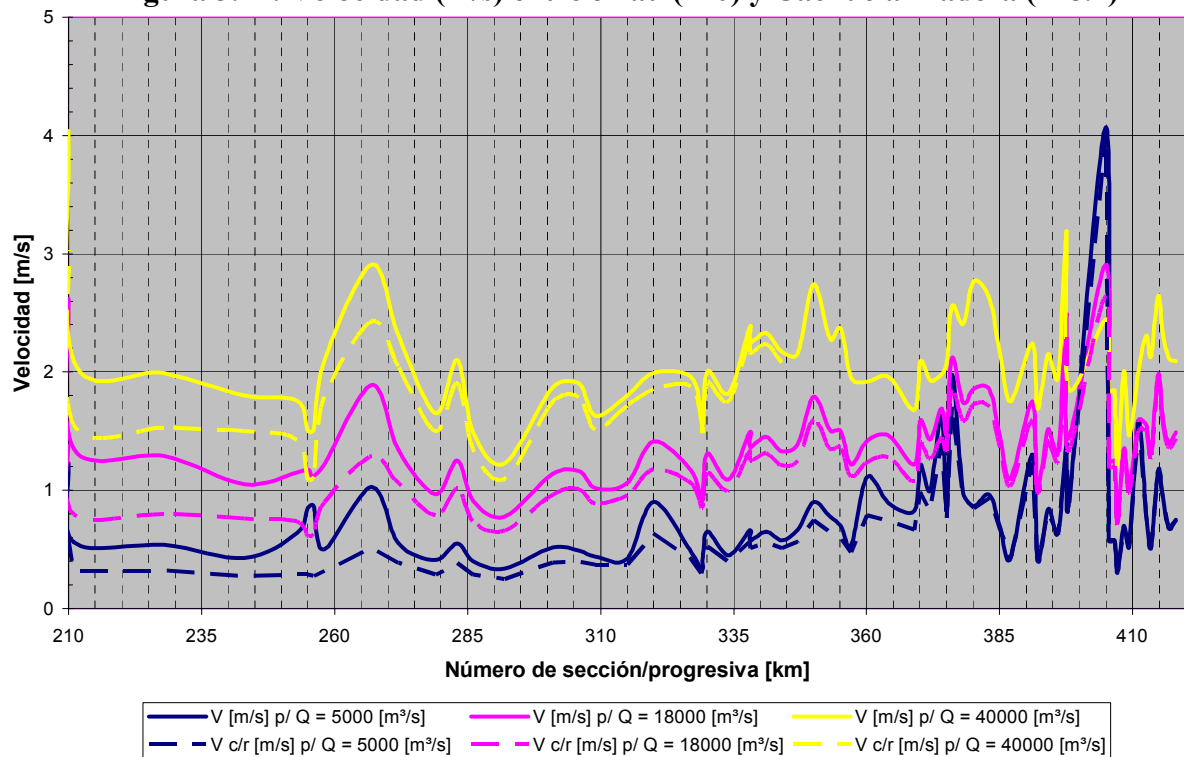
V c/R (m/s)= Velocidad de flujo con represa

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

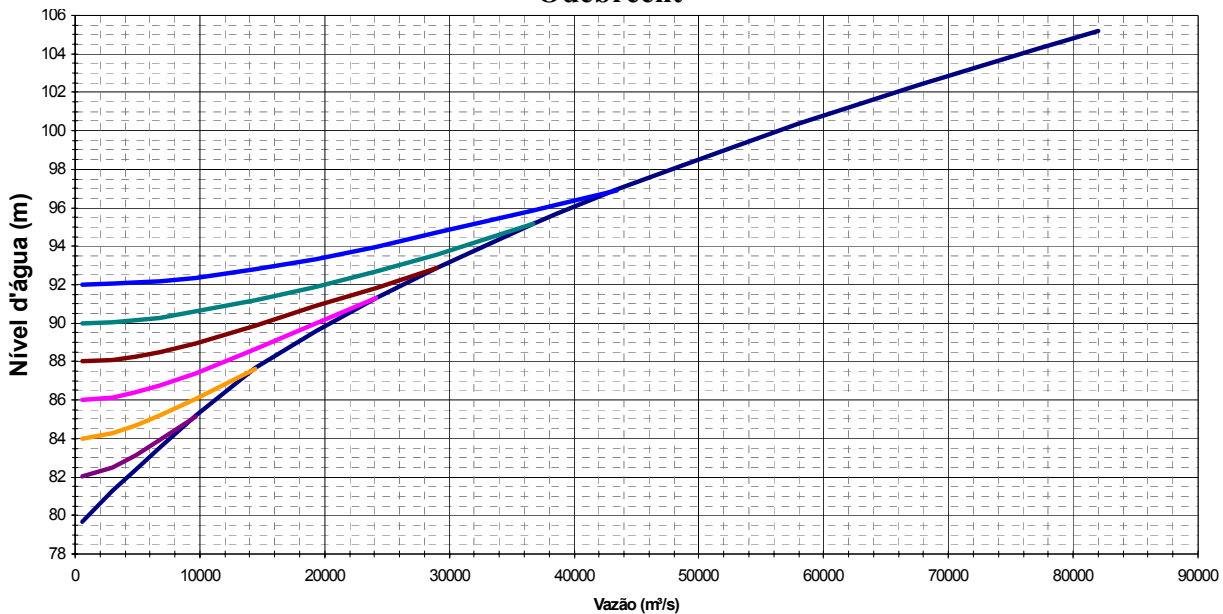
| Seção | Vazão (m³/s) | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 5600 | 6800 | 10600 | 10400 | 15900 | 16600 | 22700 | 23900 | 29100 | 30200 | 33600 | 48800 | 60200 | 71400 | 82600 |
| | 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.

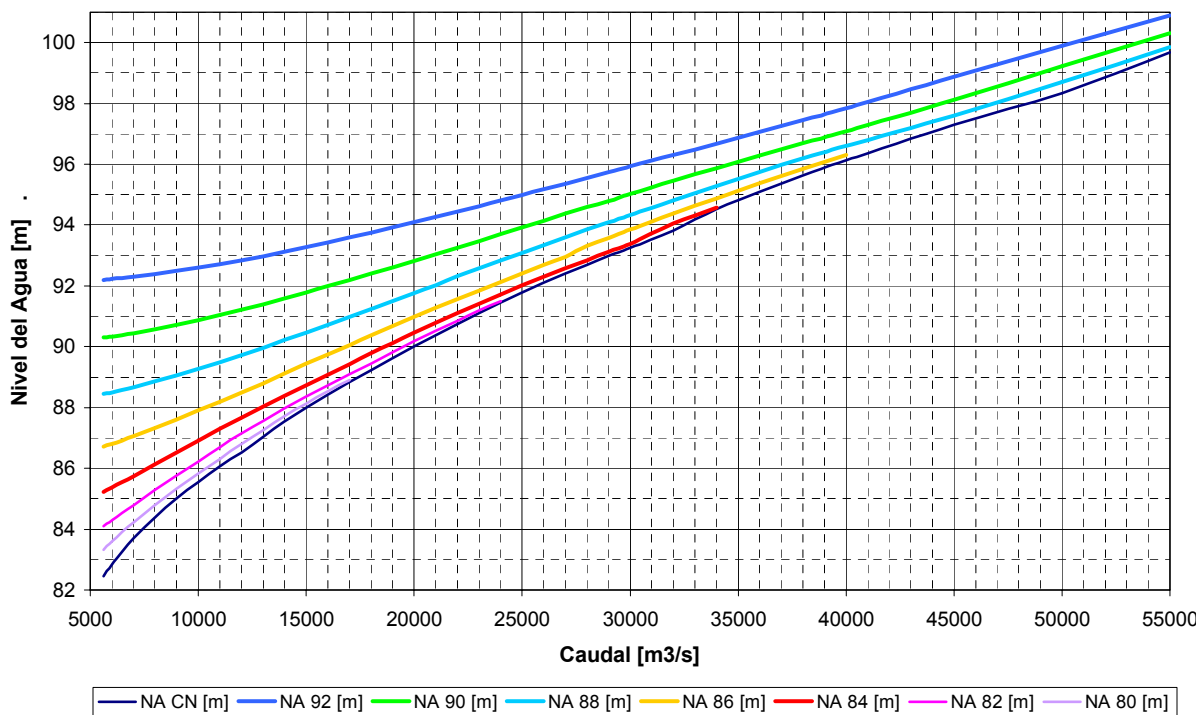
Como se observa en las figuras 3.13 y 3.14, las diferencias son significativas. Un análisis de los estudios brasileños mostró que esa diferencia se debe principalmente a la disminución del coeficiente de rugosidad n (ver figura 3.15), en un valor casi constante de 0.005-0.006 para todas las secciones 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



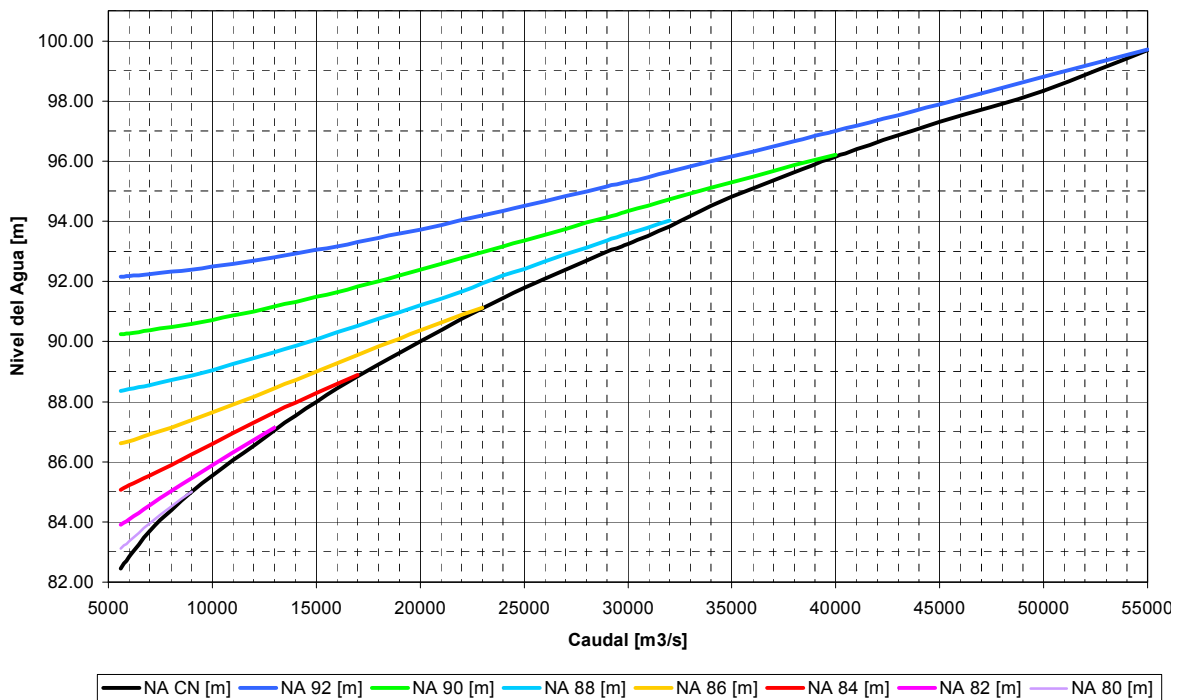
Fuente: Elaboración propia

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.

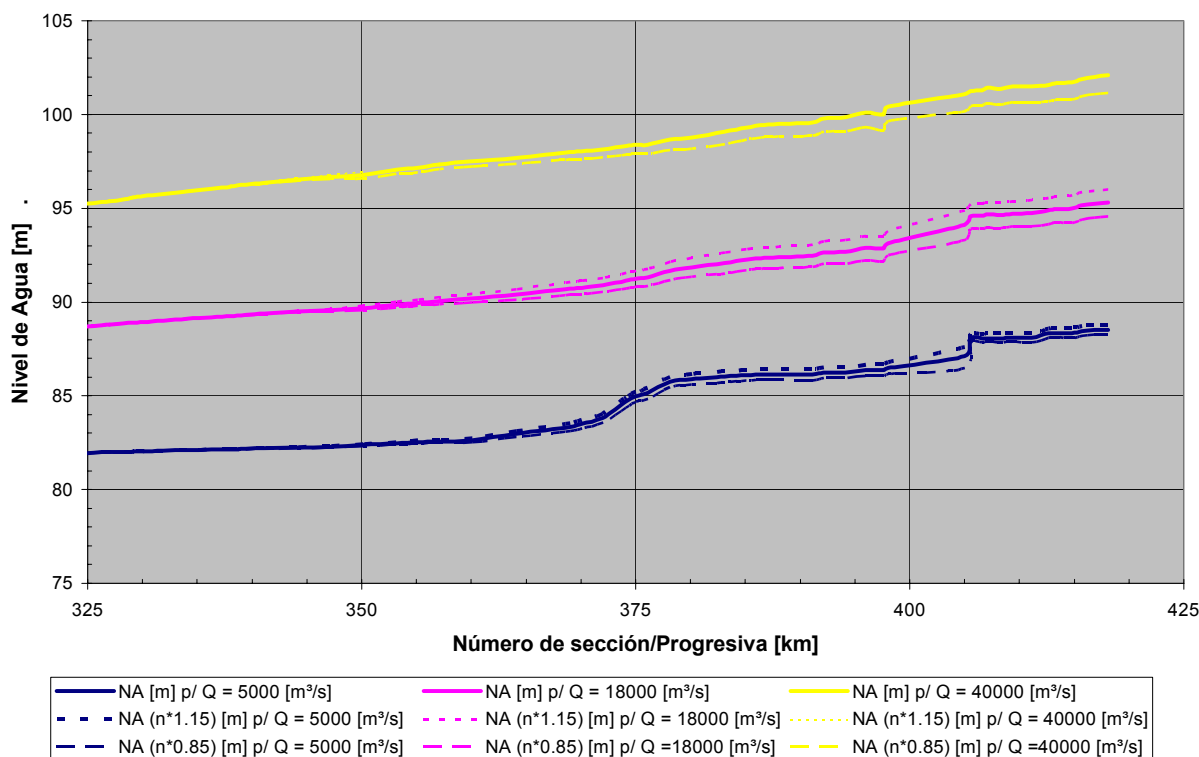
3.4.3 Análisis de sensibilidad

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).

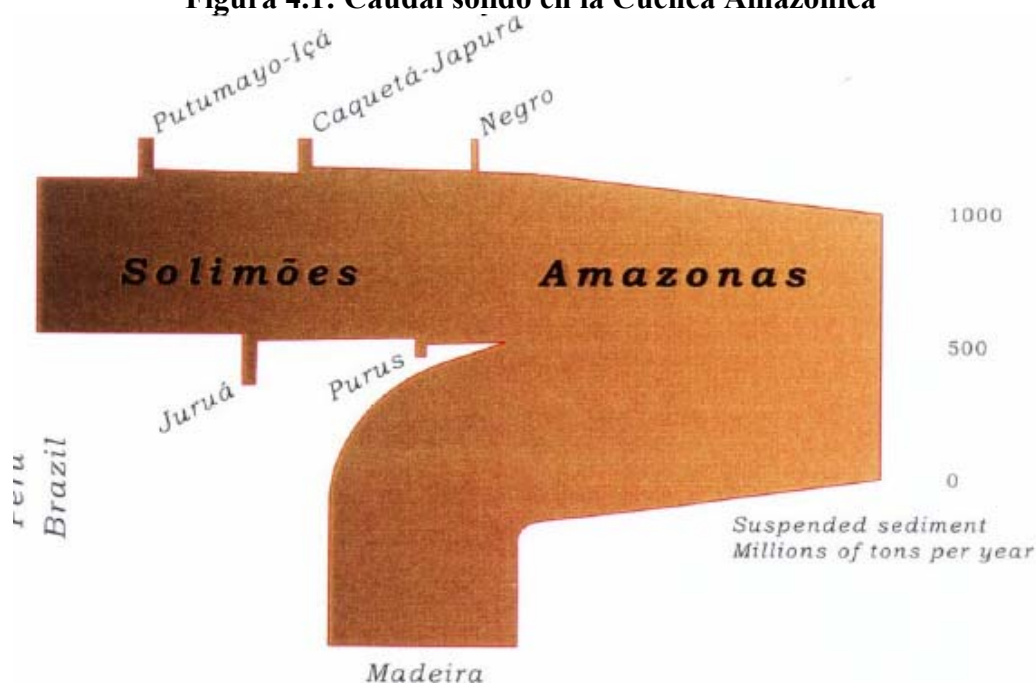
Por otro lado, la disminución de la velocidad de flujo asociada a la sobre-elevación de niveles incrementa los riesgos de sedimentación en el tramo afectado. Ese efecto será estudiado en el capítulo 5 del presente informe.

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.

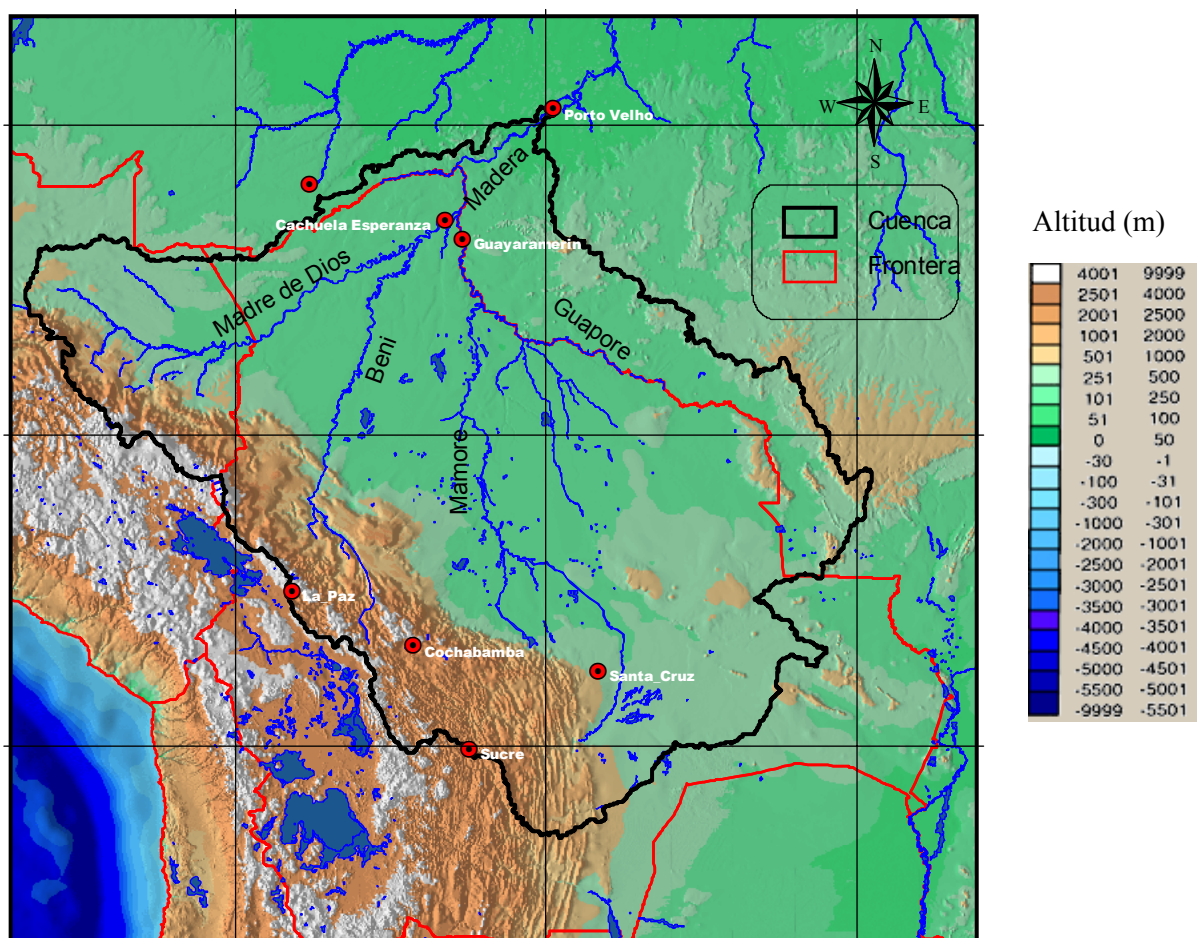
El análisis tuvo por objeto definir, de la mejor manera posible, los siguientes parámetros que requiere el modelo de simulación:

- 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%.

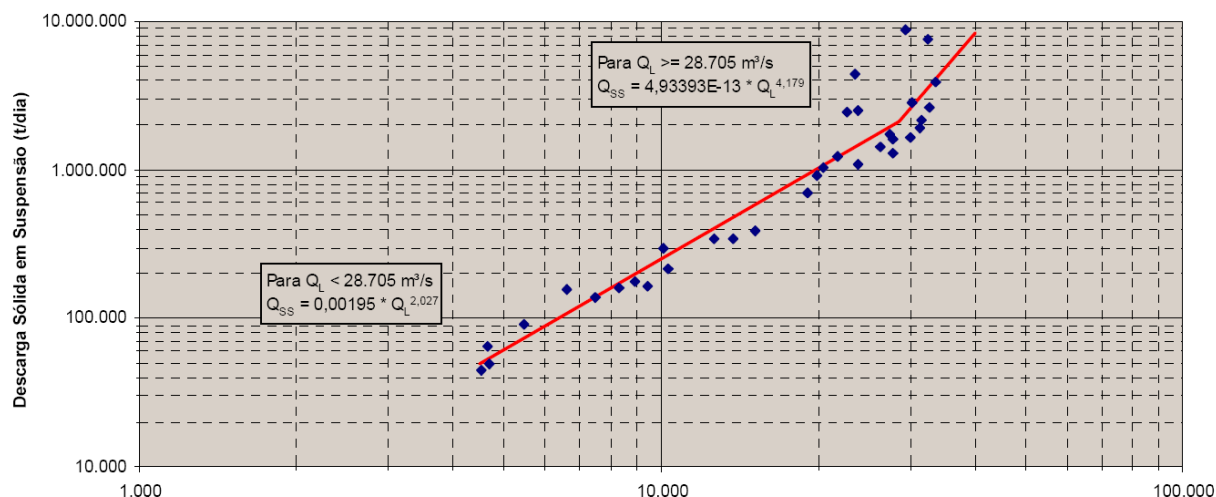
Tabla 4.1: Caudal sólido medio en suspensión (miles ton/día), río Madera en Porto Velho

| 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

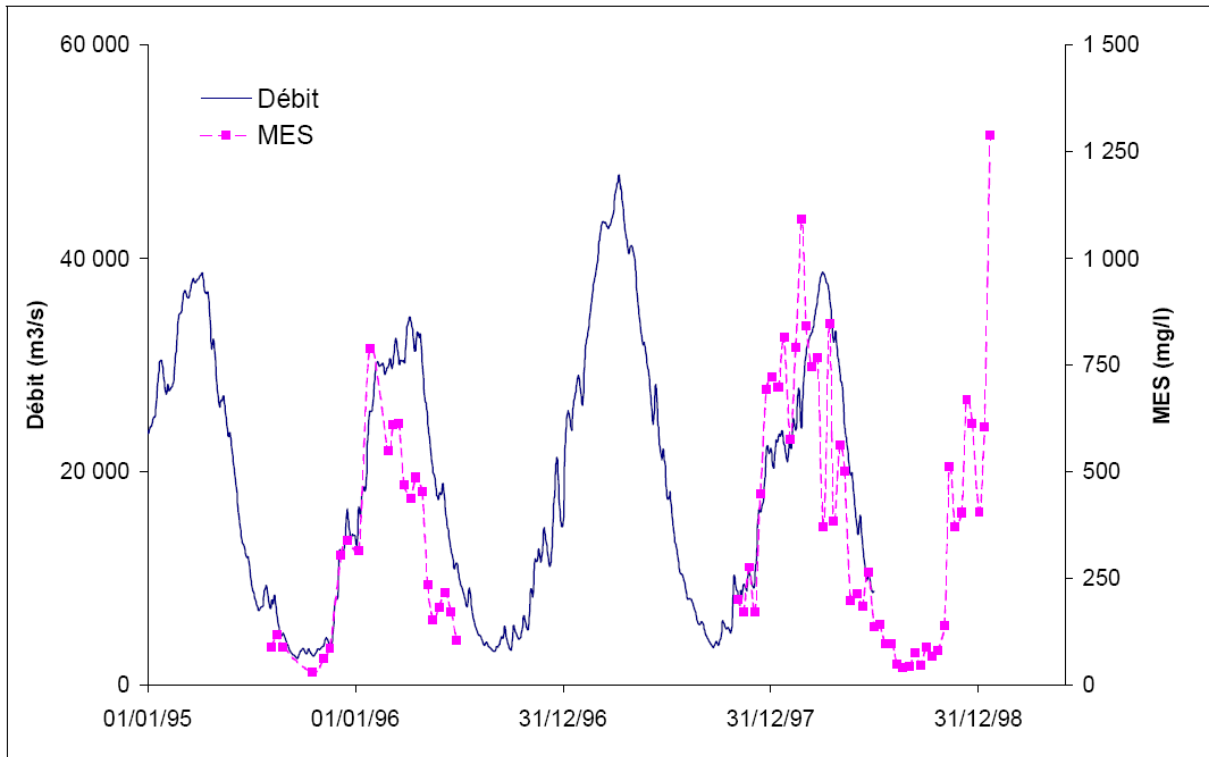
Furnas-Odebrecht (2005, 2006) usaron una relación $Q_s=f(Q)$ (Q_s =caudal sólido, Q =caudal líquido) para calcular el transporte de sedimentos del río Madera en Porto Velho. La figura 4.3 muestra esa relación, formada por dos tramos de pendiente diferente, para caudales líquidos por encima y debajo de 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

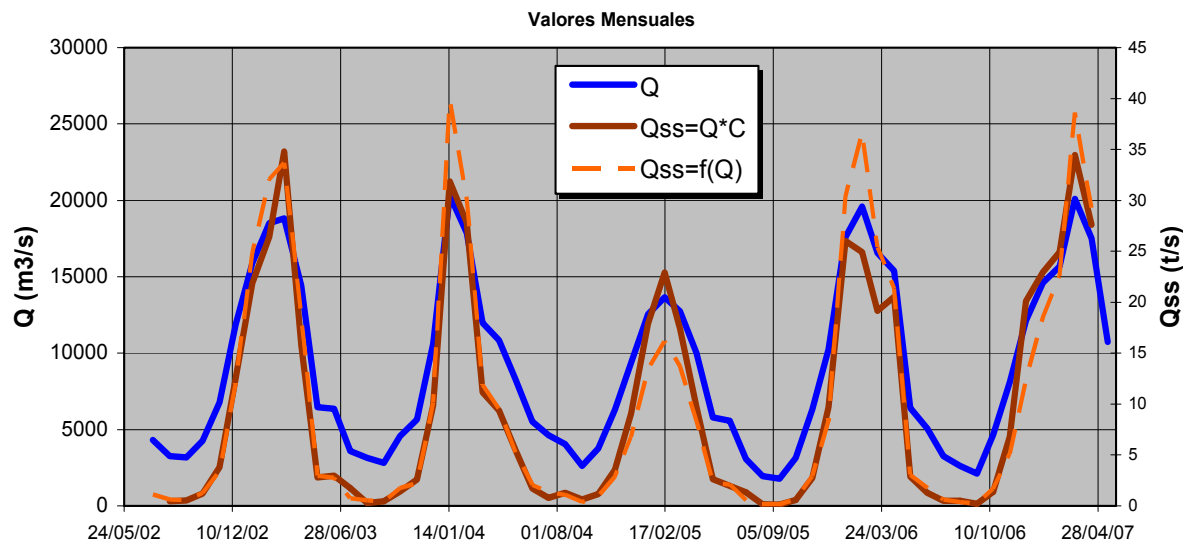
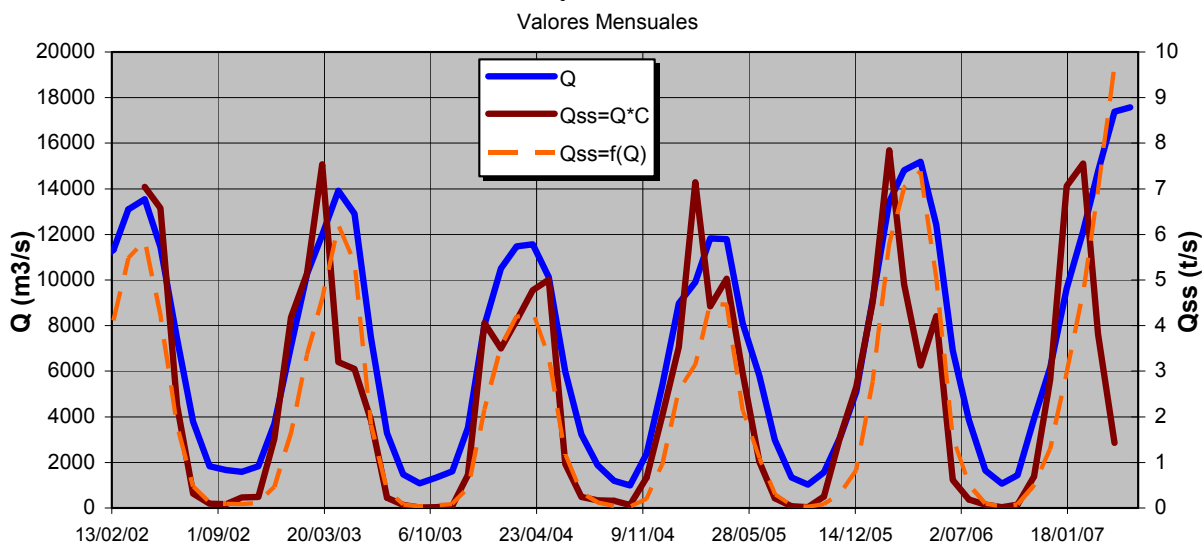


Figura 4.6: Caudal Q(m³/s) y caudal sólido en suspensión (ton/s), río Mamoré en Guayaramerín

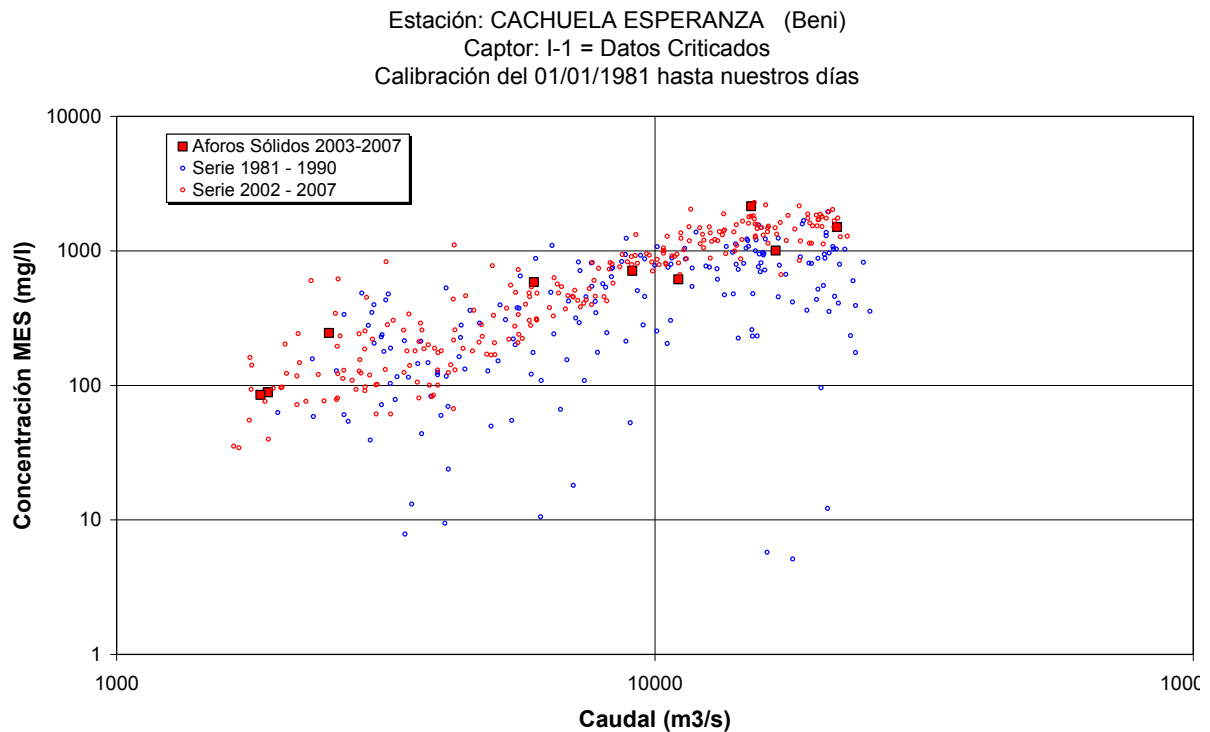


Fuente: Vauchel (2008)

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

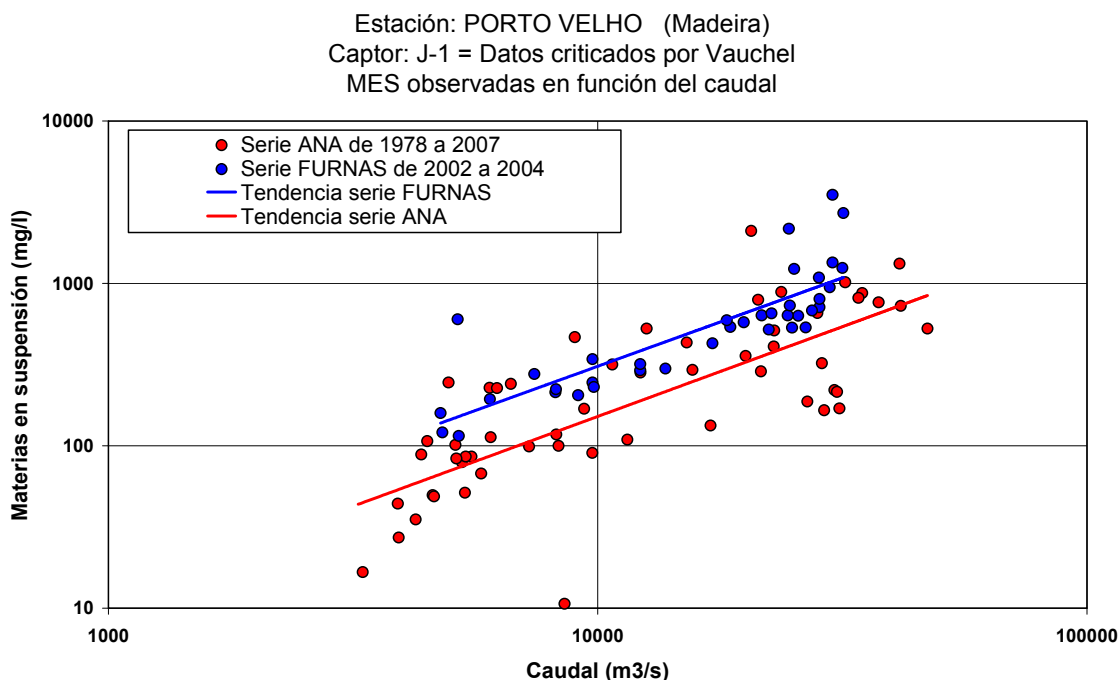
La falta de registros continuos en número y frecuencia suficientes en Porto Velho, obligó a usar el método $Q_{ss}=f(Q)$ como primera opción. En Porto Velho se dispuso de dos series de datos de concentración C (materias en suspensión). La primera serie fue obtenida de la base de datos de la ANA en HIDROWEB. 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



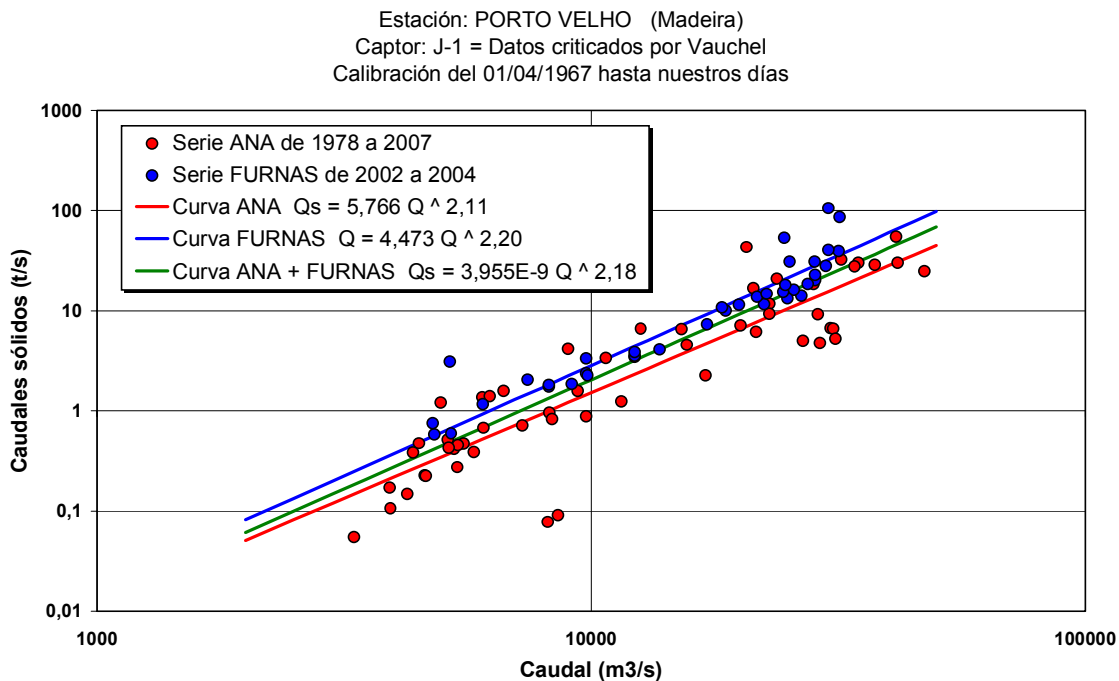
Fuente: Vauchel (2008)

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



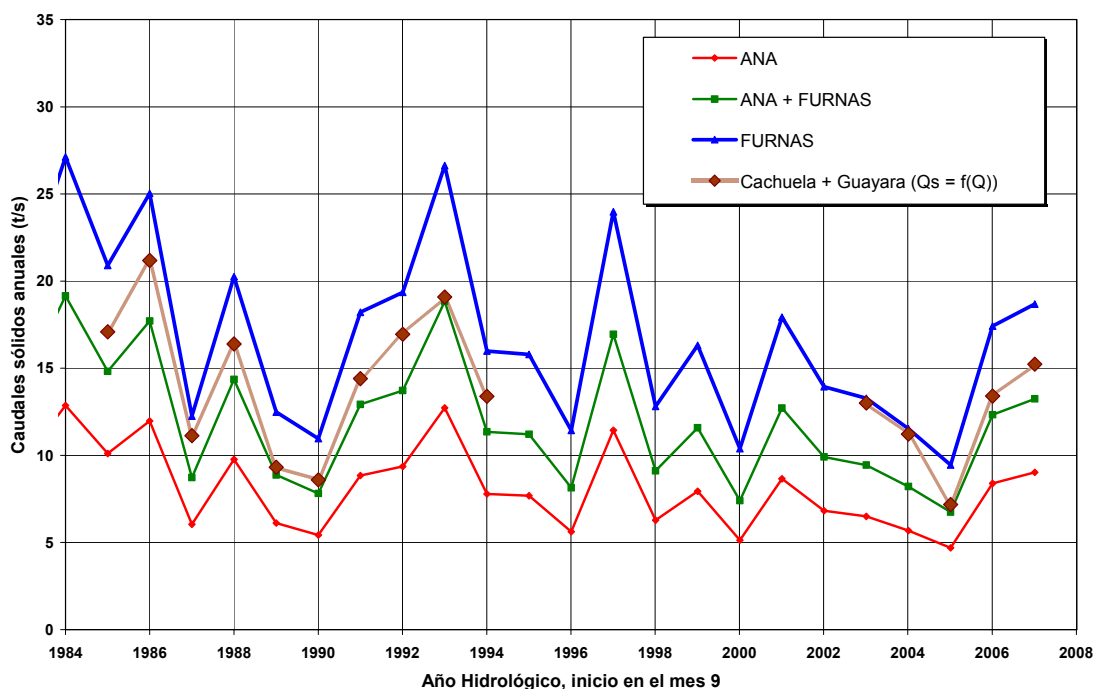
Fuente: Vauchel (2008)

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 ésta 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 |

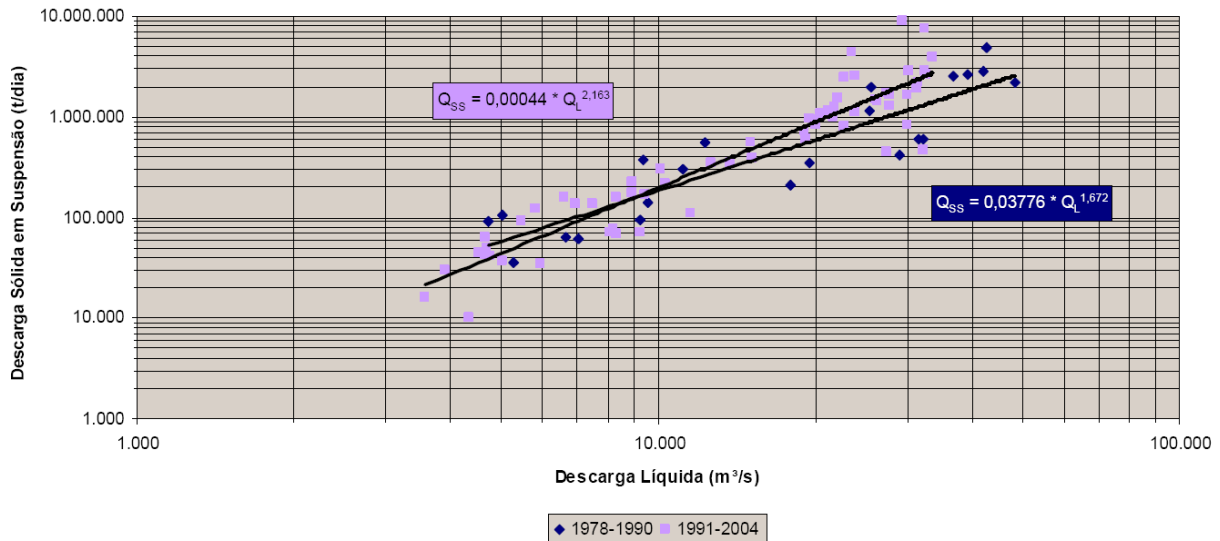
Fuente: Vauchel (2008)

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.

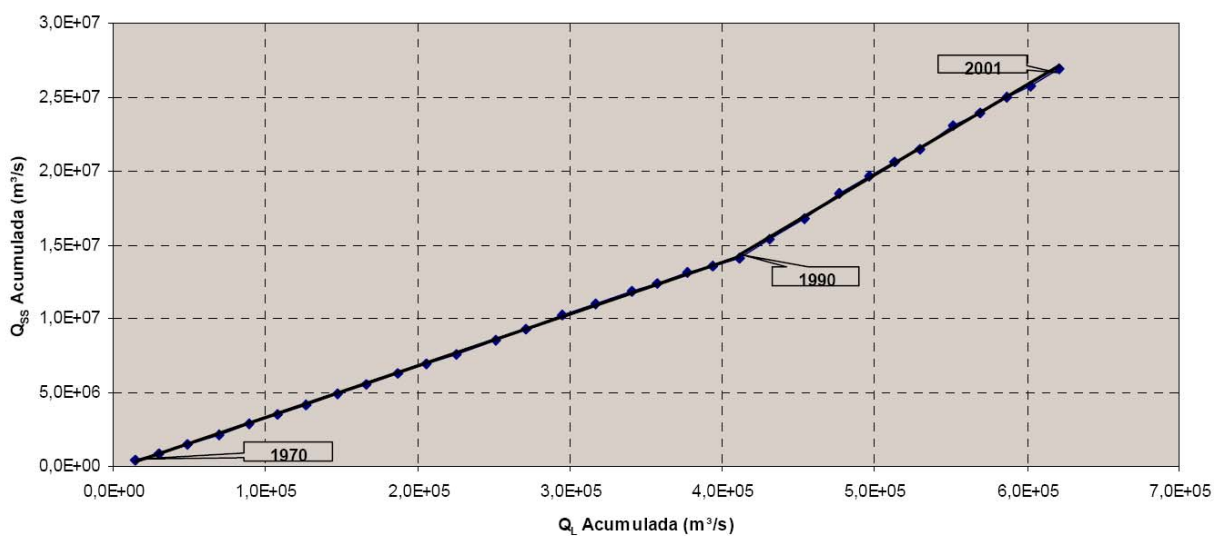
Figura 4.11: Relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ en Porto Velho, según Furnas



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).

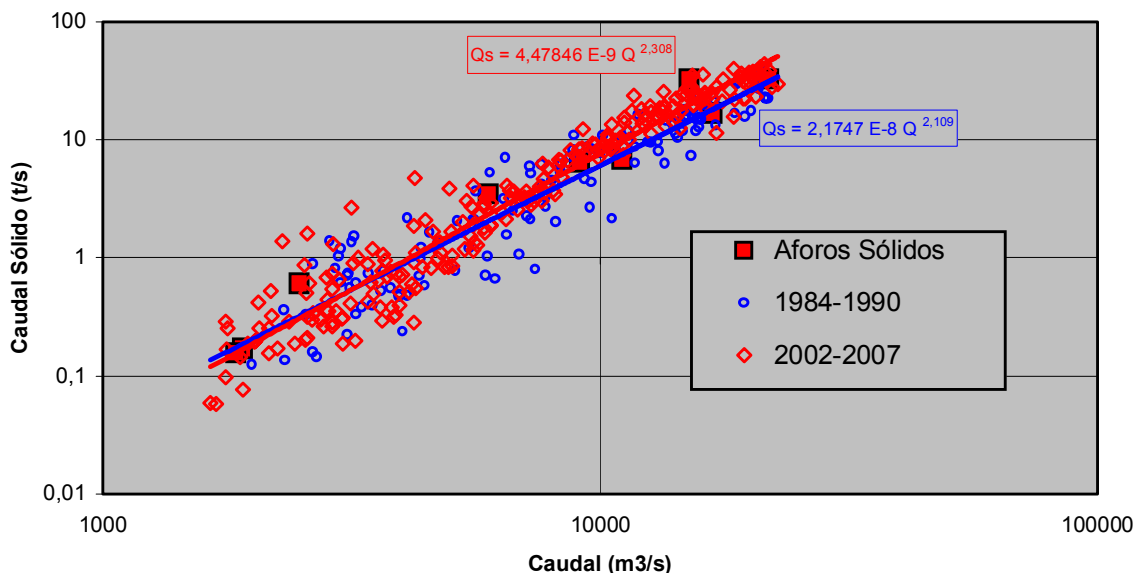
Lo que se observa en primer lugar es que la metodología empleada es muy cuestionable, ya que mezcla las series de concentraciones obtenidas por la ANA durante el periodo 1978-2005, con las concentraciones obtenidas por FURNAS durante sus campañas del 2002-2003 y sobre todo del 2004, para luego sacar 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

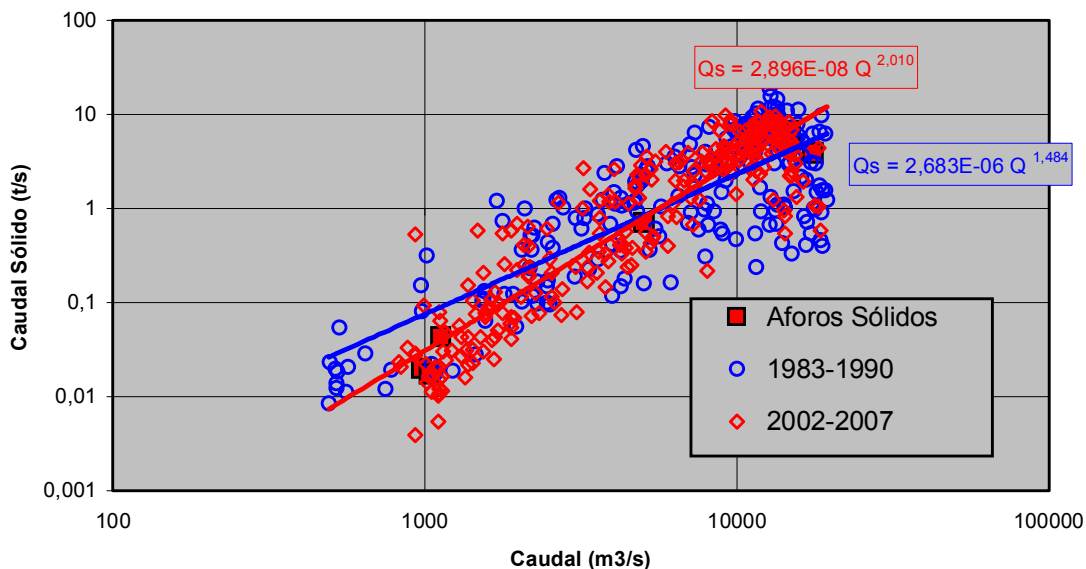
Estación: CACHUELA ESPERANZA (Río Beni)
Curvas $Q_s = f(Q)$ para 1984-1990 y 2002-2007



Fuente: Vauchel (2008)

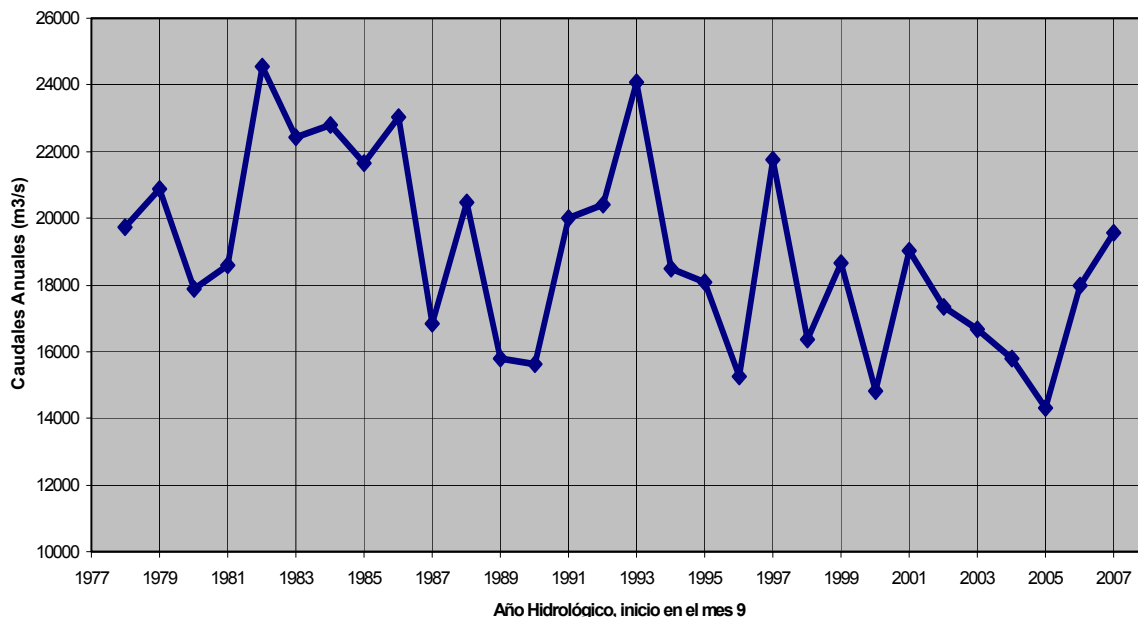
Figura 4.14: Relaciones $Q_{ss}=f(Q)$ en Guayaramerín

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



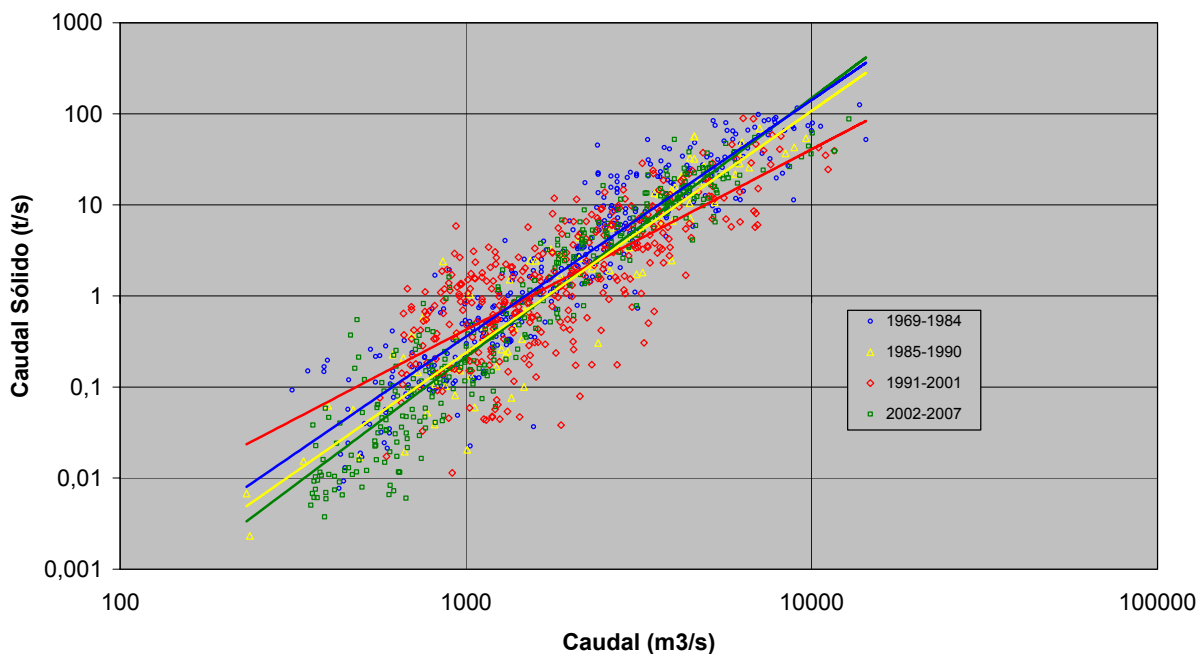
Fuente: Vauchel (2008)

¿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

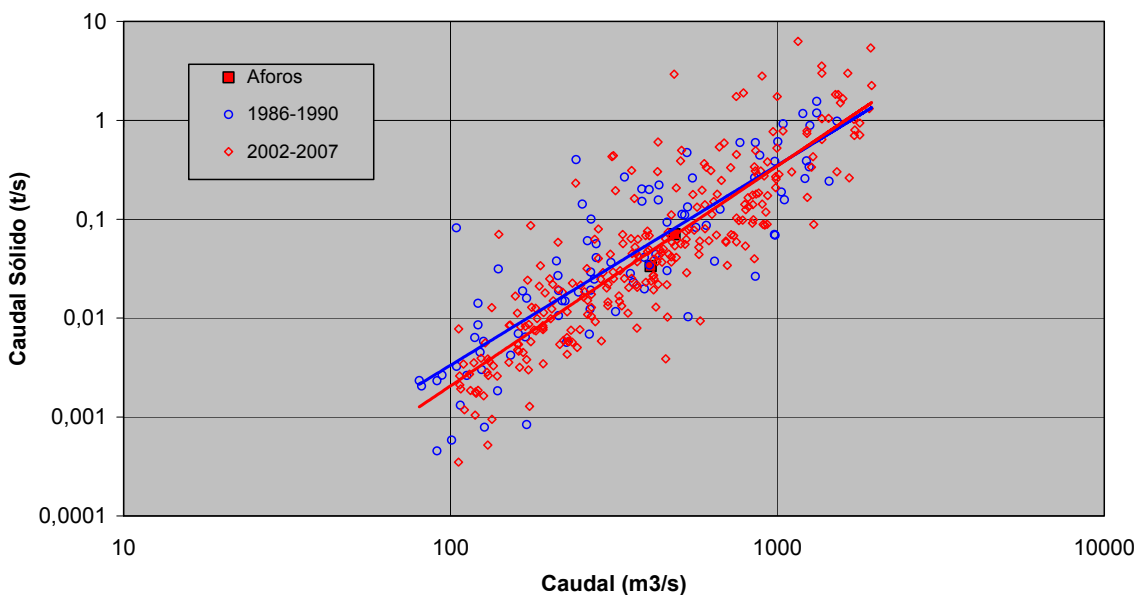
Estación: RURRENABAQUE (Río Beni)
Curvas $Q_s = f(Q)$ para varios periodos



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.

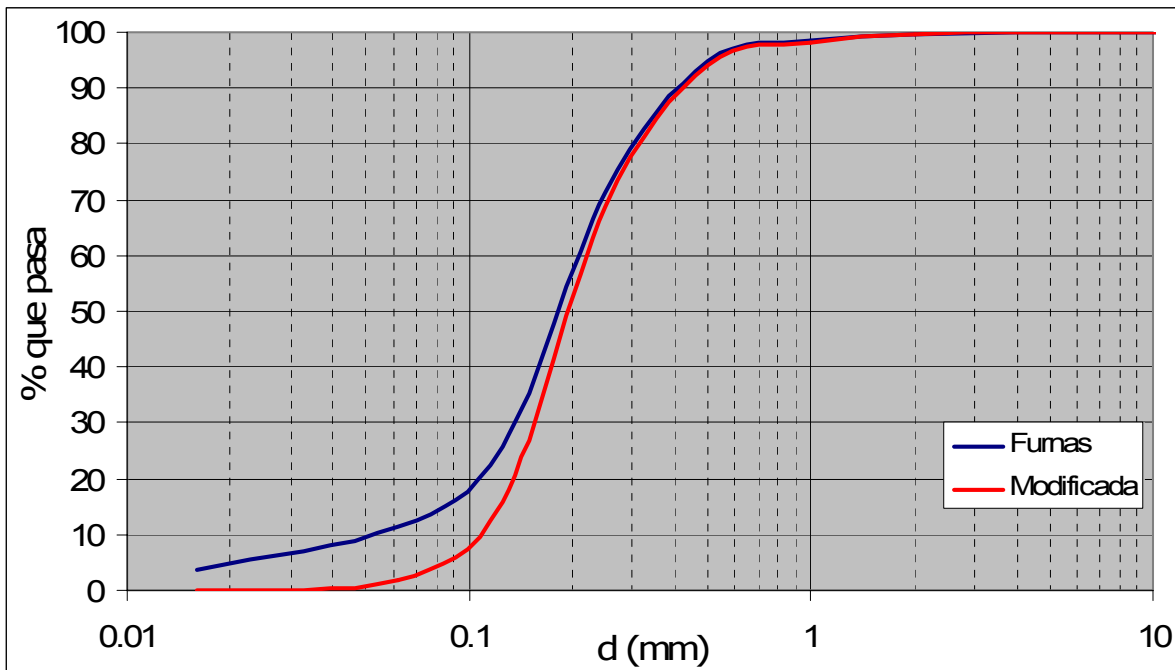
Por otro lado, la tabla A.3.1 muestra la composición de los sedimentos en suspensión y del material del lecho para otro grupo de muestras, parte de las cuales corresponden a las de la tabla A.3.2. Se siguió la clasificación usada en HEC-6: arcilla para granos menores a 0.004 mm, limo para granos entre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



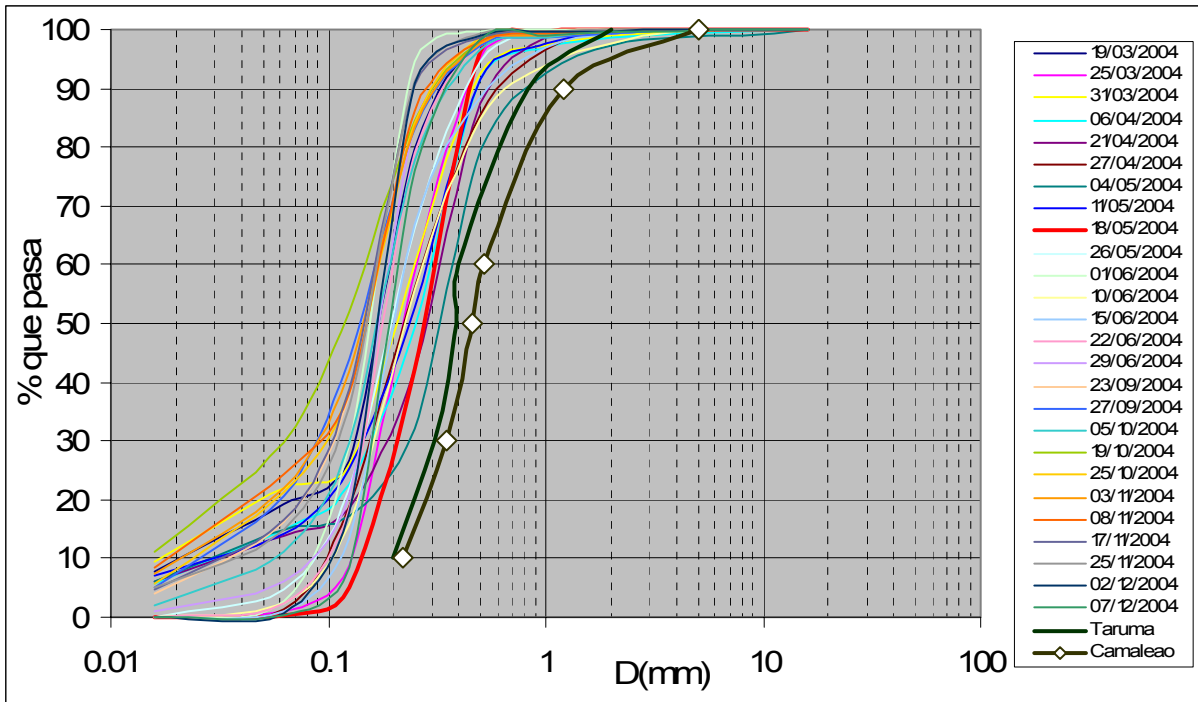
Fuente: Elaboración propia en base a datos de Furnas (2005)

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. Complexo hidrelétrico do rio Madeira, Estudos de Viabilidade do AHE Jirau, nov. 2004, Brasil.

Furnas, Odebrecht, 2004. Complexo 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 |

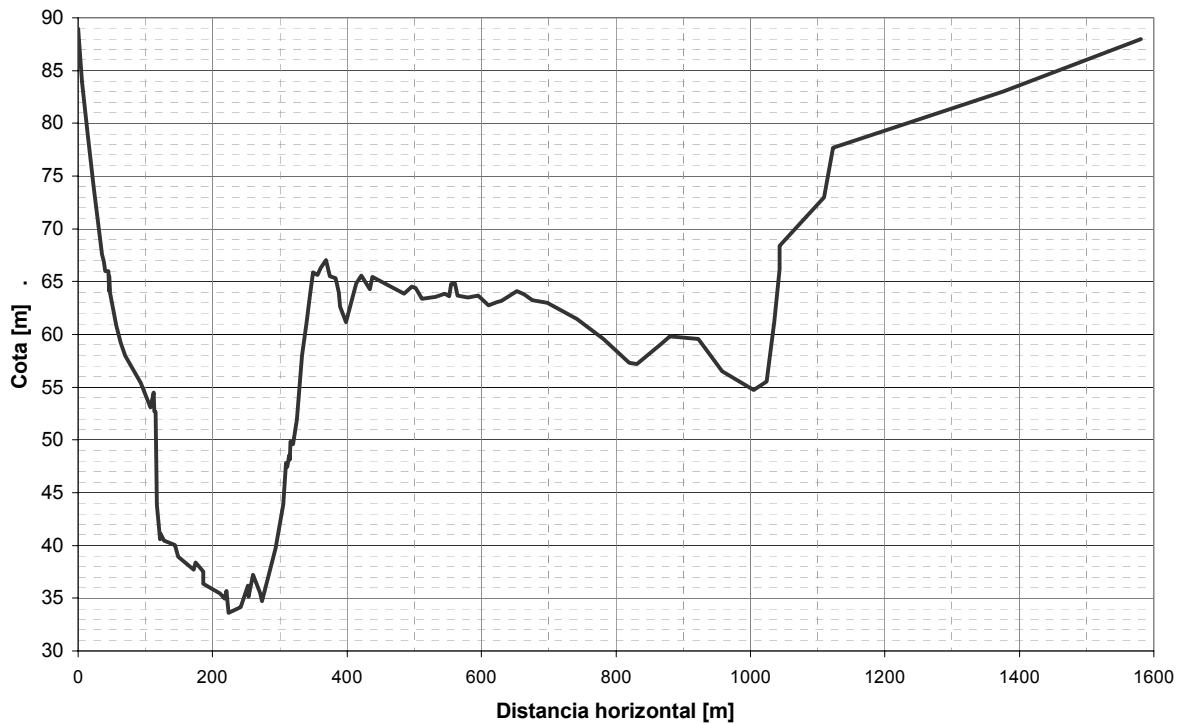
Fuente: Elaboración propia en base a datos de FURNAS-ODEBRECHT, SENAMHI-ENDE

Secciones transversales: Tramo Jirau – Cachuela Madera

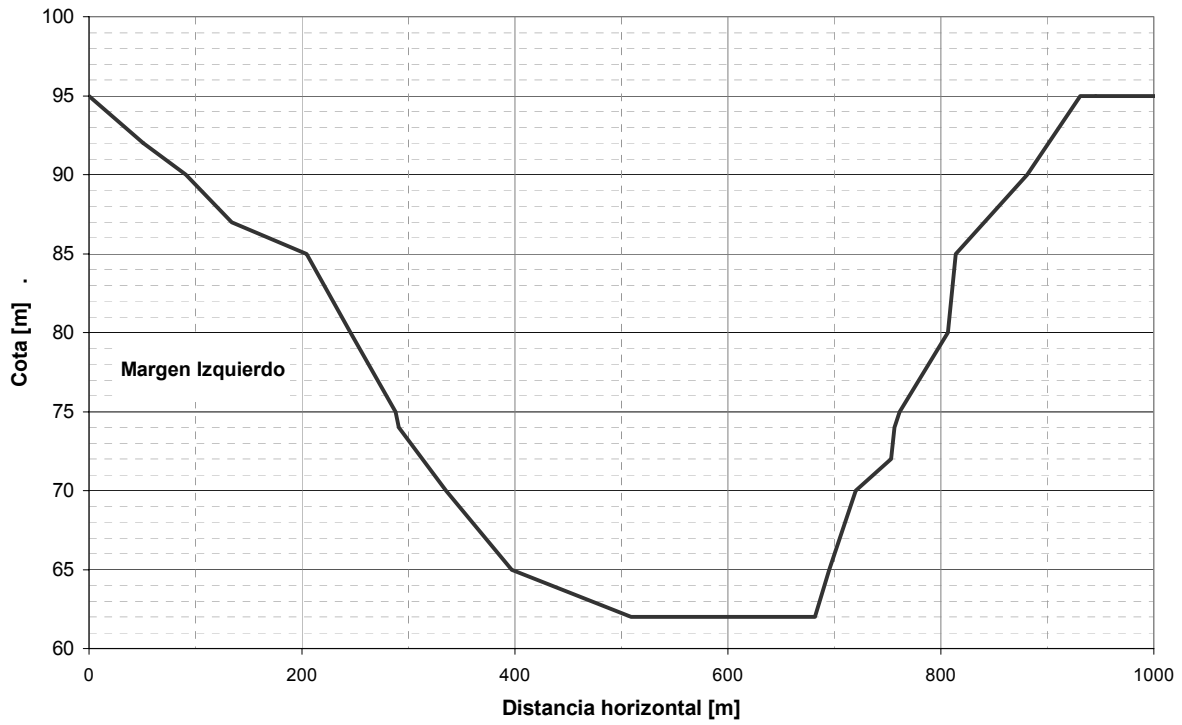
Notas

- 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)

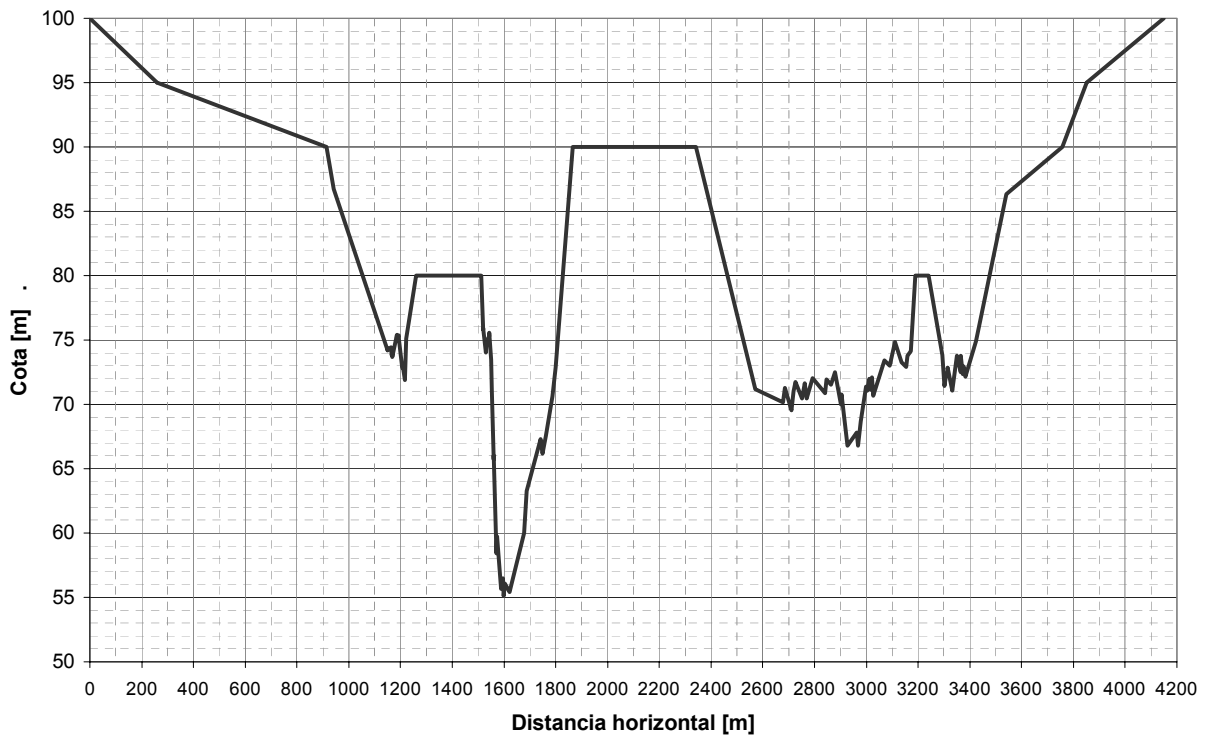


SECCIÓN TRANSVERSAL 210 (Cachuela Jirau aguas arriba)

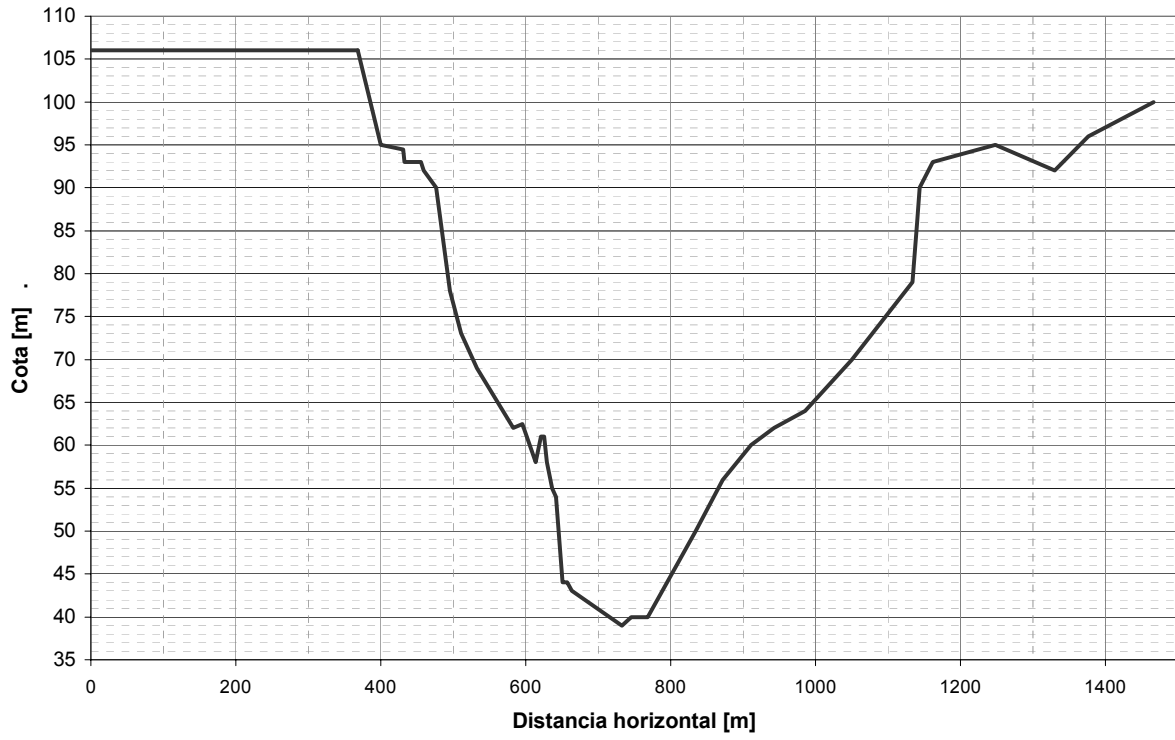


Fuente: Furnas-Odebrecht (2004) y SENAMHI-ENDE (2007)

SECCIÓN TRANSVERSAL 255 (Ilha Tres Irmaos)



SECCIÓN TRANSVERSAL 329 (Abajo confluencia con río Abuná)

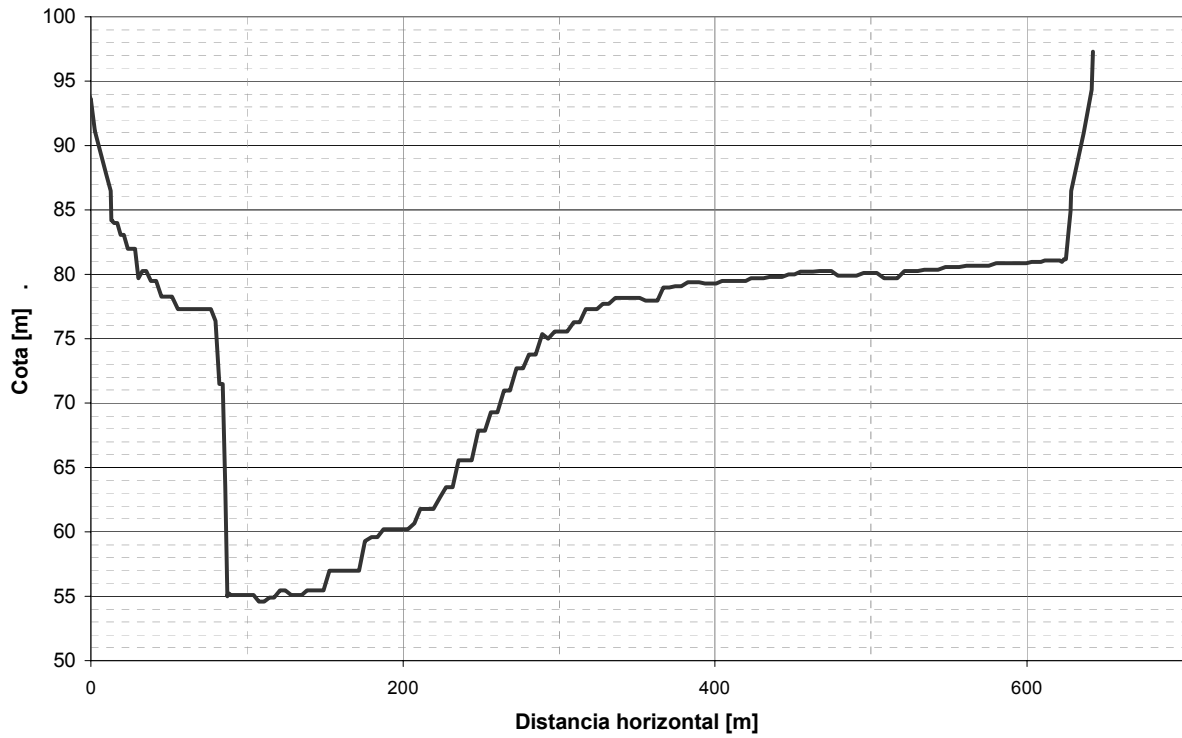


Fuente: Furnas-Odebrecht (2004) y SENAMHI-ENDE (2007)

SECCIÓN TRANSVERSAL 338 (Estación de Abuná-Vila)

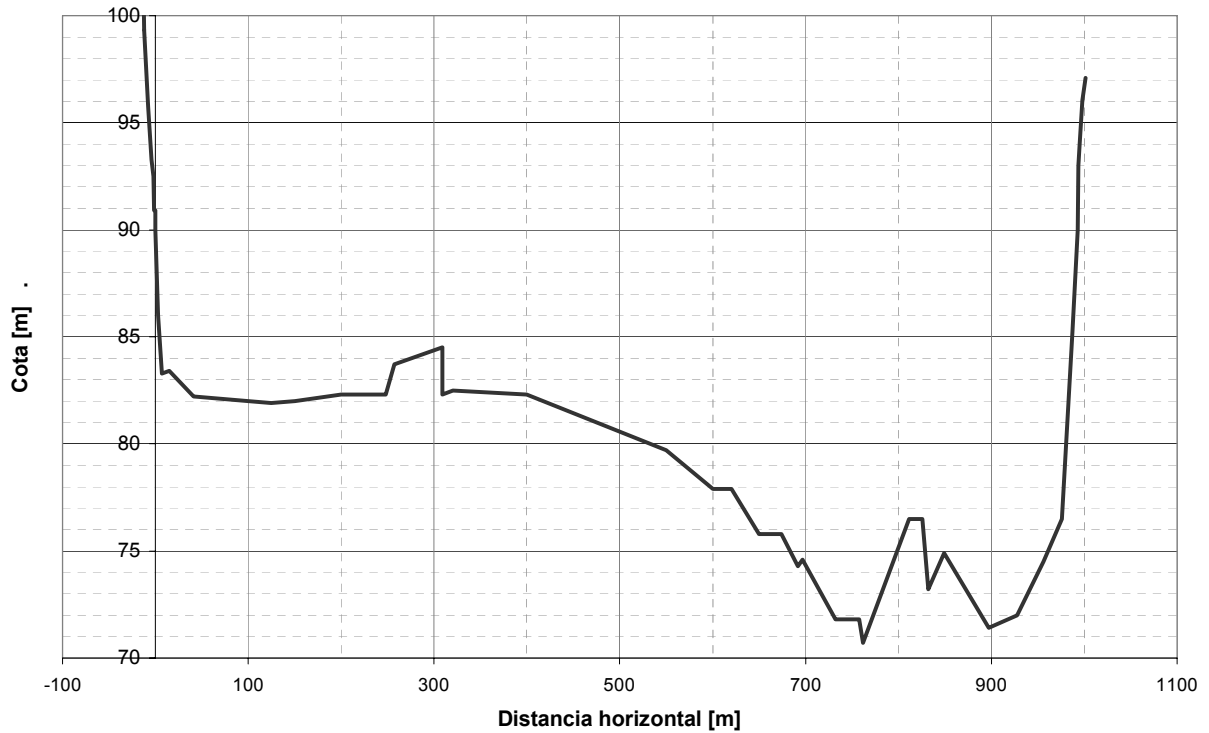


SECCIÓN TRANSVERSAL 350.1

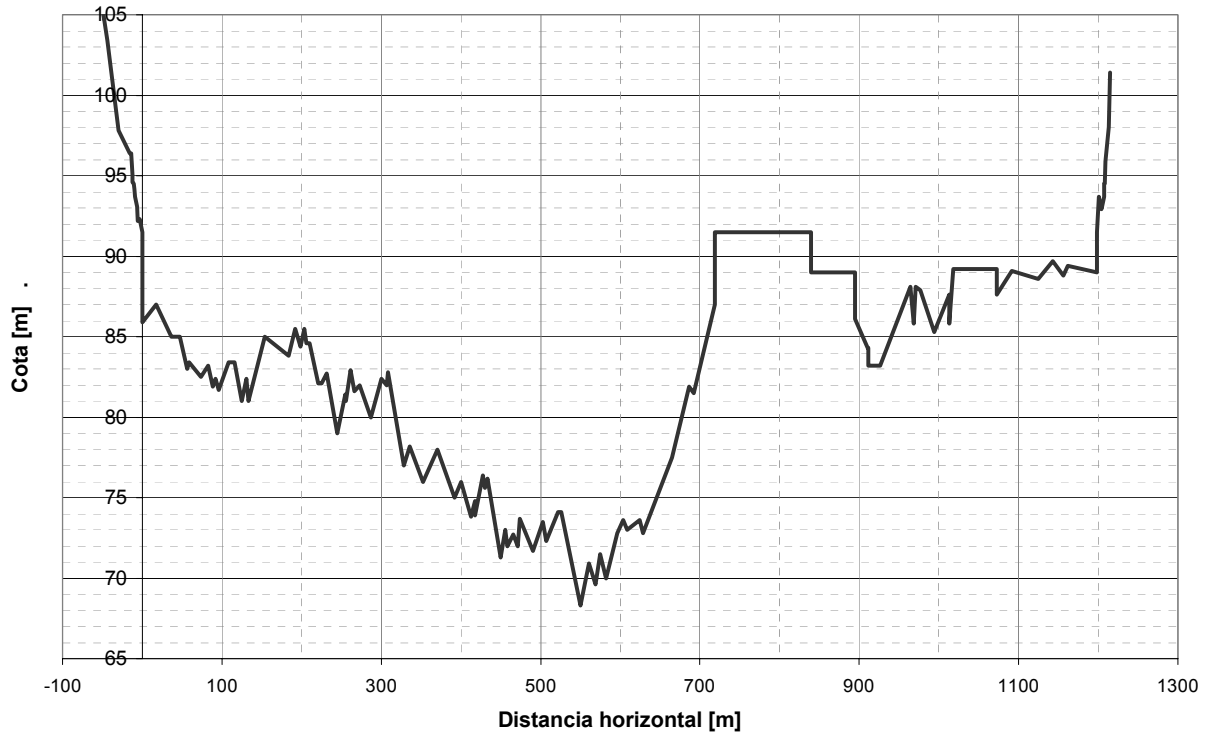


Fuente: Furnas-Odebrecht (2004) y SENAMHI-ENDE (2007)

SECCIÓN TRANSVERSAL 375 (Cachuela Araras - aguas arriba)

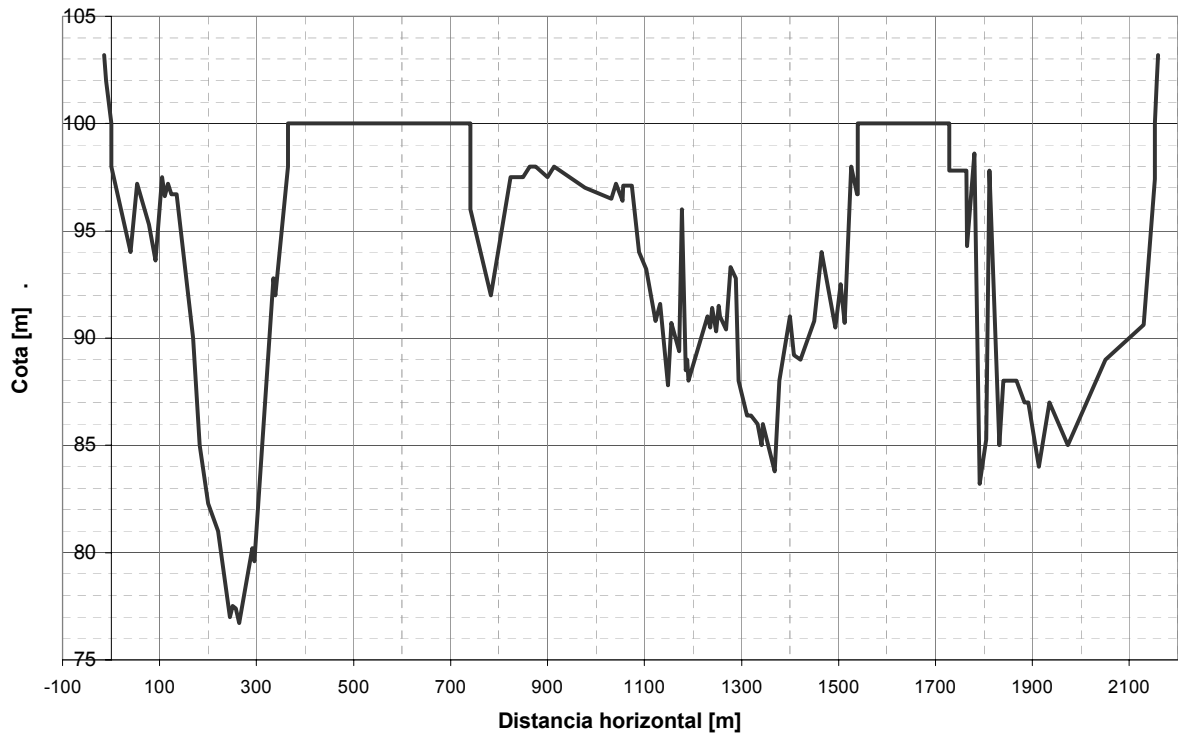


SECCIÓN TRANSVERSAL 398 (Cachuela Ribeirao - aguas abajo)

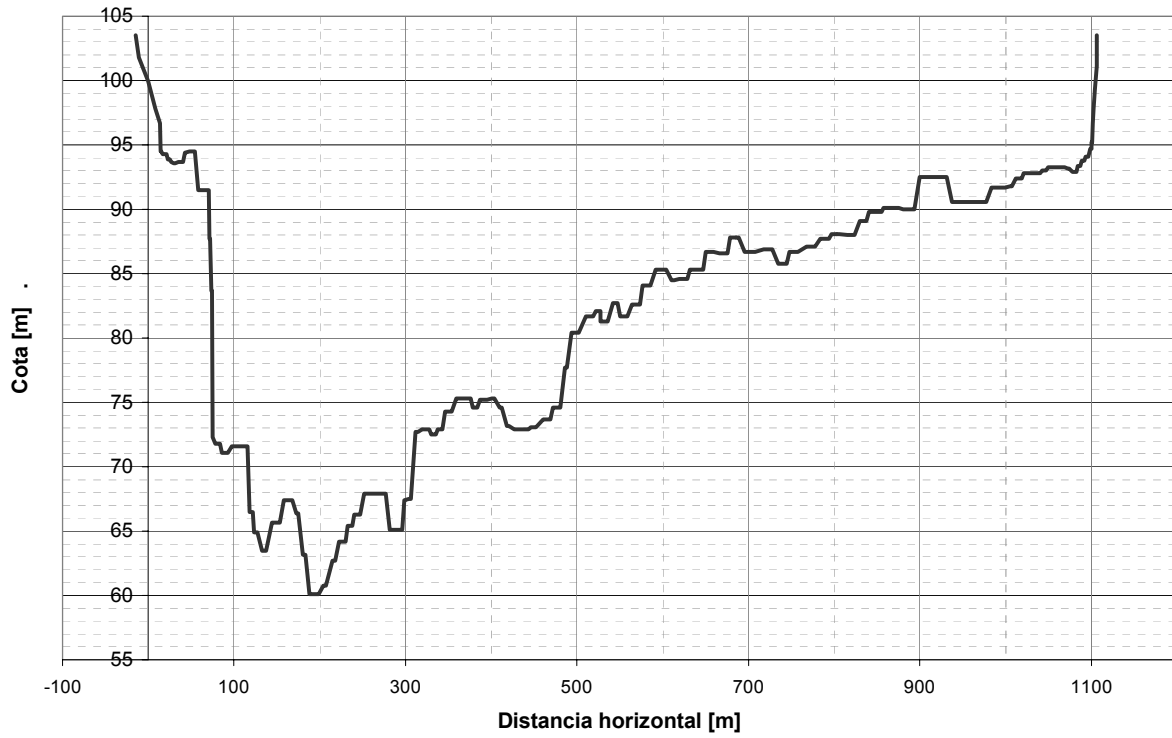


Fuente: Furnas-Odebrecht (2004) y SENAMHI-ENDE (2007)

SECCIÓN TRANSVERSAL 405 (Cachuela Ribeirao - aguas arriba)

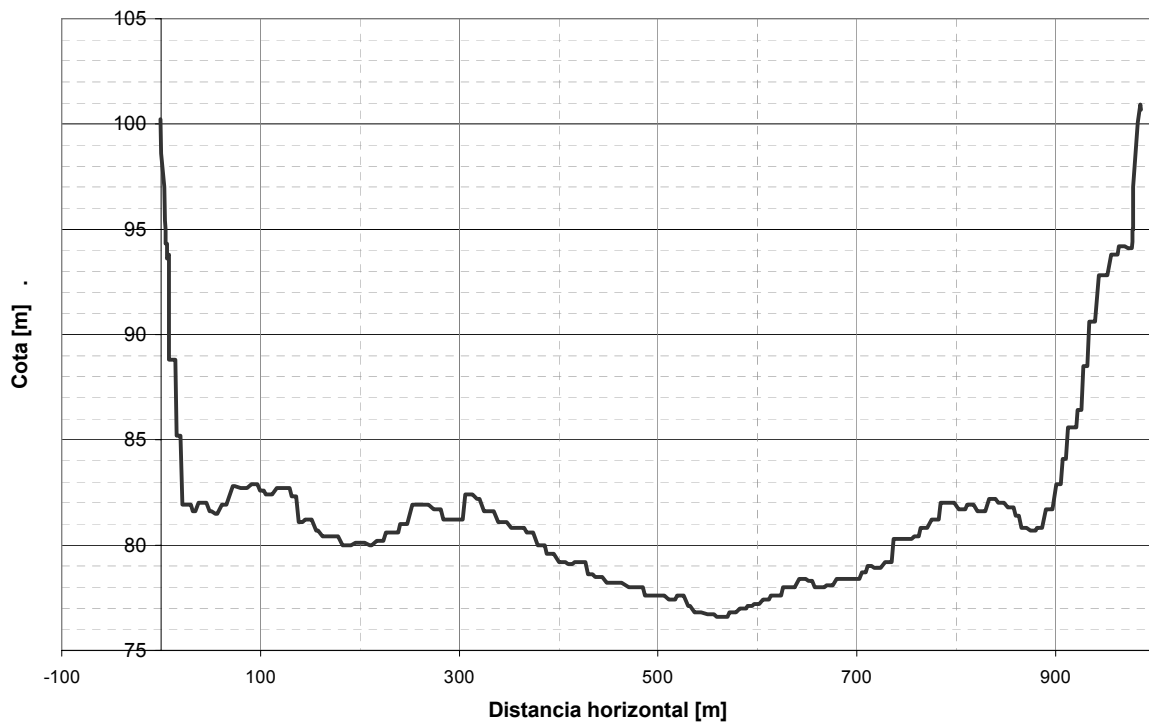


SECCIÓN TRANSVERSAL 406.6 (2 km arriba de Cachuela Ribeirao)



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 | | | | | |
| | 18605 | 91.15 | 0.083 | 0.030 | 0.083 | 0.1 | 0.3 | | | |
| | 372 | 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 | | | | | |
| 18605 | | 91.37 | 0.083 | 0.030 | 0.083 | | | 0.1 | 0.3 | |
| 374.1 | | 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 | | | | | |
| | 18605 | 91.48 | 0.083 | 0.030 | 0.083 | 0.1 | 0.3 | | | |
| | 375 | 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 | | |
| 380.1 | 29869 | 95.49 | 0.081 | 0.026 | 0.081 | 0.1 | 0.3 |
| | 31026 | 96.00 | 0.080 | 0.026 | 0.080 | | |
| | 4197 | 85.54 | 0.085 | 0.035 | 0.085 | | |
| | 5520 | 86.08 | 0.085 | 0.030 | 0.085 | | |
| | 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 | | |
| 383.1 | 29869 | 95.65 | 0.081 | 0.026 | 0.081 | 0.1 | 0.3 |
| | 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 | | |
| | 24500 | 94.45 | 0.081 | 0.027 | 0.081 | | |
| 385.1 | 29869 | 95.92 | 0.081 | 0.026 | 0.081 | 0.1 | 0.3 |
| | 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 | | |
| 387.1 | 29869 | 96.14 | 0.081 | 0.026 | 0.081 | 0.1 | 0.3 |
| | 31026 | 96.63 | 0.080 | 0.026 | 0.080 | | |
| | 4197 | 85.77 | 0.085 | 0.035 | 0.085 | | |
| | 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 | | |
| 391.1 | 29869 | 96.30 | 0.081 | 0.026 | 0.081 | 0.1 | 0.3 |
| | 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 | | |
| | 18605 | 92.70 | 0.083 | 0.028 | 0.083 | | |
| | 24500 | 94.89 | 0.081 | 0.027 | 0.081 | | |
| 392.1 | 29869 | 96.40 | 0.081 | 0.026 | 0.081 | 0.1 | 0.3 |
| | 31026 | 96.89 | 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 | 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 m3/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)