

generación y transporte de sedimentos en la alta cuenca del río bermejo.
impacto en la hidrovía, delta del paraná y río de la plata



PROGRAMA
ESTRATEGICO
DE ACCION
 PARA LA CUENCA DEL 
RIO BERMEJO

Generación y transporte de sedimentos en la alta cuenca del río Bermejo. Impacto en la hidrovia, delta del Paraná y río de la Plata



1



2



3



4



5

Comision Binacional para el Desarrollo de la Alta Cuenca Del Río Bermejo y Grande de Tarija ^(1 2)

República Argentina⁽¹⁾

República de Bolivia⁽²⁾

Comisión Regional del Río Bermejo

Comisión Nacional de los Ríos Pilcomayo y Bermejo

PROGRAMA ESTRATEGICO DE ACCION PARA LA CUENCA BINACIONAL DEL RIO BERMEJO

Organización de los Estados Americanos⁽³⁾

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente⁽⁴⁾

Fondo para el Medio Ambiente Mundial⁽⁵⁾

elemento 1.1 del programa de trabajo Movimiento transfronterizo de contaminantes

Formulación del Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Río Bermejo

Generación y transporte de sedimentos en la alta cuenca del río Bermejo. Impacto en la hidrovía, delta del Paraná y río de la Plata

Octubre de 1999

Informe producido por:

Ing. José Daniel Brea

Ing. Marcela S. Busquets

Ing. Pablo D. Spalletti



Este documento ha sido elaborado por el Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA), en el marco del Elemento 1.1 del Programa de Trabajo para la Formulación del Programa Estratégico de Acción de la Cuenca del Río Bermejo (PEA). Las informaciones, elaboraciones, conclusiones y/o recomendaciones que contiene, han constituido un valioso aporte para el desarrollo del Proyecto. Los contenidos expresan la opinión del/de los autores y no reflejan necesariamente la de la Comisión Binacional para el Desarrollo de la Alta Cuenca del Río Bermejo y Río Grande de Tarija, de la Organización de los Estados Americanos, del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y del Fondo para el Medio Ambiente Mundial.

RESUMEN

En este informe se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo total de las actividades a) Producción de sedimentos en la Alta Cuenca, b) Modelo de transporte sólido para la Alta Cuenca. Análisis morfológico de los principales ríos que la componen, y c) Influencia de la variación de la carga sedimentaria del río Bermejo en el Sistema Paraguay - Paraná - de la Plata.

Se presentan además las conclusiones generales del estudio, que cumplen con los objetivos previstos en el contrato respectivo.

DESCRIPTORES

Temáticos: morfología de ríos, caudales líquidos y sólidos, análisis de datos hidrométricos y de sedimentos, producción de sedimentos, erosión superficial, remoción en masa, unidades de paisaje, transporte sólido, procesos de erosión-sedimentación.

Geográficos e Institucionales: Alta Cuenca del Río Bermejo, sistema Paraguay - Paraná - Delta del Paraná - Río de la Plata. Comisión Binacional para el Desarrollo de la Alta Cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Organización de los Estados Americanos, Fondo para el Medio Ambiente Mundial.

Autoridades del INA

Gerente de programas y proyectos:

Dr. Raúl A. Lopardo

Director del laboratorio de hidráulica y del ambiente:

Ing. Julio César De Lío

Equipo de trabajo

Jefe del programa hidráulica fluvial (coordinador):

Ing. José Daniel Brea

Profesionales:

Ing. Marcela S. Busquets

Ing. César S. Loschacoff

Ing. Pablo D. Spalletti

Ing. Silvia Raffaelli (COREBE)

Asesores:

Dr. Luis Spalletti

Ing. Máximo A. Peviani

Ing. Haroldo J. Hopwood

Informe producido por:

Ing. José Daniel Brea

Ing. Marcela S. Busquets

Ing. Pablo D. Spalletti

INTRODUCCIÓN**CAPÍTULO A****a) Producción de sedimentos en la AC.**

- a.1) Definición de unidades de paisaje.
- a.2) Determinación de la producción de sedimentos.
 - i. Producción de sedimentos por erosión superficial.
 - ii. Procesos de desmoronamiento, deslizamiento y flujos rápidos de remoción en masa.
 - iii. Comentarios sobre medidas de manejo estructurales y no estructurales a nivel de subcuencas que puedan contribuir a controlar los fenómenos de producción de sedimentos. Conclusiones del capítulo.

Figuras y Tablas Capítulo A**CAPÍTULO B****b) Modelo de transporte sólido para la Alta Cuenca. Análisis morfológico de los principales ríos que la componen.**

- b.1) Recopilación y análisis de antecedentes.
 - i. Resultados de las tareas de campo realizadas en el marco del proyecto: perfiles transversales en los ríos de la red, granulometrías del material del lecho, cota de cerros de escalas hidrométricas vinculadas a la red IGM.
 - ii. Datos de niveles y caudales líquidos, y caudales sólidos, en todas las estaciones de la red de mediciones de EVARSA en la Alta Cuenca.
 - iii. Datos pluviométricos y pluviográficos en todas las estaciones de la red.
 - iv. Relevamientos de secciones transversales en correspondencia con las estaciones de la red de EVARSA.
 - v. Cartografía de toda la AC, a la menor escala disponible. Líneas de nivelación del IGM en la AC.
 - vi. Imágenes satelitales de la zona de estudio.
 - vii. Fotografías aéreas de la zona de estudio.
 - viii. Recopilación de estudios de trabajos afines realizados en todos los ríos de la red, que permitan la extracción de datos básicos relacionados con los citados en los ítems anteriores.
- b.2) Interpretación y análisis de la información básica.
 - i. Delimitación del área de estudio y definición de la red de cauces a modelar.
 - ii. Elaboración de los datos batimétricos y de sedimentos.
 - iii. Análisis de los niveles y caudales en las distintas estaciones. Estadística de caudales, determinación de caudales característicos de los cauces de la red, incluyendo caudales de diseño para los escenarios de aplicación del modelo matemático.
 - iv. Analizar los resultados de la producción de sedimentos en las subcuencas.
 - v. Ubicación de las obras existentes en los cauces de la red.

vi. Definición de las características morfológicas y sedimentológicas de los cauces de la red: ajuste de ecuaciones de transporte sólido en base a las mediciones, análisis de la evolución morfológica de los cauces a partir del estudio de la variación de las secciones transversales en las estaciones de aforo de EVARSA.

b.3) Modelo de transporte sólido para la Alta Cuenca del río Bermejo.

b.3) 1. Características del modelo morfológico de transporte en la cuenca del Río San Francisco (modelo ANDES).

Modelo teórico. Modelo numérico. Secuencia de cálculo. Verificación del modelo matemático ANDES con resultados de modelo físico.

i. Implementación del modelo morfológico del sistema Grande - Lavayén - San Francisco.

1. Análisis de los datos.

1.1. Caudales líquidos.

1.2. Caudales sólidos y granulometrías. 1.3. Secciones transversales.

ii. Calibración y validación del modelo, en base a los datos analizados.

iii. Corridas de producción.

1. Río Grande.

2. Río Lavayén.

3. Río San Francisco.

4. Sistema Grande - San Francisco.

b.3) 2. Características del modelo morfológico de transporte ALPS-2, en el Río Bermejo Superior

(Peviani, M.A.; 1999).

Alcance de los estudios morfológicos en la Alta Cuenca del río Bermejo.

i. Implementación del modelo morfológico del río Bermejo Superior.

1. Datos de la morfología de los ríos.

2. Datos de la composición sedimentológica del lecho de los ríos.

3. Datos del régimen hidrológico de los ríos.

4. Datos de transporte de sólidos y cambios morfológicos en los ríos.

5. Implementación del modelo en los ríos Grande de Tarija y Bermejo.

5.1. Esquema de representación de los ríos.

5.2. Características morfológicas de los cauces.

5.3. Clases granulométricas del material del lecho de los ríos y del transporte sólido fluvial.

5.4. Régimen hidrológico y caudales equivalentes en los distintos tramos de los ríos.

ii. Calibración y validación del modelo numérico ALPS-2.

iii. Corridas de producción.

1. Estudio de la situación actual de los ríos Grande de Tarija y Bermejo.

2. Estudios con escenarios de intervención en la cuenca del río Bermejo.

2.1. Construcción de los aprovechamientos de Arrazayal, las Pavas y Cambarí.

2.2. Obras de mitigación en la cuenca de los ríos Iruya y Pescado. Reducción del aporte sólido a un 75 % del valor actual. Reducción del aporte sólido a un 50 % del valor actual. Reducción del aporte sólido a un 25 % del valor actual. Efecto sobre la fracción del transporte sólido en suspensión.

Síntesis.

Figuras y Tablas Capítulo B

CAPÍTULO C

c) Influencia de la variación de la carga sedimentaria del río Bermejo en el Sistema Paraguay - Paraná - de la Plata.

c.1) Recopilación de antecedentes.

i. Datos de niveles y caudales líquidos, y caudales sólidos, en todas las estaciones de la red de mediciones de EVARSA.

ii. Granulometrías de material de lecho y en suspensión en el sistema Paraguay - Paraná - de la Plata.

iii. Datos batimétricos de los principales cursos del sistema.

iv. Estudios de trabajos afines realizados en los ríos del sistema, que permitan el desarrollo de los objetivos a cumplir.

v. Imágenes satelitales, y fotos aéreas de la zona, en especial las correspondientes al delta del Río Paraná.

vi. Antecedentes sobre composición mineralógica de sedimentos en suspensión en los ríos Bermejo, Paraguay, Paraná y Río de la Plata.

c.2) Análisis global del transporte de sedimentos en el sistema Bermejo - Paraguay - Paraná - de la Plata, en situación actual.

1. Análisis general.

2. Balance a partir de las estaciones de aforo en el sistema Bermejo - Paraguay - Paraná.
3. Delta del río Paraná y Río de la Plata.
- c.3) Análisis global del transporte de sedimentos en el sistema Bermejo - Paraguay - Paraná -Río de la Plata, con acciones en la Alta Cuenca.
 1. Cuenca del río Bermejo Superior.
 2. Cuenca del río San Francisco.
 3. Incidencia en el Bermejo Inferior.
 4. Incidencia en el Delta del Paraná y Río de la Plata.

Figuras Capítulo C

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

PLANOS

FOTOGRAFIAS

INTRODUCCIÓN

El presente constituye el Informe Integrador correspondiente al Contrato por Resultados N° 17294, suscripto entre la Organización de Estados Americanos (OEA) y el Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA), para el estudio de la generación y transporte de sedimentos en la Alta Cuenca del Río Bermejo, y del impacto que dicha carga sedimentaria tiene en el Sistema Paraguay - Paraná - Río de la Plata, y el Delta del Paraná.

El estudio se enmarca en el Programa Estratégico de Acción para el Desarrollo Sustentable de la Cuenca del Río Bermejo, proyecto del Fondo para el Medio Ambiente Mundial - FMAM (Global Environmental Fund - GEF), que tiene como organismo ejecutor a la OEA.

De las actividades previstas en el contrato, en este informe se presenta la totalidad de las tareas, organizadas por capítulos, y los resultados obtenidos en el desarrollo de cada uno de los ítems, a saber: Tareas a.1) y a.2), correspondientes a la actividad a) Producción de sedimentos en la Alta Cuenca.

Tareas b.1), b.2) y b.3), correspondientes a la actividad b) Modelo de transporte sólido para la Alta Cuenca. Análisis morfológico de los principales ríos que la componen, y,

Tareas c.1), c.2) y c3), correspondiente a la actividad c) Influencia de la variación de la carga sedimentaria del río Bermejo en el Sistema Paraguay - Paraná - de la Plata.

En el desarrollo de los puntos planteados se han respetado los títulos de las tareas y actividades especificadas en el contrato. Las figuras y Tablas se encuentran en los capítulos correspondientes separados por actividades.

Resulta oportuno recordar en esta instancia los objetivos generales del estudio, especificados en el contrato:

† Evaluar la dinámica fluviomorfológica de los principales ríos de la Alta Cuenca (AC) del río Bermejo.

† Evaluar la importancia relativa, localización y características de los distintos mecanismos de producción de sedimentos en las distintas subcuencas, a partir de la caracterización de unidades de paisaje y la zonificación ambiental de la AC, desde este punto de vista. Determinar la incidencia en la generación de sedimentos de posibles propuestas de manejo de subcuencas que se consideren viables.

† Analizar y simular con técnicas de modelación el transporte de sedimentos en la AC para distintos escenarios de acciones, estructurales y no estructurales, y determinar la afectación que las mismas generarían en la carga sedimentaria del Bermejo aguas abajo. En particular, analizar la incidencia de los aprovechamientos de Arrazayal y Las Pavas, sobre el río Bermejo, y Cambarí, sobre el río Tarija, cuyo proyecto está siendo llevado adelante por la Comisión Binacional para el Aprovechamiento de los Recursos de la Alta Cuenca del Río Bermejo y del Río Grande de Tarija. Analizar además la incidencia de los escenarios de manejo de cuencas que surjan del punto anterior.

† Determinar el efecto que tendrían las alteraciones de la carga sedimentaria de dicho río en los procesos observados del funcionamiento del Delta del Río Paraná, desde el punto de vista fluviomorfológico.

† Evaluar la incidencia que los señalados cambios en la carga sólida del río Bermejo, tendrían en los procesos de sedimentación de los canales de navegación de la Hidrovía Paraguay - Paraná. Análisis de la

potencial influencia en la variación de los volúmenes de dragado de mantenimiento en la vía navegable.

Resulta oportuno realizar aquí algunos comentarios acerca de los sedimentos transportados por el río Bermejo y su relación con la calidad del agua de dicho río, en relación con su influencia en el sistema Paraguay - Paraná - Delta del Paraná - Río de la Plata.

A partir de los aforos líquidos disponibles (Brea, J.D.; Busquets, M.S.; Spalletti, P.D.; 1996), el caudal medio anual del río Bermejo en la Junta de San Antonio es de 215 m³/s, de los cuales el 56 % corresponde al río Grande de Tarija y el 44 % al Bermejo Superior. Después de la afluencia del río Pescado, el módulo del río alcanza los 347 m³/s. Del total del derrame anual, más del 85 % se produce en el período estival. El caudal medio anual aguas abajo de la unión del Bermejo con el San Francisco es de 446 m³/s, lo que constituye el aporte de agua de la Alta Cuenca (AC) a la Baja Cuenca (BC) del río Bermejo.

De acuerdo al estudio de la O.E.A. (O.E.A., 1973), la calidad del agua de la AC es buena. En el marco de dicho estudio, y con el objeto de conocer la calidad físico-química del agua superficial, su variación en el tiempo y a lo largo de los cauces, se estableció un programa de muestreo, análisis e interpretación, con más de 100 puntos de muestreo, que permitió arribar a la conclusión inicial.

Del total de los puntos de muestreo, siete se ubicaron en territorio boliviano, cuatro en los ríos de frontera, y los restantes en territorio argentino. Se estudió la calidad del agua teniendo en cuenta su posible aprovechamiento para uso doméstico, industrial y riego.

Un trabajo similar se realizó para la BC del río Bermejo (O.E.A., 1975), con similares resultados. Se encontró que, de acuerdo a sus características químicas, el agua del Bermejo en su cuenca inferior es potable, «presentando como único inconveniente una elevada turbiedad debido a la concentración de sedimentos en suspensión y que alcanza valores muy significativos ...». Desde el punto de vista del uso para riego, el agua del Bermejo resulta muy buena, y es utilizada principalmente en arrozales, «... presentando como único inconveniente la elevada cantidad de sedimentos en suspensión.»

Un estudio reciente (Taylor-Golder-Consular-Connal, 1996), en el que se analizó la calidad de aguas y sedimentos a lo largo de la Hidrovía Paraguay - Paraná, remarca el hecho que «... el río Paraguay exhibe características substancialmente diferentes entre la calidad del agua, aguas arriba y aguas abajo de la confluencia con el río Bermejo.». La diferencia radica en la importante carga sólida en suspensión que ingresa al Paraguay por el río Bermejo. Sólo este hecho es señalado como afectación del río Bermejo a la calidad del agua del sistema.

Una idea de la magnitud del caudal sólido en suspensión aportado por el Bermejo al sistema Paraguay - Paraná, puede obtenerse si se comparan los caudales líquidos y sólidos aportados. Tal como se expresara más arriba, el caudal líquido medio anual aguas abajo de la unión del Bermejo con el San Francisco es de 446 m³/s. Este caudal representa el 2.5 % del módulo del río Paraná a la altura de la ciudad de Corrientes. En contraste, es muy superior el aporte de caudal sólido: según el informe de la O.E.A. el aporte sólido del Bermejo al Paraná constituye cerca del 75 % del total de dicho río. Tal como se comprobará en el desarrollo del presente informe, este porcentaje se ha incrementado en los últimos años, pudiendo decirse hoy que casi el 90 % de los sólidos suspendidos del Paraná en Corrientes son aportados por el río Bermejo. Estos sólidos recién encuentran condiciones favorables de sedimentación en el Río de la Plata.

Por lo tanto, los sólidos en suspensión del río Bermejo constituyen el parámetro de calidad de agua excluyente, si se considera el sistema Paraguay - Paraná - Río de la Plata. Si bien a una escala local hay zonas en que la calidad del agua del río Bermejo resulta no aceptable para ciertos fines, tal como surge de conclusiones extraídas de otros proyectos del PEA, considerando una escala macro (Cuenca del Plata) los sólidos en suspensión son el único parámetro significativo.

El estudio de la producción, movimiento y deposición de los sedimentos desarrollado en el marco del presente contrato permitió el conocimiento acabado de estos mecanismos en la cuenca del río Bermejo y su influencia en el resto de los ríos del sistema, lo que concluirá en la definición de planes de acción para paliar los impactos negativos asociados.

CAPÍTULO A PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN LA ALTA CUENCA

A) PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN LA AC.

A.1) DEFINICIÓN DE UNIDADES DE PAISAJE.

El desarrollo de estas tareas se presenta en el Anexo I.

A.2) DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS.

I. PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR EROSIÓN SUPERFICIAL.

En los puntos siguientes se presentan la metodología utilizada, los datos, los resultados y las conclusiones del estudio de producción de sedimentos por erosión superficial en la parte argentina de la Alta Cuenca del Río Bermejo.

a.2.i.1. Zona de estudio.

El estudio abarcó la Alta Cuenca del Río Bermejo en territorio argentino, compuesta principalmente por las cuencas de los ríos Bermejo Superior y San Francisco. En la Figura N° 1 se muestra un plano general de la región.

En la zona existen registros de aforos sólidos en suspensión en varias estaciones, las que se detallan a continuación, indicándose también el período de registro (Agua y Energía Eléctrica, 1991):

Cuenca del Río San Francisco:		
Río	Estación	Período
Candelaria	Arrayanal	1967-1989
Grande	San Juancito	1962-1981
Lavayén	Bajada de Pinto	1942-1981
Mojotoro	El Angosto	1942-1982
San Francisco	Caimancito	1948-1989
Valle Grande	Peña Alta	1967-1989
Cuenca del Río Bermejo Superior:		
Río	Estación	Período
Astillero	El Angosto	1982-1986
Bermejo	Aguas Blancas	1945-1989
Bermejo	Alarache	1971-1989
Bermejo	Arrazayal	1969-1989
Bermejo	Balapuca	1971-1989
Bermejo	Zanja del Tigre	1945-1989

Cuenca del Río Bermejo Superior:		
Astillero	El Angosto	1982-1986
Cañas	Las Bateas	1983-1989
Grande de Tarija	San Telmo	1967-1989
Grande de Tarija	Astilleros	1968-1985
Iruya	El Angosto	1971-1983
Iruya	San José	1980-1996
Pescado	Pto. Romero-C.Cedros	1967-1989
Piedras	San Antonio	1982-1989

En la citada Figura N° 1 pueden apreciarse los ríos y las estaciones especificadas.

a.2.i.2. Metodología de cálculo.

Para calcular el volumen de sedimento que se genera en la zona de estudio, se aplicó la metodología de Gavrilovic (Gavrilovic, S., 1959; Gavrilovic, Z., 1988; Zemljic, M., 1971), que estima la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca, y que es transportado a la sección del río que la define.

Es un método empírico que se compone de dos partes:

- 1.- La producción media anual de sedimento por erosión superficial (W).
- 2.- El coeficiente de redepositación o de retención de sedimentos (R).

De ambos se obtiene el volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección final de la cuenca (G).

$$G = W \cdot R \quad \text{m}^3/\text{año}$$

Los procesos erosivos son el resultado de la interacción de varios factores: topografía, clima, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas, geomorfología. Por ello las formulaciones intentan incluir estas variables con un adecuado peso relativo.

La expresión para determinar el volumen promedio anual erosionado de sedimento es:

$$W = T \cdot h \cdot \left(\frac{Z}{2} \cdot F \right) \quad \text{m}^3/\text{año}$$

donde:

W = volumen promedio anual erosionado de sedimento (m³/año).

T = coeficiente de temperatura, que se obtiene de:

$$T = \left[\left(\frac{t}{10} \right) + 0,1 \right]^{1/2}$$

t = temperatura promedio anual.

h = precipitación media anual (mm/año).

F = superficie de la cuenca (km²).

Z = coeficiente de erosión, cuya expresión es:

$$Z = X \cdot Y \cdot (\phi + I)^{1/2}$$

X = coeficiente de uso del suelo.

Y = coeficiente de resistencia del suelo a la erosión.

φ = coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados.

I = gradiente de la pendiente superficial (en %).

Los valores de X, Y y φ son propuestos por los autores, como producto de más de 20 años de experiencia en el campo.

Estos coeficientes representan, respectivamente, el grado de protección del suelo dado por la vegetación y la intervención antrópica, el grado de erodibilidad del suelo, y el estado de inestabilidad de la cuenca.

En las Tablas N° 1, 2 y 3 se presentan los valores recomendados de los coeficientes φ, X e Y respectivamente.

En particular el coeficiente φ está asociado a los procesos de erosión observados, con valores que varían entre 1 y 0.1. Los autores presentan una tabla para la determinación del coeficiente, de acuerdo a los tipos de erosión observada, el porcentaje de área de la cuenca afectada por el mismo y su gravedad. Es así que los valores varían si hay cárcavas y fuertes procesos erosivos, deslizamientos de masa, erosión superficial, deslizamientos de rocas, etc. A su vez, en los casos en que el grado de erosión es bajo se hace una discriminación de acuerdo al tipo y cantidad de cobertura vegetal de la zona.

El parámetro X caracteriza el uso del suelo y adopta valores entre 0.05 y 1. En este caso los autores indican valores de los coeficientes de acuerdo al uso del suelo y su cobertura, dando distintos valores si

es un suelo desnudo, campos cultivados, sembradíos, pasturas de montaña, vegetación perenne, pastizales, bosques en zonas de alta y baja pendiente, etc.

Por último, el parámetro Y indica la resistencia del suelo a ser erosionado. Se dan distintos valores de acuerdo al tipo de suelo de la superficie, como ser arenas, gravas, loes, arcillitas, areniscas, gneis, esquistos, rocas ígneas, etc., y de acuerdo a su ubicación y procedencia, pudiendo indicarse, por ejemplo, suelos de montaña, depósitos aluviales, etc. Este coeficiente varía entre 0.25 y 2.

El coeficiente R indica la relación entre el volumen de sedimento que efectivamente pasa por la sección de cierre de la cuenca y el volumen total de material producido por erosión superficial.

La expresión para el coeficiente de retención de sedimentos es la siguiente (Zemljic, 1971):

$$R = [(O \cdot D)^{1/2} \cdot (L + Li)] / [(L + 10) \cdot F]$$

donde:

O = perímetro de la cuenca (km).

D = diferencia de nivel media en la cuenca (km).

Li = longitud total de los afluentes fluviales laterales (km).

L = longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km).

F = superficie de la cuenca (km²).

De este modo se puede estimar la descarga media anual de material erosionado (G), lo que significa la producción de sedimentos.

La metodología desarrollada ha sido empleada con éxito en cuencas alpinas, andinas y en otras zonas montañosas, obteniéndose buenos resultados, y con buena concordancia entre los valores medidos y calculados en cuencas piloto o en casos en que pudo efectuarse esta comparación (Brea J.D., Spalletti P., 1997; Cadore, Peviani, Baldin, 1994; Gentile, F.; Puglisi, S.; Trisorio-Liuzzi, G., 1999; Peviani, M.; Baldin, M.; Crepaldi L., 1994).

a.2.i.3. Datos básicos - Cartas temáticas.

Como se ha mencionado, la metodología empleada para la determinación de la producción de sedimentos considera que los procesos erosivos son el resultado de la interacción de factores tales como clima, litología, uso del suelo, topografía, etc.

Todas estas variables tienen una distribución espacial en la zona de estudio, por lo que los datos básicos para el desarrollo de la metodología de cálculo presentada en el punto anterior, debieron ser recopilados en forma de planos o mapas que reflejen adecuadamente su distribución en la zona de análisis.

En este estudio se contó como información de base, con las cartas temáticas de vegetación, uso del suelo, tipos de suelo y geología, así como las isohietas medias anuales y las isotermas medias men-

suales, además de las curvas de nivel en escala 1:100000 para gran parte de la cuenca y 1:250000 para la totalidad de la misma. Toda esta información básica fue desarrollada en el marco del PEA.

A partir de los datos básicos recibidos se procedió a tratar la información, organizándola en mapas y tablas con un formato adecuado para ser procesada con las herramientas de cálculo disponibles, y determinar la producción de sedimentos con la metodología especificada.

Para el manejo y procesamiento de los datos volcados en mapas, se utilizó el software IDRISI for WINDOWS que es un sistema de información geográfica que trabaja bajo el formato raster, es decir, que tiene una disposición en forma de celdas. La ventaja de este programa es que permite la realización de operaciones matemáticas entre distintas imágenes, operando celda por celda, por lo que también fue usado como herramienta de cálculo.

Cabe aclarar que la totalidad de los mapas generados en el presente trabajo se han realizado tomando Gauss - Krugger en faja 4 como sistema de coordenadas.

En la zona estudiada con la totalidad de las curvas de nivel disponibles en escala 1:100000 y 1:250000, y tras su procesamiento con los módulos del programa IDRISI, se obtuvo lo que se denomina el modelo digital del terreno (MDT).

El MDT es una modelación de la topografía compuesta por un mosaico de celdas de pequeñas dimensiones que cubren la totalidad de la zona de estudio, y a las que se les asigna un valor de cota representativo.

En el estudio se trabajó con un tamaño de celda de 100 metros por 100 metros, que fue adoptado con el criterio de definir adecuadamente la información, manteniendo un número de celdas manejable en los cálculos. De acuerdo a los datos de partida, celdas más pequeñas permiten mayor detalle, pero hay un punto en que a medida que se aumenta la resolución no se tiene una mejora real pues se está introduciendo información redundante (UNITAR, 1995).

En la Figura N° 2 se ha representado el MDT, donde la variación de colores va identificando los cambios en los niveles del terreno natural. Las cotas máximas son del orden de los 5100 metros, mientras que las mínimas son inferiores a 400 metros IGM. Se observan algunas discontinuidades que corresponden a las zonas de encuentro de las cartas topográficas 1:100000 y 1:250000, cuando fue necesario usar estas últimas para cubrir la información faltante de las primeras, y a las zonas cercanas a los límites internacionales, ya que no se contó con información de Bolivia. La representación general obtenida resulta adecuada para los fines perseguidos.

Tomando como base los planos de curvas de nivel en escala 1:250000, se realizó la división de la cuenca en 110 subcuencas. En la Figura N° 3 se han graficado las mismas con la indicación de un número de orden que las caracteriza, y en la Tabla N° 4 sus parámetros geométricos (área y perímetro) y otros datos a utilizar en los cálculos, como ser longitud de cauce principal y longitud de afluentes en cada subcuenca.

A partir de las isohietas se realizó su interpolación con el objeto de determinar la distribución espacial en el área de estudio. En la Figura N° 4 se muestra el resultado de dicho procesamiento. Puede apreciarse que el color va variando de azul oscuro a blanco, indicando una variación gradual de las precipitaciones medias anuales, las que se encuentran entre 200 y 2000 mm. En este caso, del mismo modo que cuando se realizó el MDT, se dividió la zona en celdas. En la figura pueden notarse sectores en los que la definición del parámetro es deficiente, debido a la escasa densidad de isohietas y a la falta de las mismas en las inmediaciones de la zona de estudio.

Con una metodología similar se procesaron las isotermas, obteniendo para cada mes un plano de temperaturas medias mensuales. Calculando celda a celda el valor medio se obtiene el mapa presentado en la Figura N° 5 correspondiente a la distribución de temperaturas medias anuales. Estos valores están aproximadamente entre 2 y 20°C.

En las Figuras N° 6, 7, 8 y 9 se han graficado respectivamente los mapas de vegetación, uso del suelo, tipos de suelo y geología. En cada uno de ellos se anexan las correspondientes referencias.

a.2.i.4. Producción de sedimentos.

Como se indicara, se aplicó el método de Gavrilovic que permite estimar la producción de sedimentos en cuencas de montaña, utilizando un GIS que trabaja con formato raster como herramienta de cálculo y procesamiento.

Se calcularon separadamente los parámetros W y R definidos en el punto a.2.i.2., de acuerdo a la siguiente metodología.

a.2.i.4.1. Determinación del parámetro w.

Los valores de W pueden obtenerse de dos maneras:

- Un valor para cada celda.
- Un valor por subcuenca, tomando valores medios.

Si bien los valores de los coeficientes y de las variables actuantes han sido desarrollados y probados en base a estudios sobre cuencas, su aplicación a cada celda es válida, permitiendo una mayor precisión por poder asignarle a cada una un valor representativo de las variables intervinientes. Cabe aclarar que estos valores se refieren a características físicas locales, y no a parámetros vinculados a la cuenca toda.

De esta forma, para cada celda se calculó el término:

$$Wc/Fc = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \quad [m^3/año \ km^2]$$

donde:

Wc = volumen promedio anual de sedimento erosionado (m³/año) en la celda.

Fc = superficie de la celda (km²).

Para poder llevar a cabo esta operación es necesario contar con imágenes raster de cada una de las variables que intervienen en el cálculo. La correspondiente al parámetro «T», que es función de la temperatura media anual, de acuerdo a la siguiente relación:

$$T = [(t/10) + 0.1]^{1/2}$$

se calculó directamente operando mediante módulos del programa IDRISI a partir del mapa de temperaturas, presentándose el resultado en la Figura N° 10.

El mapa del parámetro «h» se obtuvo de la interpolación de las isohietas correspondientes a precipitaciones medias anuales en mm/año (ver Figura N° 4).

Para calcular el valor del parámetro «Z» (coeficiente de erosión), para cada celda de la cuadrícula en que se dividió la zona de estudio, se debió calcular el valor de cada uno de los coeficientes que intervienen en su determinación, para cada casilla.

Como ya se indicara, la expresión de «Z» es:

$$Z = X \cdot Y \cdot (\phi + I^{1/2})$$

donde: X = coeficiente de uso del suelo.

Y = coeficiente de resistencia del suelo a la erosión.

φ = coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados.

I = gradiente de la pendiente superficial.

Como se indicara antes, en las Tablas N° 1, 2 y 3 se presentan los valores recomendados de φ, X e Y respectivamente, de acuerdo a las características locales. Para su determinación se utilizaron los planos de vegeta-

ción, uso del suelo, tipos de suelo y geología.

Para cuantificar el coeficiente «X», en primera instancia se superpusieron las áreas de cultivo del mapa de uso de suelos al de vegetación, asignando a cada tipo de unidad del plano resultante un valor del factor de la siguiente manera:

Descripción	X
Selva montana	0,05
Bosque de transición	0,15
Chaco serrano	0,20
Bosque montano	0,40
Pastizal serrano	0,50
Prepuna	0,60
Puna	0,80
Altoandino	0,90
Ripario	1,00
Cultivo	0,65
Médanos	1,00
Suelo desnudo	1,00
Ciudades	0,70

Para la determinación del coeficiente «Y» fue utilizado como base el mapa de geología, definiendo valores de resistencia a la erosión entre 0,5 y 1,6 para cada identificador. Del plano de vegetación se determinaron las zonas de ripario, asignando al mismo un valor de 0,5 por considerarlos depósitos aluviales de buena textura.

Simultáneamente, y a modo de verificación, se controló que la variación del coeficiente se correspondía con las zonas en que se dividió el mapa de uso de suelo. En él se clasificaron algunos suelos como de erosión moderada, y otros como de erosión ligera.

Para determinar los valores del coeficiente «φ», se utilizaron en especial los mapas de tipo de suelo y vegetación, que son los que permiten definir de mejor manera la importancia de los procesos erosivos observados. Este parámetro es el menos sensible en la determinación de la producción de sedimentos (Cadore, Peviani, Baldi, 1994).

En la Figura N° 11 se presenta el plano con los valores de «X» adoptados en la zona de estudio. La Figura N° 12 muestra la distribución espacial del parámetro «Y» en la misma región, y la Figura N° 13 la del coeficiente «φ».

Respecto al gradiente de la pendiente superficial, el IDRISI tiene un módulo específico que calcula la máxima pendiente de las celdas, a partir del modelo digital de terreno y genera un mapa de los resultados. En la Figura N° 14 se ha representado el mapa con la distribución de las mismas. Valen

para esta figura las consideraciones hechas al analizar el MDT. La escasa definición de este parámetro en la zona inferior de la cuenca, se debe a la ausencia de datos topográficos adecuados en dicha región. No obstante, como las pendientes en dicha zona son bajas, los errores cometidos al calcular la erosión no son significativos.

Con las distribuciones espaciales de «X», «Y», «φ» e «I», se calcula «Z» y posteriormente se determina el valor de $Z^{3/2}$ para cada casilla. En la Figura N° 15 se tiene el plano del parámetro «Z» en la cuenca estudiada.

Una vez obtenidos los planos de «T», «h» y «Z», se opera entre ellos de forma tal de hallar el valor Wc/Fc para cada casilla. Estos resultados se han publicado en la Figura N° 16.

Analizando la ecuación general:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F \quad [m^3/año]$$

correspondiente a una determinada subcuenca, y teniendo en cuenta la forma en que se llevó a cabo el cálculo, donde se trabajó con cada celda en forma individual, la ecuación podría reescribirse como:

$$Wc = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot Fc \quad [m^3/año]$$

y aplicando sumatoria para la totalidad de celdas de una subcuenca, a ambos miembros se tiene:

$$\sum Wc = \sum (T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot Fc) \quad [m^3/año]$$

Como la superficie de las celdas es una constante, la expresión anterior es equivalente a:

$$W = \sum Wc = Fc \sum (T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2}) \quad [m^3/año]$$

con lo que el volumen promedio anual erosionado de sedimento ($m^3/año$) para la subcuenca puede calcularse sumando todos los valores de Wc/Fc de las celdas incluidas en la superficie de la misma, y multiplicando dicha sumatoria por la superficie de las casillas.

El término Wc/Fc indica la tasa anual promedio de producción de sedimento por erosión ($m^3/año \cdot km^2$), por lo que el mapa de su distribución en toda la cuenca estudiada, presentado en la Figura N° 16, es un claro indicador de las zonas más susceptibles de ser atacadas por erosión superficial.

a.2.i.4.2. Determinación del parámetro R.

Obtenido el valor de W para cada cuenca, debe multiplicarse por un coeficiente de retención (R), que expresa la cantidad de sedimento que es producida por la cuenca y que llega a la sección final de la misma, luego de la redistribución interna.

El valor de «R» depende de parámetros que caracterizan a la cuenca toda, por lo que no se puede trabajar con las celdas como unidad de cálculo, pues habrá un único valor de «R» para la cuenca y por lo tanto todas las celdas incluidas en ella tendrán el mismo valor.

Como ya se indicara, la ecuación del coeficien-

te de retención es:

$$R = [(O D) 1/2 (Lc + Li)] / [(Lc + 10) F]$$

donde:

O = perímetro de la cuenca (km)

D = diferencia de nivel media en la cuenca (km)

D = Dm - Dc

Dm = cota media de la cuenca

Dc = cota mínima de la cuenca

Li = longitud total de los afluentes fluviales laterales (km)

Lc = longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km)

F = superficie de la cuenca (km²)

Los valores de O, F, Lc y Li se calcularon a partir del plano de las cuencas, y tal como se indicara en el punto a.2.i.3., se presentan en la Tabla N° 4. Los parámetros Dm y Dc se calculan a partir de los planos de las cuencas y el MDT, con una serie de cálculos realizados con módulos del programa. En la Tabla N° 5 se presentan los valores obtenidos.

Una vez definidas todas las variables, se procede al cálculo del coeficiente de retención para cada una de las subcuencas. En la Tabla N° 6 se han volcado los resultados.

Para ver la influencia del coeficiente R, en la Figura N° 17 se ha representado la distribución de Wc en la zona de estudio, y en la Figura N° 18 el producto de Wc con R. Para esta operación se consideró un único valor de R para todas las celdas de una misma subcuenca.

a.2.i.5. Análisis de resultados.

a.2.i.5.1. Volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección final de la cuenca (G).

El cálculo final consiste en la determinación del volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección final de la cuenca (G) para cada una de las subcuencas, multiplicando los correspondientes valores de W y R. Los resultados se han volcado a la Tabla N° 7, donde se indican los volúmenes de sedimento G, en m³/año.

En la Figura N° 19 se presentan las subcuencas, pero en este caso, agrupadas de acuerdo a las estaciones de medición asociadas. Es decir que se han representado con un mismo color las zonas cuya producción de material puede ser observada en la misma sección.

Para conocer la producción de sedimentos por erosión superficial en las zonas dominadas por una determinada estación, se realizó la sumatoria de los valores de «G» correspondientes a las subcuencas incluidas en dichas áreas, de acuerdo a la Figura N° 19 y a la Tabla N° 7.

Los resultados se indican en el siguiente cuadro:

Estación	Tn/año
Arrayanal	881200
San Juancito	11326000
Bajada de Pinto	2852100
El Angosto	1167300
Caimancito	21427000
Peña Alta	3811200
San José	2881600
Pto. Romero - C. Cedros	672900
Colonia Colpana	3855600
Río Blanco	2826200

a.2.i.5.2. Comparación de los valores medidos y calculados de producción de sedimentos.

En las estaciones indicadas, excepto en el Río Blanco sobre el que no existen estaciones y en Colonia Colpana, se cuenta con registros de aforos de sólidos en suspensión, para diferentes periodos (Agua y Energía Eléctrica, 1991). Estos valores tienen en cuenta la producción de sedimentos en la cuenca debidas a todas las posibles causas de erosión, incluidos fenómenos tales como deslizamientos, en cambio el método de Gavrilovic estima la componente debida sólo a erosión superficial.

Estas mediciones de caudales sólidos en suspensión, permiten efectuar la comparación de los valores medidos con los calculados utilizando la metodología presentada, siempre teniendo en cuenta lo expresado acerca de las diferentes fuentes de sedimentos posibles en una cuenca, ya que en el caso de la Alta Cuenca del Bermejo es conocida la importancia de los procesos de remoción en masa en algunas de las subcuencas (Brea, Spalletti, 1997; Spalletti, Brea, 1998, Culot, Grubinger, Schmid, 1984).

Por otro lado, la metodología de cálculo presentada, permite determinar la importancia relativa de los distintos procesos erosivos en las diferentes subcuencas del sistema analizado.

En el siguiente cuadro (al pie de la página) se presenta la comparación realizada:

Antes de analizar puntualmente cada caso, si se observan los resultados expuestos en el cuadro precedente, se encuentra que las relaciones entre los montos de sedimento medidos y calculados son muy variables. Esto indica que, aún en las situaciones en las que la erosión superficial es la principal fuente de sedimentos, la diferencia entre valores medidos y calculados puede ser importante, siendo las causas el carácter empírico del método empleado, la asignación de los coeficientes, otras fuentes de producción, entre otras, sumadas al alto grado de variabilidad que implica el trabajar con producción y transporte de sedimentos en agua.

En el mismo sentido, el parámetro «R», que representa la cantidad del sedimento erosionado que se retiene o deposita en la cuenca, es el que presenta las mayores incertidumbres en su determinación, siendo más preciso efectuar el traslado del sedimento producido mediante un modelo de transporte que resuelva las ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

La valoración cuantitativa precisa de la producción de sedimentos de una cuenca resulta pues imposible en la práctica, debido a la complejidad del proceso erosivo, a la cantidad de factores que

influyen en el mismo y a la escala de los fenómenos en juego, que involucran desde cuestiones tan puntuales como la cohesión de las partículas del suelo, hasta parámetros de orden regional como la temperatura o las precipitaciones en la cuenca (Spalletti, P.; Brea, J.D.; 1998).

No obstante, la metodología utilizada da resultados adecuados para los fines perseguidos, tal como se aprecia en las interpretaciones realizadas en los párrafos siguientes.

Con los datos de sólidos en suspensión medios mensuales disponibles, y los correspondientes datos de caudales líquidos medios mensuales (EVARSA, 1994), se construyeron las Figuras N° 20, 21, 22, 23, 24 y 25 para las Estaciones San José sobre el Río Iruya, Puesto Romero sobre el Pescado, El Angosto sobre el Mojotoro, Bajada de Pinto sobre el Lavayén, San Juancito sobre el Grande y Caimancito sobre el San Francisco, respectivamente. Dichas figuras están compuestas por los pares de valores «Derrame anual» - «Material sólido en suspensión anual», conformando las correspondientes nubes de puntos.

En las citadas figuras se indica también, el punto correspondiente al material sólido producido por erosión superficial y que llega a la sección del río donde se ubica la estación de aforo, calculado con la metodología descrita en el trabajo, considerándose los valores volcados en el cuadro precedente y considerando el derrame medio de todos los años con aforos.

La elección del derrame se basó en que para el cálculo con el método de Gavrilovic, los datos que tienen una variación temporal se consideran con su valor medio anual, en particular los datos climáticos como ser la precipitación, que tiene una vinculación directa con los caudales líquidos.

En las estaciones ubicadas sobre afluentes al río Bermejo Superior, se aprecian valores mayores de la relación presentada en la tabla anterior. Ello está de acuerdo con el funcionamiento real de dicha zona respecto de la producción de sedimen-

	Calculado Tn/año (1)	Medido Tn/año (2)	Relación Med/Calc (2)/(1)
Arrayanal	881200	1350500	1.53
San Juancito	11326000	4434300	0.39
Bajada de Pinto	2852100	2038900	0.71
El Angosto	1167300	2434000	2.09
Caimancito	21427000	18901200	0.88
Peña Alta	3811200	3630700	0.95
San José	2881600	13127300	4.56
Pto. Romero - C. Cedros	672900	5312500	7.90

tos, pues algunas de las subcuencas presentan importantes procesos de remoción en masa, por ejemplo, el río Iruya (Brea, Spalletti, 1997; Spalletti, Brea, 1998).

Sin embargo en la estación Puesto Romero sobre el Río Pescado, la aplicación del método de Gavrilovic ha dado resultados que subestiman el valor esperable de acuerdo a los datos disponibles, ya que la relación entre valores medidos y calculados es superior a la de la estación San José sobre el Río Iruya. Si bien ambas cuencas presentan numerosas superficies de deslizamiento, esto es más notorio en la del Iruya, por lo que la relación debería ser mayor en la Estación San José.

Este déficit en el cálculo de material sólido producido por erosión superficial en la cuenca del Pescado, puede deberse a la falta de definición de algunos de los parámetros que intervienen en el cálculo, en particular la topografía que es un dato relevante en la metodología, pues es la base para la determinación del modelo digital del terreno. En casi toda la superficie de esta cuenca, por no contar con información más detallada, se trabajó con las curvas de nivel 1:250000 con equidistancias de 200 metros y escasa definición en las zonas con mayor variación de pendientes, que son las más susceptibles de presentar erosión superficial.

En la estación San José (Figura N° 20) se aprecia que el valor de sedimentos producido por erosión superficial se ubica claramente por debajo de los puntos correspondientes a las mediciones, esto implicaría tal como se indicara antes, que una importante componente del transporte sólido se debe a otras causas (en especial deslizamientos).

En la Figura N° 21, con los datos de la estación Puesto Romero, ubicada sobre el río Pescado, puede notarse una tendencia similar a la de la figura anterior, aunque en este caso, además de las observaciones hechas anteriormente, la dispersión de los pares de valores que conforman la nube de puntos correspondientes a los relevamientos, es mayor.

En la Figura N° 22 correspondiente a la Estación El Angosto sobre el Río Mojotoro, afluente del Río Lavayén, el valor calculado con el método de Gavrilovic se ubica en la parte inferior del grupo de puntos definidos a partir de las mediciones. En cambio, en la Estación Bajada de Pinto (Figura N° 23), el valor calculado está incluido en la nube.

Esto está de acuerdo con las características de las cuencas de aporte de ambas estaciones, pues la primera es una zona netamente de montaña, con otras posibles fuentes de sedimentos. En cambio, en Bajada de Pinto, si bien la cuenca incluye a la anterior, gran parte de la misma tiene un relieve menos accidentado, donde la erosión superficial es la principal causa de aporte sólido.

Sin embargo, si se analizan los datos volcados en la Figura N° 26, los pares de valores de ambas estaciones se confunden en una única nube de puntos, lo que implicaría un aporte despreciable tanto de caudal líquido como sólido, de la cuenca del Río Lavayén sin considerar la del Río Mojotoro. Esto indicaría posibles errores en los relevamientos y pone de manifiesto que ellos no deben considerarse con carácter absoluto.

Respecto del resultado de la estación San Juancito ubicada sobre el río Grande, donde los caudales sólidos calculados a partir de la erosión superficial, son mayores que los caudales sólidos medidos, puede deberse a errores en las mediciones. La configuración de la cuenca de este río, en relación con los parámetros más significativos en el cálculo de la producción de sedimentos que le corresponden, indican que los volúmenes calculados están más cerca de la realidad que los acusados por los registros disponibles. El análisis realizado en el punto a.2.ii. del presente informe refuerza lo expresado.

Observando la Figura N° 24, construida con los datos disponibles en la Estación San Juancito, se aprecia que los pares de valores correspondientes a los datos medidos tienen una gran dispersión y no se nota una tendencia de los sólidos en suspensión a crecer con el incremento de los derrames.

En dicha figura también se incluyó un punto cuya abscisa es el derrame medio de todos los valores anuales registrados y su ordenada fue calculada restándole a los valores medios de material sólido en suspensión en Caimancito, los aportes sólidos de las otras estaciones y el material producido por erosión superficial en la zona no cubierta por estaciones. Este valor es más cercano al calculado por el método de Gavrilovic.

Lo indicado en los párrafos anteriores nuevamente pone de manifiesto, la presencia de posibles errores en los relevamientos, en este caso en la Estación San Juancito.

Para la Estación Caimancito localizada sobre el Río San Francisco, el valor calculado de material sólido producido por erosión superficial, se ubica en medio de la nube de puntos definida a partir de las mediciones tal como se muestra en la Figura N° 25.

II. PROCESOS DE DESMORONAMIENTO, DESLIZAMIENTO Y FLUJOS RÁPIDOS DE REMOCIÓN EN MASA.

Los movimientos de remoción en masa rápidos, tales como desmoronamientos (slumps), deslizamientos (slides) de masas de rocas y de detritos, caídas (falls) de masas rocas y de detritos, y flujos de barro o de tierra (mudflows o, en general, debris flows) son característicos de muchas regiones montañosas. En las áreas en las que operan, no sólo constituyen importantes modeladores del paisaje, contribuyendo a la degradación de áreas positivas, sino que proveen grandes volúmenes de materiales sólidos a las cuencas hídricas.

Muchos de estos desplazamientos son característicos de las áreas de aporte o de las zonas de cabeceras de las cuencas hídricas, tal el caso de los desmoronamientos, deslizamientos y caída de rocas y detritos. Estos procesos, favorecidos por los fenómenos de meteorización física o de desintegración de las rocas y por marcados relieves, son generadores de acumulaciones detríticas en las áreas más proximales de los sistemas fluviales, y poseen un muy elevado nivel de energía potencial, por lo que constituyen la fuente de alimentación detrítica de las cuencas hídricas al ser posteriormente removilizados en forma gravitacional por otros agentes superficiales.

Por su parte, los flujos de barro y de tierra, junto con otros agentes de transporte fluvial (tales como flujos hiperconcentrados, mantos de crecientes y crecientes encauzadas), se alimentan de los anteriores y producen el transporte de sedimentos de todas las granulometrias posibles hacia las regiones ubicadas fuera del frente de montaña. Generan así las más importantes acumulaciones de los abanicos y conos aluviales y de los sistemas fluviales entrelazados gravosos proximales (transversales y longitudinales) de las cuencas hídricas, así como buena parte de la carga detrítica traccional, suspensiva y de lavado del sistema fluvial colector medio y distal.

Con todo, estos movimientos de remoción en masa rápidos, no operan con igual intensidad en cualquier región caracterizada por fuertes desniveles topográficos. Existen diversos factores determinantes de la existencia de estos procesos de movilización detrítica, entre los que se pueden destacar:

- Factores geológicos
- Factores geomorfológicos
- Factores climáticos
- Factores orgánicos

a. 2. ii. 1. Factores geológicos

Los factores geológicos son de distinta índole.

Por una parte se encuentran los aspectos litológicos, entre los que se destaca la presencia de

materiales inconsolidados a poco consolidados, entre ellos las rocas sedimentarias (areniscas, fangolitas, arcilitas, carbonatos) o metamórficas de bajo grado (pizarras, filitas, esquistos), así como las gravas sueltas favorecen la disponibilidad detrítica y proveen de una elevada tasa de materiales susceptibles a la movilización por agentes gravitacionales.

Resultan también importantes los aspectos estratigráficos, tales como la existencia de sucesiones estratificadas (sedimentarias, piroclásticas, inclusive volcánicas), así como foliadas o esquistosas (metamórficas de bajo grado), en las que - además de las superficies planares de discontinuidad - son significativas las alternancias entre cuerpos de rocas porosas y no porosas. Estos conjuntos estratificados proveen mayores volúmenes de materiales en comparación con los cuerpos de rocas más homogéneas, como son los granitoides (granitos, granodioritas, tonalitas, etc.) y las metamórficas de alto grado (gneisses y migmatitas).

A los antes mencionados, debemos sumar los aspectos estructurales, entre los que se destacan la existencia de conjuntos rocosos deformados (dislocados, plegados) y la presencia de fallas y diaclasas que favorecen la desintegración y el desprendimiento de las masas rocosas. Particularmente, las escarpas de falla y de frentes de corrimiento o de cabalgamiento adquieren una importancia fundamental al producir significativas diferencias de topografía regionales y locales. Por otra parte, la existencia de sucesiones dislocadas con fuertes valores del ángulo de buzamiento (inclinación máxima de estratos u otras estructuras planares) son fuentes esenciales de aprovisionamiento detrítico y de masas de rocas, sobre todo cuando la orientación de las capas inclinadas coincide con las de la pendiente de las laderas montañosas (pendientes de buzamiento).

Entre los factores geológicos, el vulcanismo ejerce un rol fundamental en la generación de muy diversos tipos de movimientos en masa (Polanski, J.; 1966). Desde ya que en primer término, los fenómenos volcánicos son - en sí mismos - generadores de relieves, pero aparte de estos factores, los episodios volcánicos son capaces en pocos instantes de generar enormes volúmenes de materiales detríticos que pueden ser removilizados gravitacionalmente. Al respecto, en forma independiente de los productos primarios del vulcanismo (como son la generación de flujos lávicos, las caídas y los flujos piroclásticos), los fenómenos explosivos pueden producir grandes procesos de removilización detrítica por colapso gravitacional y por aportes significativos de grandes volúmenes de agua (fusión de glaciares de las cumbres volcánicas, súbito vaciamiento de los lagos de los cráteres) (Mazzoni, M.; 1986).

a.2.ii.2. Factores geomorfológicos.

Ya se ha mencionado que el relieve de un área de montañas es fundamental para la producción de los movimientos de remoción en masa rápidos. Por supuesto que cuanto mayores sean los desniveles más altas serán las posibilidades de poner en movimiento volúmenes rocosos. En este sentido, deben considerarse tanto el relieve absoluto (alturas máximas sobre el nivel del mar) como los relieves relativos o locales, es decir las diferencias de nivel entre los puntos topográficamente más altos y la localización de los valles o los niveles de base locales.

Mencionaremos a continuación algunos ejemplos sobre la importancia de los factores geomorfológicos.

En las áreas cordilleranas, las cotas absolutas determinan la existencia de la línea de firn o de nieve y de la línea de vegetación. La posición de estas líneas, obviamente está relacionada con la latitud a la que se encuentra localizada la región y con los fenómenos climáticos globales. Al respecto, durante el Pleistoceno, y a causa del fenómeno de enfriamiento global, la posición de la línea de nieve fue más baja que en la actualidad dando lugar a fenómenos de glaciación o de nivación en áreas que hoy en día aparecen desprovistas de hielo, de nieves permanentes o semipermanentes. Estos procesos de glaciación o nivación del Pleistoceno han sido factores esenciales en la generación de grandes volúmenes de detritos que quedan disponibles para su removilización durante los posteriores períodos post-glaciales o de climas más benignos.

Al pie de las regiones montañosas, y donde se produce la salida del frente topográfico de los colectores fluviales principales (canales de descarga), hay un brusco cambio en las pendientes que se traduce en la súbita depositación de muy abundantes materiales detríticos, con la consecuente generación de un cono o abanico aluvial, caracterizado por el desarrollo de una red de drenaje distributaria, justamente a expensas de cada canal de descarga (Denny, C.; 1967; Hooke, R.; 1967). Estos grandes cuerpos sedimentarios, generados por la interacción de crecidas no encauzadas, crecidas en manto y movimientos de remoción en masa rápidos (flujos de barro y de tierra), suelen tener un crecimiento vertical, lateral y frontal muy vertiginoso, lo que favorece los procesos de progradación o de avance del frente de acumulación sedimentaria (Blair, T.; 1987; Nemec, W. y Postma, G.; 1993; Collinson, J.; 1996). El tamaño y tasa de crecimiento de los abanicos aluviales depende del relieve, de las constitución geológica de las áreas de aporte y -fundamentalmente- del desarrollo o tamaño de la cuenca imbrífera de cabeceras. Como consecuencia de estos fenómenos, el canal de descarga también prograda sobre la superficie del abanico que él mismo creó, desplazando distalmente el punto de distribución de cargas (o punto de generación de la red de drenaje distributaria) y produciendo una fuerte excavación en el área de cabeceras del propio abanico (Denny, C.; 1967; Spalletti, L.; 1972). Este proceso deja a los sedimentos de esa zona apical «colgados» o susceptibles a ser removilizados por caída hacia el canal de descarga.

a.2.ii.3. Factores climáticos.

La existencia de procesos de remoción en masa está estrechamente vinculada con la provisión de agua. La situación más favorable para que se produzcan estos desplazamientos no se da cuando la disponibilidad de agua es más o menos permanente, sino cuando sus aportes son súbitos y/o esporádicos. Así, como comentáramos la importancia de la fusión de glaciares o vaciamiento de lagos-cráteres vinculados a vulcanismo, el clima puede constituirse en un factor esencial en las episódicas contribuciones de agua al sistema de generación-transporte-acumulación de sedimentos.

En tal sentido, los aportes súbitos o esporádicos de agua están relacionados con dos distintas condiciones climáticas: glaciales y semiáridas. En climas (relativamente) fríos, con glaciares templados, como los de tipo alpino, en el invierno prevalece la acumulación nival, pero en los veranos se hace predominante la ablación y por lo tanto los sistemas sedimentarios reciben una sobrealimentación de caudales hídricos, lo que favorece la generación de movimientos de remoción en masa rápidos, así como de flujos hiperconcentrados y de crecientes encauzadas.

Por su parte, en las regiones semiáridas, las lluvias son escasas, pero su precipitación es copiosa, concentrándose durante muy breves períodos del año (verano), en los que obviamente son mayores las posibilidades de generación de desmoronamientos, deslizamientos y flujos en masa (Polanski, J.; 1966). Más aún, este efecto puede verse acentuado con las primeras precipitaciones torrenciales que suceden a lapsos en los que se han sucedido varios veranos poco lluviosos, ya que resulta muy grande la disponibilidad de materiales detríticos y masas de rocas con elevada energía potencial, susceptibles a los procesos de removilización gravitacional.

a.2.ii.4. Factores orgánicos.

Están referidos a la cubierta vegetal y en tal sentido cuanto más desprovista de vegetación se encuentre la superficie del terreno, son mucho mayores las posibilidades de removilizar a las masas detríticas y de rocas (Spalletti, L.; 1972). En las regiones montañosas de latitudes medias y altas, las áreas con mayor susceptibilidad a la erosión son las que se encuentran en las partes altas de las laderas, a alturas por encima de la línea de vegetación. En las regiones semiáridas, la existencia de una pobre cobertura vegetal y el desarrollo de suelos esqueléticos poco cohesivos, desde los desnudos a aquellos que soportan una rala pastura de montaña, favorece enormemente el fenómeno de generación de deslizamientos, procesos de caída y de flujos de detritos. A este respecto, vale la pena comentar que los abanicos aluviales de regiones secas a semiáridas (Bull, W.; 1972; Spalletti, L.; 1972, 1980; Ethridge, F.; 1985) están caracterizados por la acumulación de materiales gruesos (aglomerados a gravas) debidos a la interacción de fenómenos de crecientes fluviales, flujos hiperconcentrados y flujos de barro y de tierra, mientras que los abanicos aluviales de las regiones húmedas (Ethridge, F.; 1985) están constituidos por una red de drenaje trezada de naturaleza gravosa o gravo-arenosa en la que dominan netamente los procesos de sedimentación fluviales o por crecidas encauzadas.

a.2.ii.5. Los procesos en masa en las áreas de cabeceras de la Alta Cuenca del río Bermejo.

La existencia de fenómenos de removilización detrítica por movimientos de remoción en masa en el noroeste argentino ha sido destacada por diversos autores, y resulta de singular importancia en distintas áreas de la alta cuenca del río Bermejo (Harrington, H.; 1946; Polanski, J.; 1966; Spalletti, L.; 1972). El análisis de los procesos y de las contribuciones de detritos por desmoronamientos, deslizamientos y flujos en masa rápidos en esta región, requiere de la ponderación del conjunto de factores que se han discutido previamente.

Desde el punto de vista geológico, al occidente se ubica la Cordillera Oriental que se extiende hasta la Quebrada de Humahuaca, mientras que al este de esta depresión se pasa al ambiente de las Sierras Subandinas. Predominan en la región las sucesiones leptometamórficas del basamento (pizarras, metapelitas y areniscas levemente metamorfozadas) correspondientes a la Formación Puncoviscana y espesas sucesiones sedimentarias clásticas y carbonáticas del Cámbrico, Ordovícico, Silúrico y Devónico. En forma más restringida se identifican sedimentitas silicoclásticas del Carbonífero hasta Triásico, las que son cubiertas por los importantes depósitos clásticos y carbonáticos correspondientes al rift del Cretácico - Terciario. Com-

pletan la estratigrafía los depósitos predominantemente clásticos de las cuencas de antepaís neógenas generadas como resultado de la tectónica andina, y la espesa cobertura de sedimentos fluviales y diamicticos cuaternarios. Como se aprecia en el plano de Geología (Figura N° 9), toda la región muestra el absoluto dominio de sucesiones estratificadas, las que -dada la disposición coincidente de las principales líneas de fracturación, de los sobrecorrimientos andinos, y el rumbo y vergencia de las principales estructuras de plegamiento- se disponen preferentemente en fajas con un marcado sentido meridiano, es decir paralelas a la orientación de los principales sistemas fluviales (río Grande de Jujuy, río Bermejo, río Grande de Tarija, río San Francisco).

Los fenómenos volcánicos, tan importantes en el área puneña a las mismas latitudes, no se manifiestan en la alta cuenca del Bermejo, salvo los aportes de cenizas transportadas desde la Puna por los vientos del sector cordillerano.

Las áreas topográficamente elevadas (Modelo Digital del Terreno, Figura N° 2), así como los sectores de pendientes máximas (Pendientes, Figura N° 14) también se orientan según ejes norte-sur, especialmente a lo largo de las divisorias locales que flanquean a los mencionados sistemas fluviales. Las temperaturas medias anuales están fuertemente reguladas por el relieve (comparar plano de Temperaturas Medias Anuales, Figura N° 5, con los antes mencionados).

En cambio, las precipitaciones pluviales (Precipitaciones Medias Anuales, Figura N° 4) no responden al mismo patrón, ya que los mínimos valores se concentran sobre el margen noroeste y oeste de la cuenca del Bermejo, prácticamente en el límite entre la Cordillera Oriental y la Puna, aunque con un diseño que se acuña rápidamente de norte a sur, en tanto que las máximas precipitaciones muestran una distribución diagonal (NNE - SSO) que sigue por el norte los cursos del Bermejo y Grande de Tarija, y por el sur la parte más austral de la Quebrada de Humahuaca y el eje San Salvador de Jujuy - Salta.

La distribución de los suelos y de la vegetación conjugan los factores de topografía y precipitaciones. Así, como se aprecia en los planos de Tipos de Suelo (Figura N° 8) y de Cobertura Vegetal (Figura N° 6), respectivamente, las áreas altas con bajas precipitaciones muestran el predominio de suelos muy poco desarrollados, esqueléticos (torriortentes típicos y líticos, criortentes líticos y pelárgides típicos) y vegetación puneña y prepuneña asociada a zonas desprovistas de cobertura o bien de carácter altoandino. Estas características se aprecian en las cabeceras y márgenes derecha e izquierda del río Grande de Jujuy, así como en las cabeceras de los tributarios del Bermejo en las

inmediaciones del límite con Bolivia que proceden del oeste, como, por ejemplo, los ríos Pescado e Iruya (compárense Plano General, de Cobertura Vegetal y de Tipos de Suelo, Figuras N° 1, 6 y 8, respectivamente).

En síntesis, se puede afirmar que las áreas de la alta cuenca del río Bermejo con mayor susceptibilidad a la generación de desmoronamientos, deslizamientos y flujos rápidos de remoción en masa van a ser aquéllas en las que se sumen:

a) constitución por rocas estratificadas (sedimentarias) y/o foliadas a esquistosas (metamorfitas de bajo grado); b) estructura geológica que favorezca el desarrollo de importantes desniveles locales, así como conjuntos estratificados con alto buzamiento, en especial coincidente con la pendiente de las laderas; c) presencia de fenómenos de meteorización física (desintegración de masas rocosas) por insolación, variaciones muy amplias en las temperaturas extremas diarias y procesos de congelamiento intermitente; d) cotas máximas absolutas altas que han favorecido los procesos glaciales y/o de nivación en el Pleistoceno (fuente importante de generación de detritos); e) desarrollo de grandes abanicos aluviales de regiones secas o semiáridas (drenaje distributivo a partir de un curso troncal), estrechamente ligados a áreas con importantes desniveles y buen desarrollo de la red imbrífera de cabeceras proveedora del cañón o colector principal; f) clima semiárido, con escasas precipitaciones concentradas a breves periodos del año (lluvias copiosas); g) suelos esqueléticos, poco maduros o azonales, así como pobre cobertura vegetal.

Las regiones de la alta cuenca del río Bermejo en las que confluyen todos o la gran mayoría de los factores citados serían:

1. Las cabeceras del río Pescado.
2. Las cabeceras del río Iruya.

3. Los tributarios del río Grande de Jujuy, sobre todo los ubicados en el ámbito de la Quebrada de Humahuaca a alturas superiores de los 2000 m (Mazzoni, M.; Spalletti, L.; 1972). Sin descartar ninguno de los sistemas tributarios de este curso fluvial, puede hacerse especial mención a los que drenan la Cordillera Oriental, como los ríos Yacoraite, Purmamarca, Tumbaya, Medio (área de Volcán) y León, dadas las particulares características geológicas, topográficas, geomorfológicas, climáticas y fitogeográficas de las regiones en las que se ubican y el tamaño de las cuencas imbríferas involucradas. También pueden generarse flujos gravitacionales en las cuencas imbríferas de los tributarios que proceden de la Cordillera Oriental y se emplazan algo más al sur, aunque en este caso, y tal como ocurre con el río Reyes, tienen importancia los que tienen cuencas de drenaje muy amplias y sus cabeceras se emplazan a gran altura. Sobre la margen izquierda del río Grande, las redes de drenaje no están tan desarrolladas; volúmenes considerables de materiales generados por remoción en masa pueden ser aportados - en este caso - por los tributarios Caleta, Huasamayo y Punta Corral (Mazzoni, M.; Spalletti, L.; 1972).

Las áreas con mayor susceptibilidad para la generación de materiales detríticos a partir de movimientos de remoción en masa rápidos se representan en la Figura N° 27.

Vale destacar que el análisis de la potencialidad para el desarrollo de procesos de desmoronamientos, deslizamientos y, fundamentalmente, flujos de remoción en masa rápidos como productores de importantes volúmenes de detritos a la alta cuenca del Bermejo encuentra amplias coincidencias con los parámetros calculados en el modelo de generación y transporte de sedimentos explicado en el punto a.2.i. Así por ejemplo, el coeficiente ϵ , que refleja los procesos de erosión observados, y el parámetro Z (coeficiente de erosión), muestran la ubicación de los valores máximos (Figuras N° 13 y 15) en las áreas de mayor susceptibilidad para la generación de movimientos en masa. Algo similar ocurre con la tasa calculada de producción de sedimentos (W_c/F_c , Figura N° 16) con cifras más elevadas en las cabeceras de las subcuencas hídricas, con mayores posibilidades de alimentación por deslizamientos y flujos gravitacionales viscosos.

Las consideraciones hasta aquí efectuadas son de orden general, sirven simplemente como una introducción al problema de los aportes de materiales detríticos por fenómenos en masa y como orientación del lector. En caso de encararse investigaciones sistemáticas de mayor detalle, se recomiendan las siguientes acciones:

† Relevamiento geológico (con información estratigráfica, litológica, geológica estructural) y relevamiento geomorfológico a escala 1:25.000 de las regiones de potencial interés en cuanto a la generación de desmoronamientos, deslizamientos y flujos de detritos (principales subcuencas tributarias del sistema río Grande de Jujuy y río Bermejo superior, flanco occidental).

† Comparación de información topográfica y fotogramétrica de distintos tiempos a fin de establecer la dinámica geomorfológica y sedimentológica de las áreas de aporte o alimentación, de las zonas de tránsito y

de los sistemas fluviales tributarios y troncales.

† Estudio neotectónico a fin de determinar la actividad reciente de las principales estructuras geológicas y su influencia en los procesos de remoción en masa y fluviales.

† Fenómenos de endicamiento natural de los principales cursos tributarios y principales por la actividad de aportes de detritos en masa. Recurrencia temporal de dichos fenómenos, duración de los embalses, determinación de los factores que contribuyeron a la ruptura de los diques naturales y sus efectos aguas abajo.

† Análisis sedimentológico de los productos de acumulación por movimientos en masa y por acción netamente fluvial: espesores, arquitectura, caracteres texturales, estructurales y composicionales de los depósitos.

† Estimación de velocidades de sedimentación en diversos puntos de las cuencas hídricas sobre la base del análisis sedimentológico.

iii. Comentarios sobre medidas de manejo estructurales y no estructurales a nivel de subcuencas que puedan contribuir a controlar los fenómenos de producción de sedimentos. Conclusiones del capítulo.

Se ha efectuado el estudio de la producción de sedimentos en la Alta Cuenca del río Bermejo, realizándose en primer término la identificación de las unidades de paisaje, para luego pasar a análisis más detallados y específicos de la producción por erosión superficial y por procesos de desmoronamiento, deslizamiento y flujos rápidos de remoción en masa.

En la Figura N° 5 del Anexo I se presenta el mapa de unidades de paisaje según el grado de estabilidad, que constituye el producto principal de este capítulo. La idea de paisaje conceptualiza entidades de espacio, que sintetizan macroexpresiones de calidad, interacción y dinámica de las unidades territoriales.

Más específico es el cálculo de la producción de sedimentos por erosión superficial, para el que se implementó una metodología mediante la utilización de un sistema de información geográfica.

La obtención de mapas de producción de sedimentos permite la toma de decisiones acerca de la identificación de zonas de mayor producción, y la evaluación de los procesos de estabilización (forestación, obras de control) o recuperación de dichas zonas.

La estructura con la que se ha implementado esta metodología, permite la rápida actualización de los resultados a medida que se cuente con información más completa de los datos básicos que se utilizan en la aplicación del método de cálculo.

A partir de la aplicación efectuada, se ha comprobado el buen funcionamiento del método para los fines perseguidos, a través del contraste de los

resultados obtenidos con los aforos sólidos disponibles en distintas estaciones de dichas cuencas, y se han obtenido interesantes conclusiones acerca de la incidencia de la erosión superficial frente a las otras fuentes de producción de sedimentos.

En la Figura N° 18 se presenta el mapa de producción de sedimentos por erosión superficial para la Alta Cuenca del Río Bermejo, que constituye el producto principal del punto respectivo.

Finalmente se analizaron los procesos de desmoronamiento, deslizamiento y flujos rápidos de remoción en masa, con el alcance previsto de identificar y delimitar, a partir de la cartografía temática disponible complementada con evaluaciones y análisis indirectos, y teniendo en cuenta las limitaciones de la escala del estudio (1:250000), las áreas donde exista riesgo de los fenómenos mencionados.

En la Figura N° 27 se presenta el mapa de áreas con mayor susceptibilidad para la generación de movimientos de remoción en masa rápidos para la Alta Cuenca del Río Bermejo, que constituye el producto principal del capítulo respectivo.

Dentro del estudio realizado resulta digno de destacar que el análisis de la potencialidad para el desarrollo de procesos de remoción en masa en la Alta Cuenca del Bermejo, presenta coincidencias con el correspondiente al modelo de generación por erosión superficial (punto a.2.ii.5.).

En efecto, para la escala de estudio, existen concordancias entre las zonas susceptibles de producir sedimentos por ambas fuentes. La diferencia radicaría fundamentalmente entonces en características de las precipitaciones que generan cada uno de los fenómenos.

La producción de sedimento por erosión superficial ocurre principalmente debido al impacto de las gotas de lluvia en el suelo y al escurrimiento del agua sobre la superficie de la cuenca. Es un fenómeno que depende principalmente del régimen de lluvias, y tiene una distribución temporal más o menos distribuida en el año, siguiendo el ciclo hidrológico de la cuenca.

Desde este punto de vista, los fenómenos de remoción en masa, por sus características, están íntimamente relacionados a los eventos intensos de lluvia, resultando por lo tanto bastante concentrados en el tiempo.

También debe tenerse en cuenta que para evaluar y cuantificar procesos de remoción en masa es necesario contar con cartas topográficas en escala más adecuada (del orden de 1:50000), integrando el estudio con observaciones directas en la cuenca. El tamaño de la cuenca en estudio no permitió tal análisis. En el punto a.2.ii.5. se recomiendan acciones a seguir en caso de encararse investigaciones sistemáticas de mayor detalle en este tema.

Sobre los resultados obtenidos, merecen destacarse los analizados en los puntos a.2.i.5. y a.2.ii.5.. En este sentido, se resaltan los correspondientes a las subcuencas de los ríos Blanco, Iruya y Pescado, en la cuenca del Bermejo Superior, y Grande de Jujuy, en la del San Francisco.

Una conclusión general que se desprende de los estudios efectuados es que no se identifican medidas de manejo en la alta cuenca del Bermejo que afecten sustantivamente el monto de sedimentos generados. Desde este punto de vista, y en las zonas más productoras de sedimento por cualquier fuente, puede decirse que en el estado actual la alta cuenca del Bermejo no está afectada por la acción antrópica. Viendo el mapa de uso de suelos (Figura N° 7) puede confirmarse lo expresado.

En el caso de las medidas de manejo no estructurales, desde el punto de vista de los autores, no se aprecia ninguna que tenga factibilidad y que permita reducir significativamente el volumen de sedimento producido en la cuenca. Tampoco se ha encontrado ninguna en los 194 proyectos presentados en el PEA por las provincias involucradas.

De este modo, sólo quedarían las medidas estructurales como factibles técnicamente de controlar la producción de sedimentos en la cuenca a nivel global, tanto evitando que la erosión se produzca como almacenando los sedimentos producidos. En cambio, desde el punto de vista económico y ambiental, a priori, estas medidas no parecen factibles.

Sí pueden ser viables medidas de control que ataquen y solucionen problemas locales, pero sin significación en el monto total de sedimentos producidos por la cuenca.

En los próximos ítems desarrollados correspondientes al proyecto se analiza el efecto que tienen en este sentido las presas proyectadas en la Alta Cuenca del Bermejo y Grande de Tarija: Las Pavas, Arrazayal y Cambarí.

Por otro lado, también se analiza el efecto producido por una disminución en el aporte de sedimentos gruesos del río Iruya del 25 %, 50 % y 75 % del monto actual. Estas reducciones, en virtud de lo expresado, no están asociadas a ninguna medida de control, queriendo demostrarse a partir de ellas, el efecto en la morfología del sistema que tendrían las mismas.

CAPÍTULO A FIGURAS Y TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1:	Plano general.
Figura N° 2:	Modelo digital del terreno.
Figura N° 3:	Subcuencas.
Figura N° 4:	Precipitaciones medias anuales.
Figura N° 5:	Temperaturas medias anuales.
Figura N° 6:	Cobertura vegetal.
Figura N° 7:	Uso del suelo.
Figura N° 8:	Tipos de suelo.
Figura N° 9:	Geología.
Figura N° 10:	Parámetro «T».
Figura N° 11:	Coeficiente «X».
Figura N° 12:	Coeficiente «Y».
Figura N° 13:	Coeficiente «Z».
Figura N° 14:	Pendientes.
Figura N° 15:	Parámetro «Z».
Figura N° 16:	Tasa de producción de sedimentos (Wc/Fc).
Figura N° 17:	Wc.
Figura N° 18:	Wc x R.
Figura N° 19:	Áreas asociadas a secciones de aforo.
Figura N° 20:	Sólido en suspensión - Derrame. Estación San José (Río Iruya).
Figura N° 21:	Sólido en suspensión - Derrame. Estación Puesto Romero (Río Pescado).
Figura N° 22:	Sólido en suspensión - Derrame. Estación El Angosto (Río Mojotoro).

Figura N° 23:	Sólido en suspensión - Derrame. Estación Bajada de Pinto (Río Lavayén).
Figura N° 24:	Sólido en suspensión - Derrame. Estación San Juancito (Río Grande).
Figura N° 25:	Sólido en suspensión - Derrame. Estación Caimancito (Río San Francisco).
Figura N° 26:	Sólido en suspensión - Derrame. Estaciones Bajada de Pinto y El Angosto.
Figura N° 27:	Áreas con mayor susceptibilidad para la generación de movimientos de remoción en masa rápidos.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1:	Valores del coeficiente «Z», de procesos erosivos observados.
Tabla N° 2:	Valores del coeficiente «X», de uso del suelo.
Tabla N° 3:	Valores del coeficiente «Y», de resistencia del suelo a la erosión.
Tabla N° 4:	Características geométricas de las subcuencas.
Tabla N° 5:	Cotas características de las subcuencas.
Tabla N° 6:	Determinación del parámetro «R».
Tabla N° 7:	Determinación de los sedimentos producidos por erosión superficial.

PLANO GENERAL

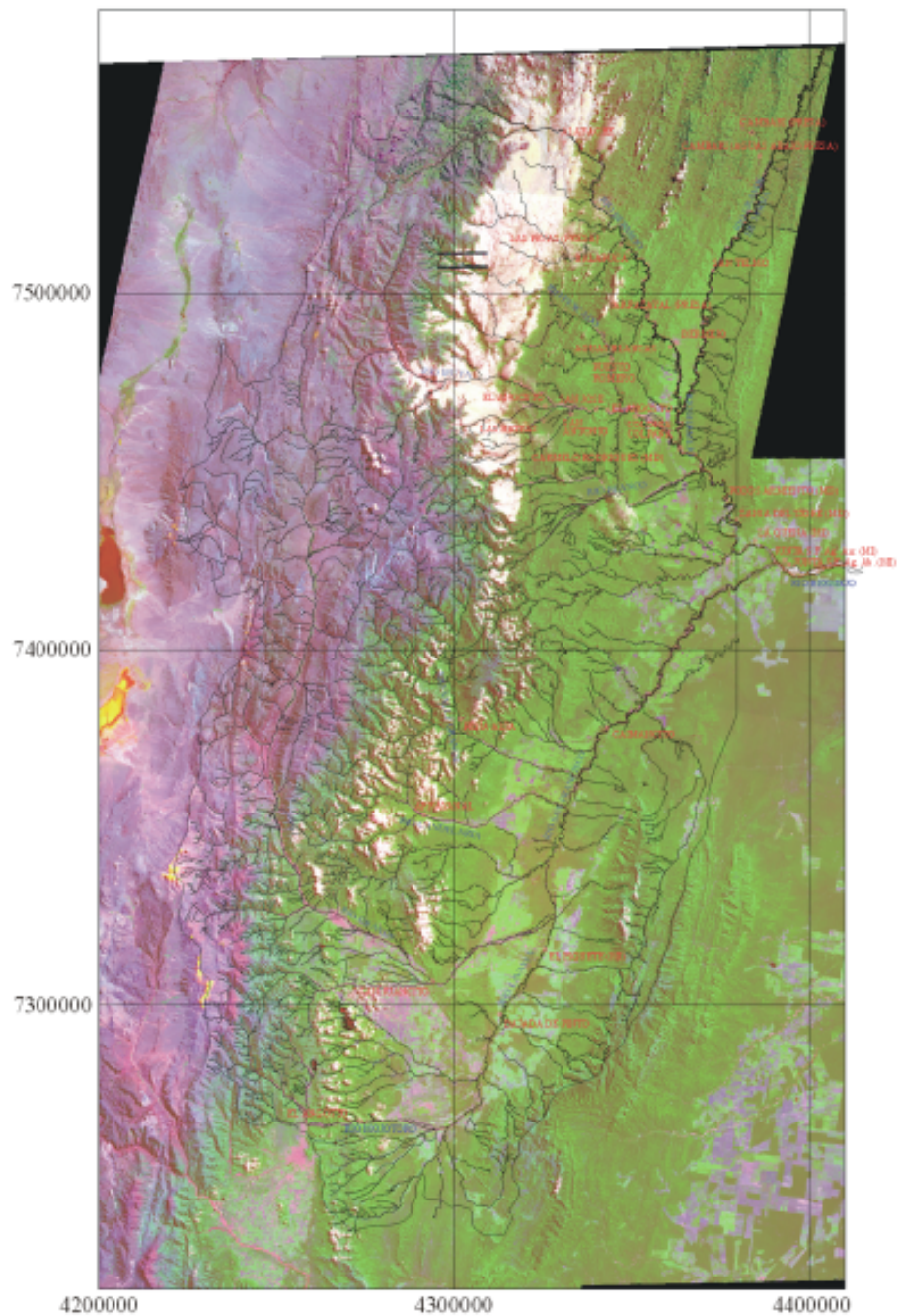


Figura N° 1

MODELO DIGITAL DEL TERRENO

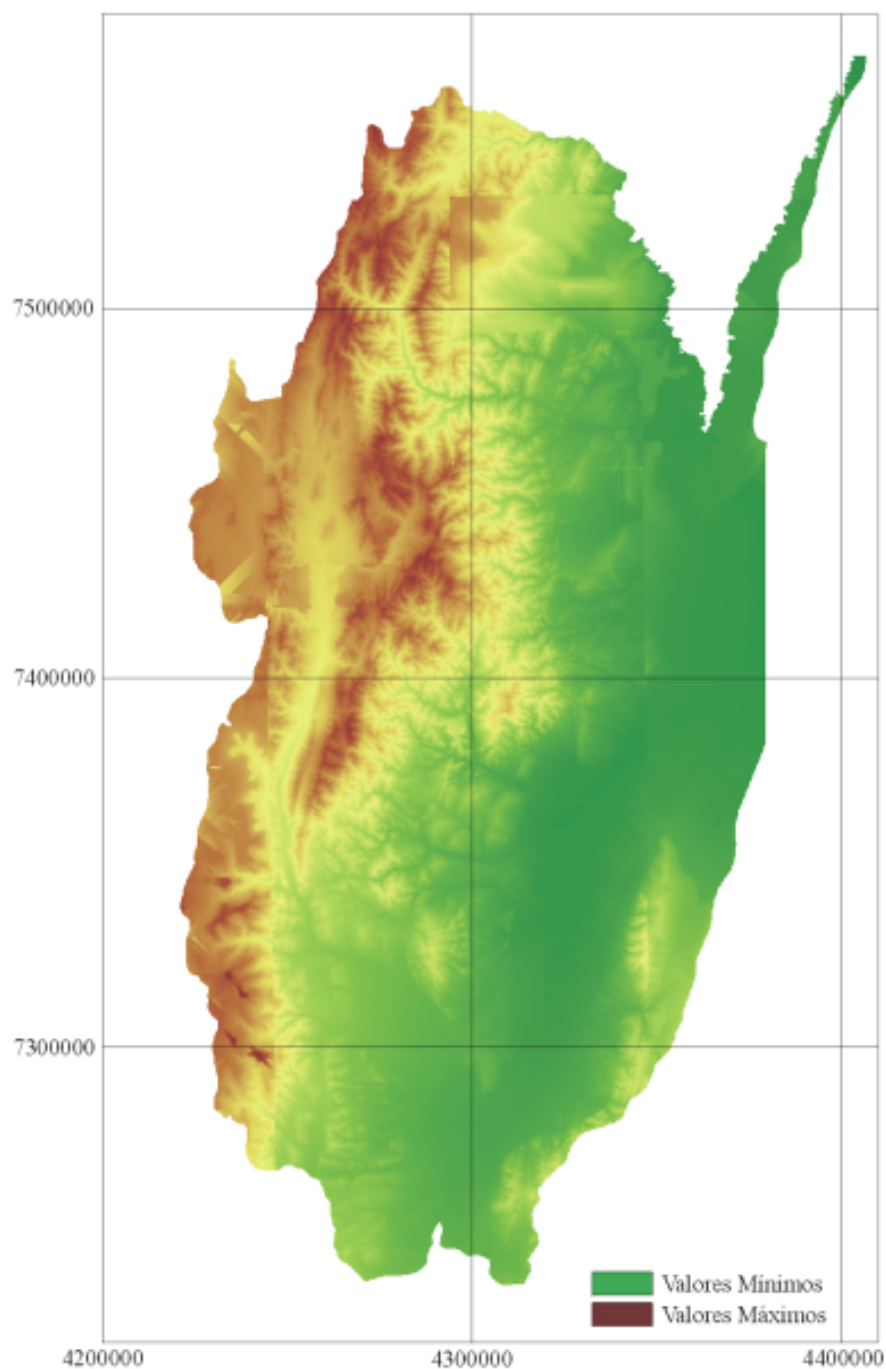


Figura N° 2

SUBCUENCAS

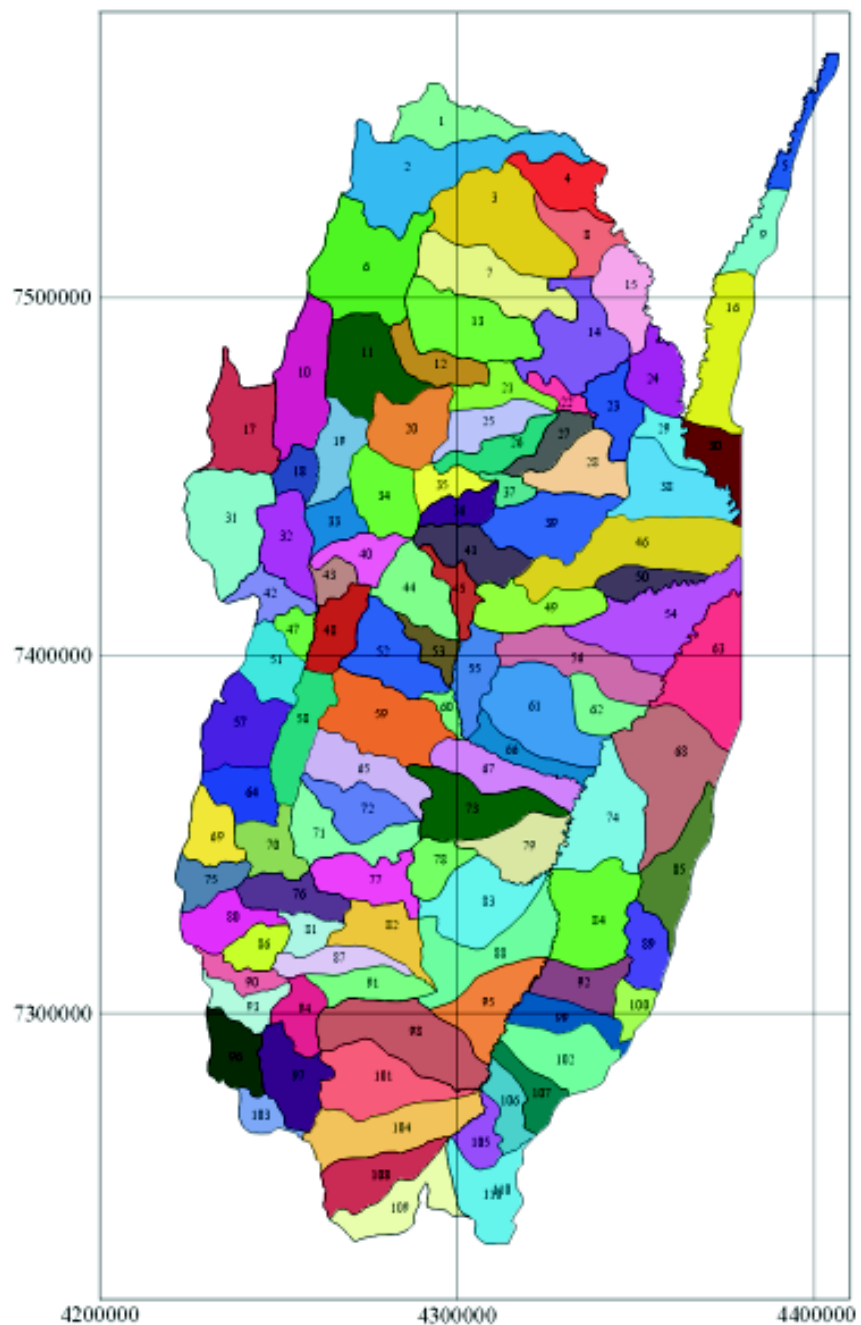


Figura N° 3

PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES

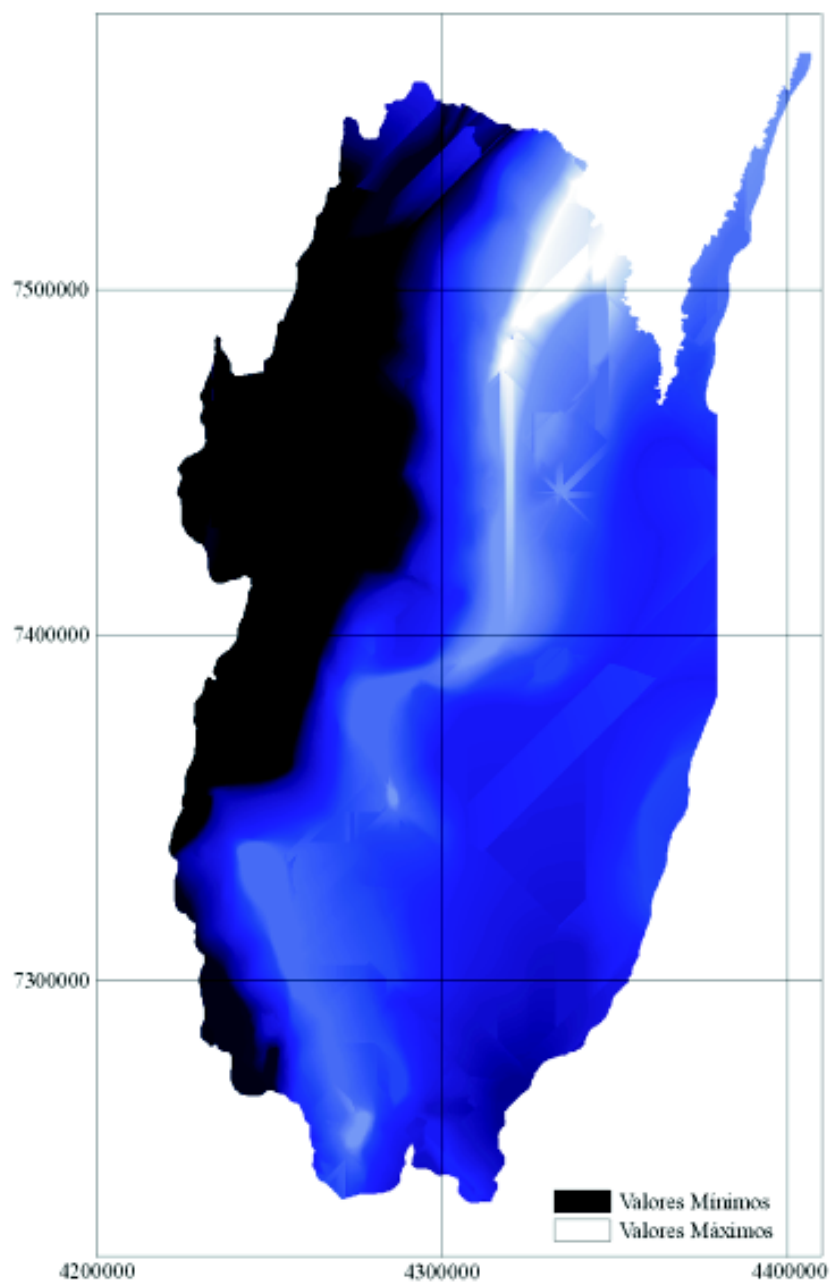


Figura N° 4

TEMPERATURAS MEDIAS ANUALES

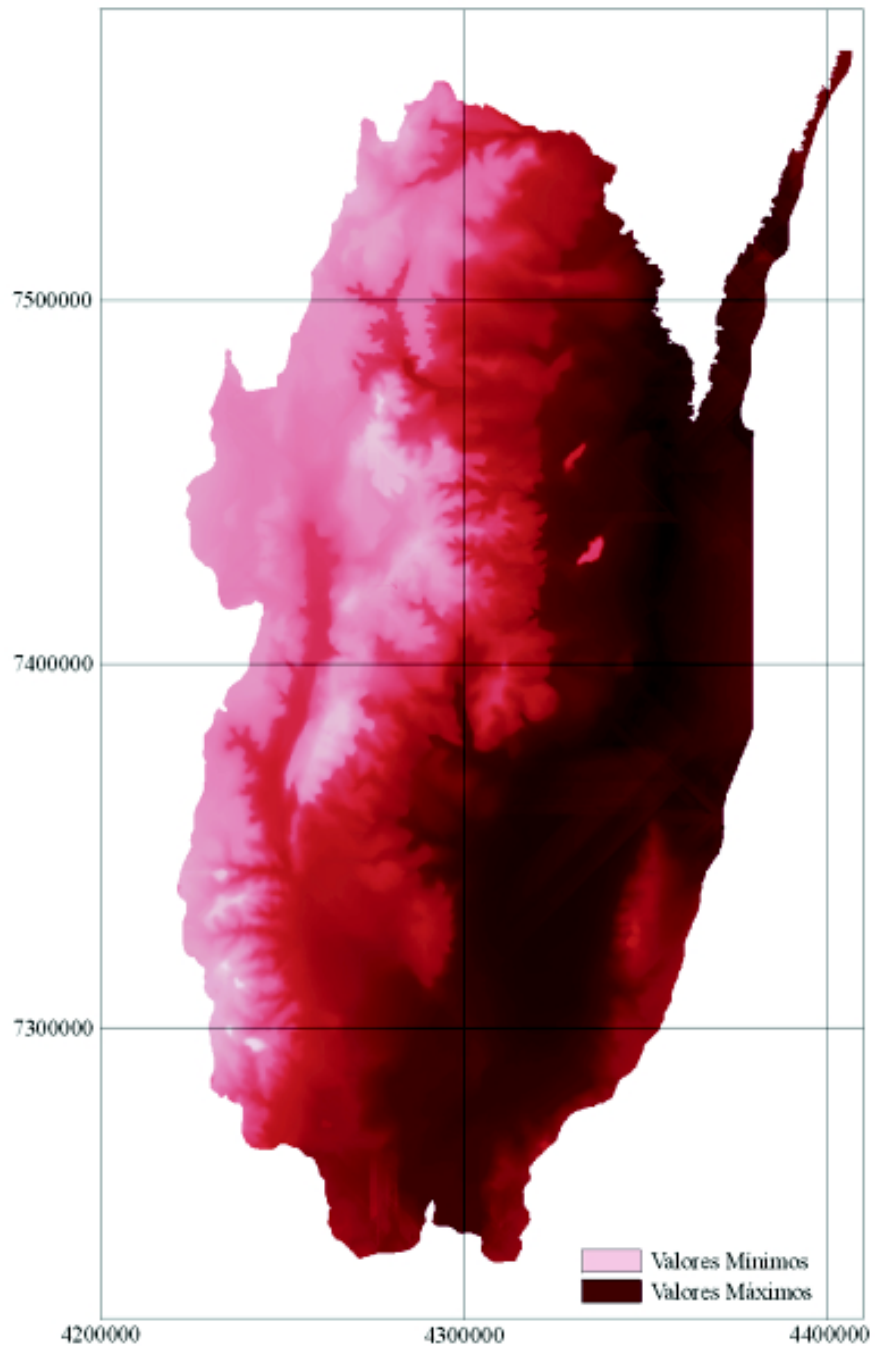


Figura N° 5

COBERTURA VEGETAL

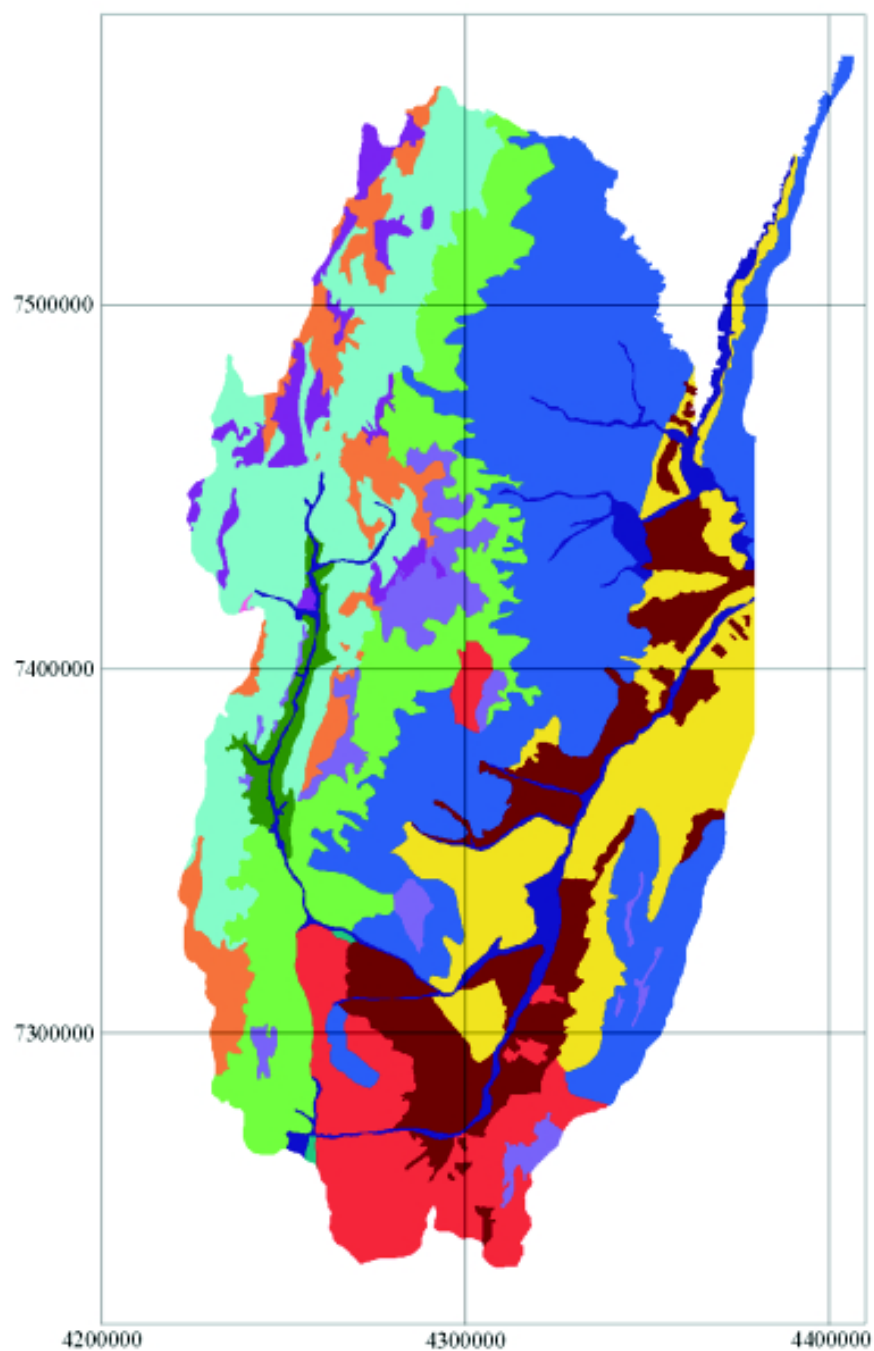


Figura N° 6

Generación y transporte de sedimentos

REFERENCIAS:

	Selva Montana
	Bosque de Transición
	Chaco Serrano
	Bosque Montano
	Pastizal Serrano
	Prepuna
	Puna
	Altoandino
	Ripario
	Cultivos
	Médanos
	Suelo Desnudo
	Ciudades

USO DEL SUELO

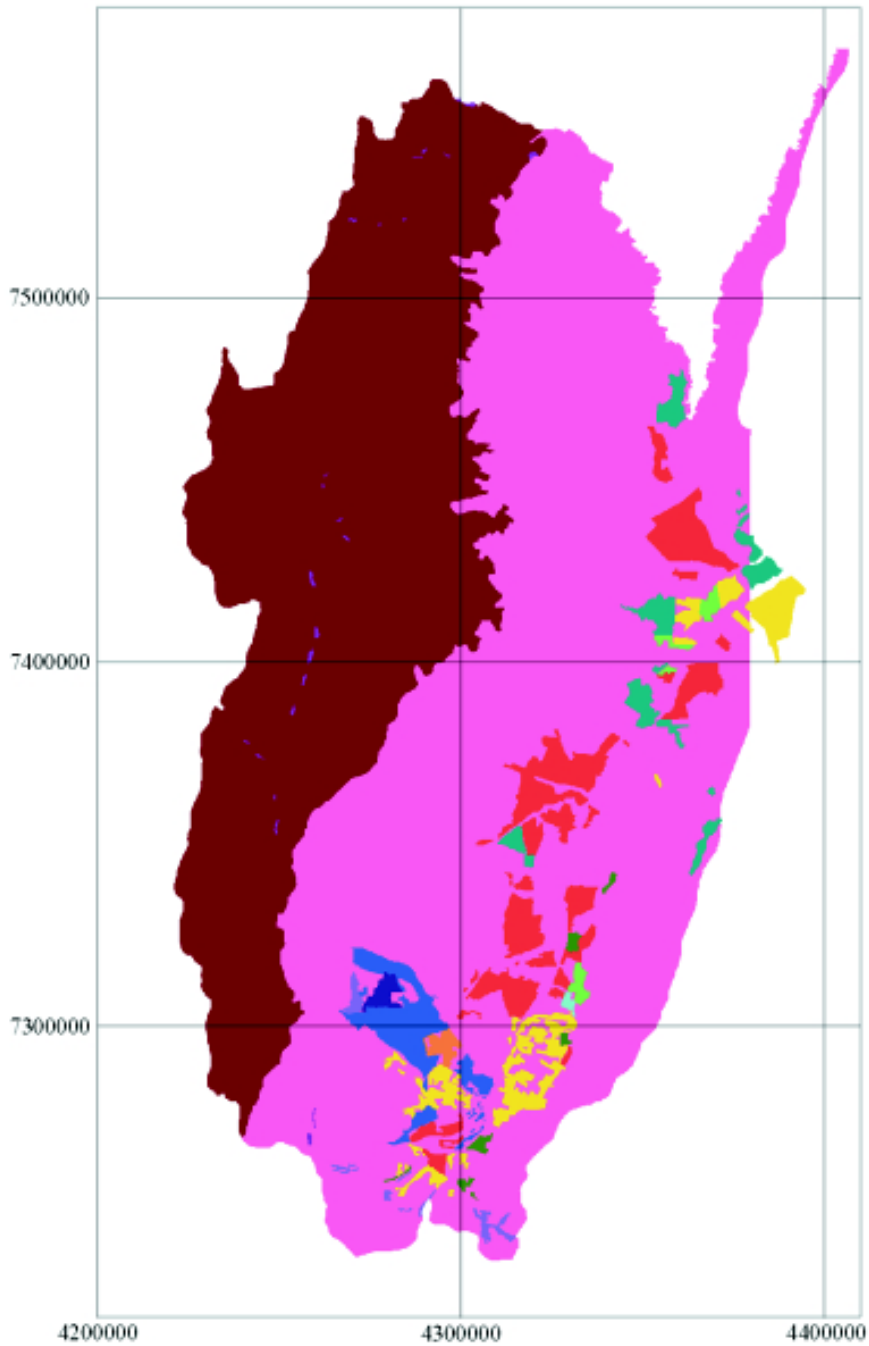


Figura N° 7

Generación y transporte de sedimentos

REFERENCIAS:

	Tabaco
	Poroto
	Caña de azúcar
	Citrus
	Maíz - Sorgo (50 - 50%)
	Pasturas
	Caña - Citrus - Poroto
	Tabaco - Citrus - Viñedos (55 - 25 - 20%)
	Tabaco - Poroto (50 - 50%)
	Ganadería
	Forestal - Ganadería
	Oasis agrícola
	Hortalizas
	Citrus - Hortalizas - Bananos (45 - 40 - 15%)
	Hortalizas - Citrus - Bananos (50 - 40 - 10%)
	Bananos - Hortalizas (60 - 40%)
	Bananos

TIPOS DE SUELO

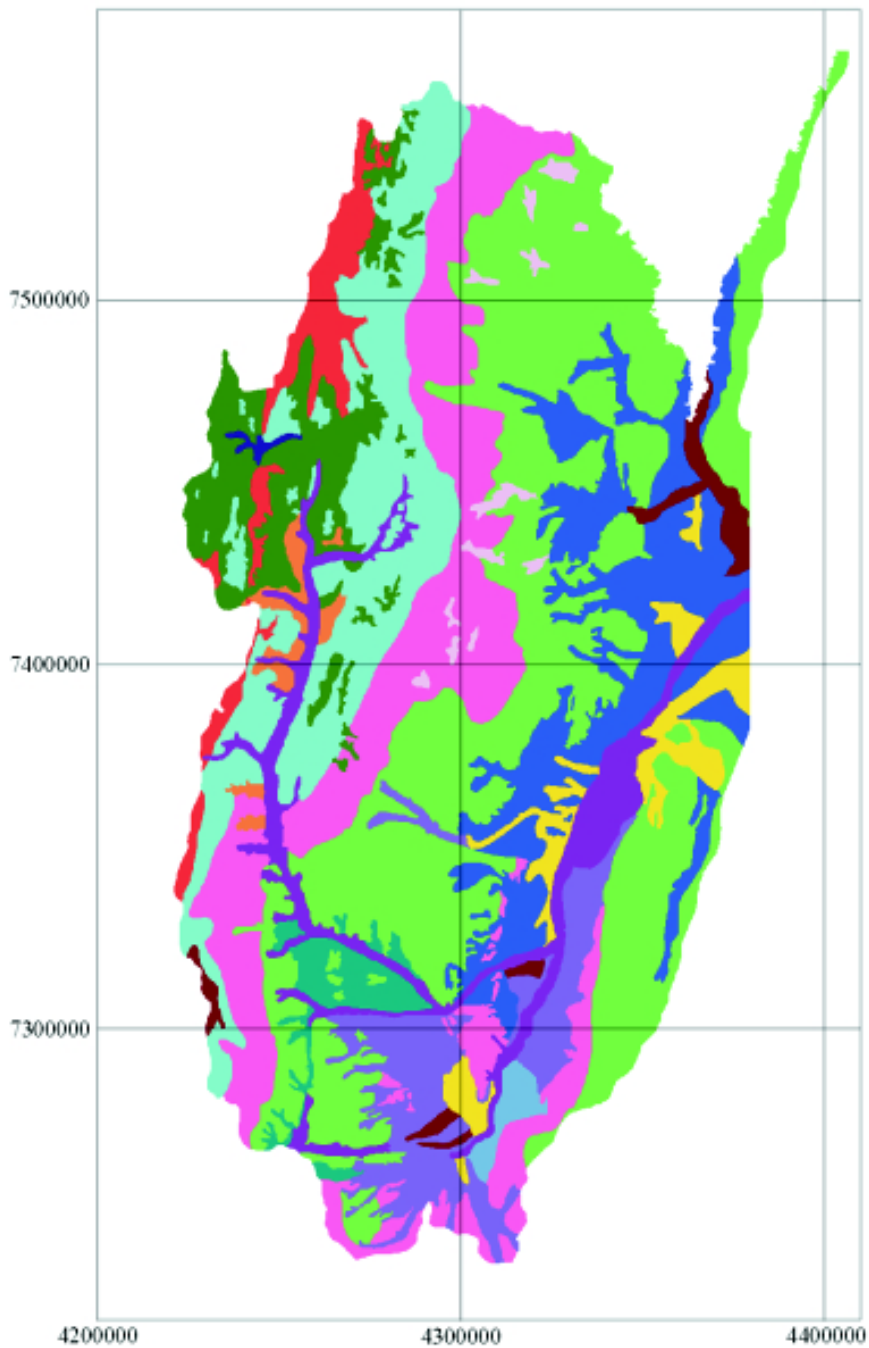


Figura N° 8

Generación y transporte de sedimentos

REFERENCIAS:

	Argiustoles údicos
	Argiustoles ácuicos
	Criortentes líticos
	Haplumbreptes énticos
	Haplustoles típicos
	Paleargides típicos
	Torriortentes líticos
	Torriortentes típicos
	Torrifluventes típicos
	Ustifluventes típicos
	Ustortentes líticos
	Ustortentes típicos
	Paleustalfes vérticos
	Haplustoles énticos
	Paleutoles údicos

GEOLOGÍA

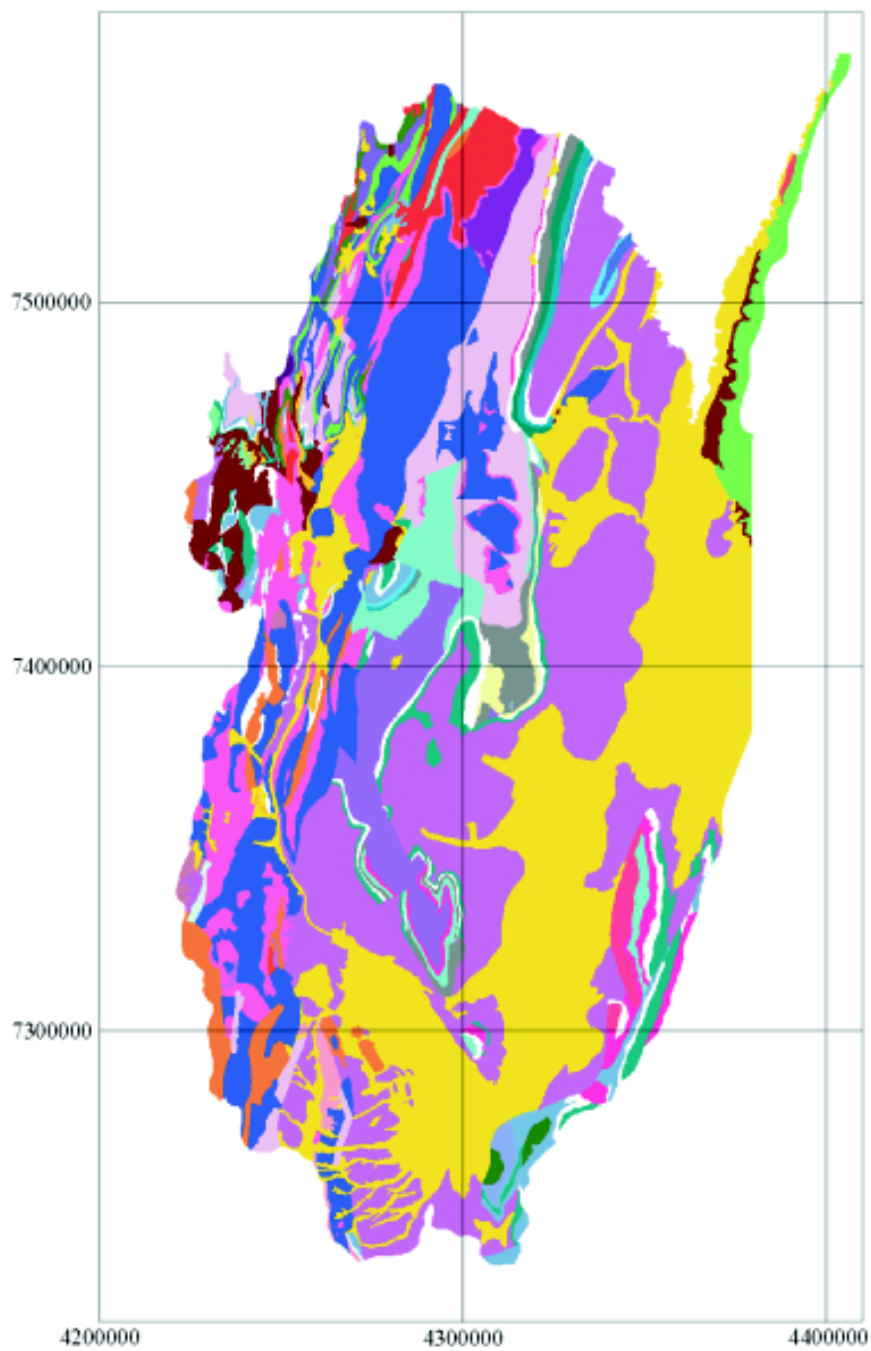


Figura N° 9

Generación y transporte de sedimentos

REFERENCIAS:

	Formación Puncoviscana		Mecoyita
	Depósitos Holocénicos		Subgrupo Balbuena
	Formación Santa Rosita		Formación Pescado
	Formación Lizoite		Formación Los Monos
	Formación Campanario		Grupo Machereti
	Formación Chahualmayoc		Formación Casa Grande
	Formación Lipeón		Formación Río Grande
	Formación Acoyte		Grupo Santa Victoria
	Formación Lizoite		Grupo Santa Victoria
	Depósitos Aluvionales		Formación Campanario
	Grupo Mesón		Subgrupo Pírgua
	Granito Cañaní		Formación Centinela
	Subgrupo Santa Bárbara		Grupo Santa Victoria
	Grupo Santa Victoria		Grupo Mesón
	Grupo Santa Victoria		Grupo Santa Victoria
	Grupo Machereti		Formación Pescado
	Grupo Cuervo		Grupo Santa Victoria
	Grupo Chaco		
	Grupo Orán		
	Grupo Mandiyuti		

PARÁMETRO "T"

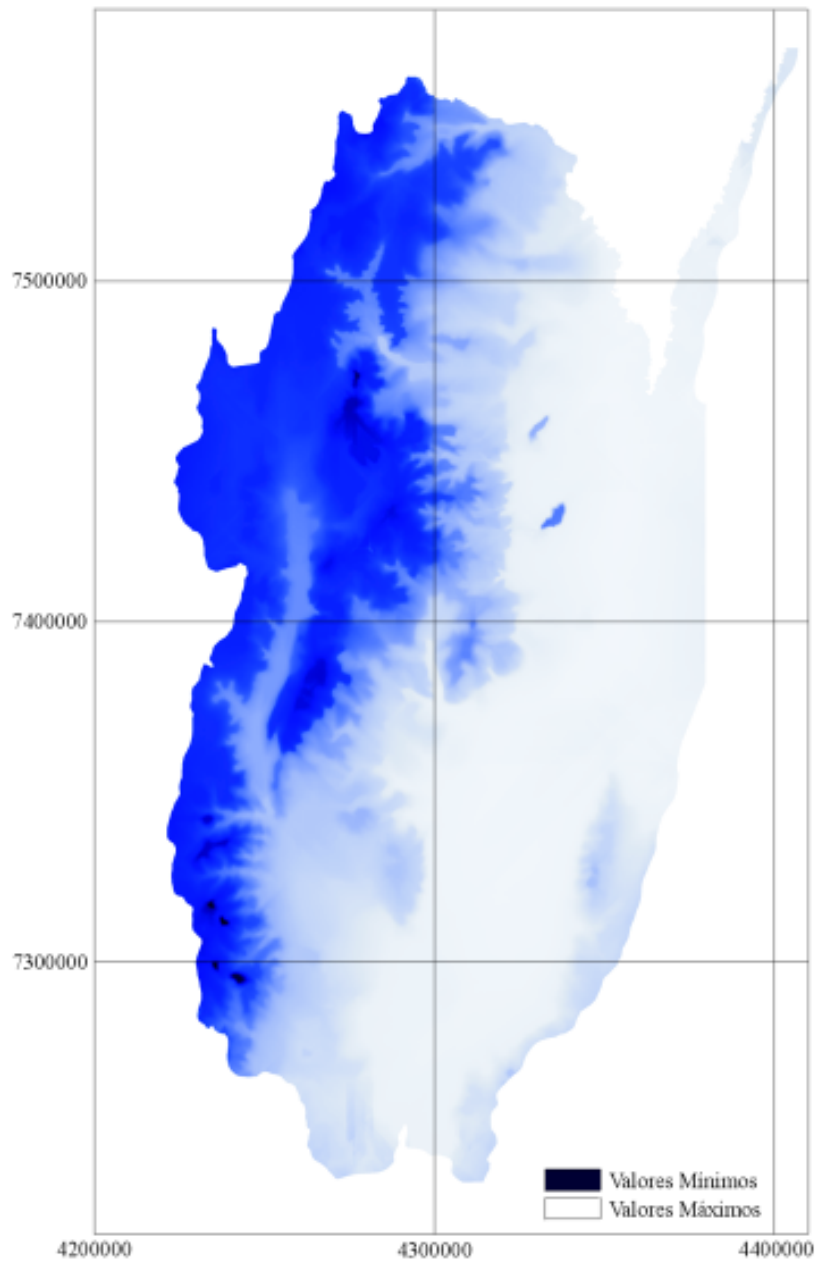


Figura N° 10

COEFICIENTE "X"

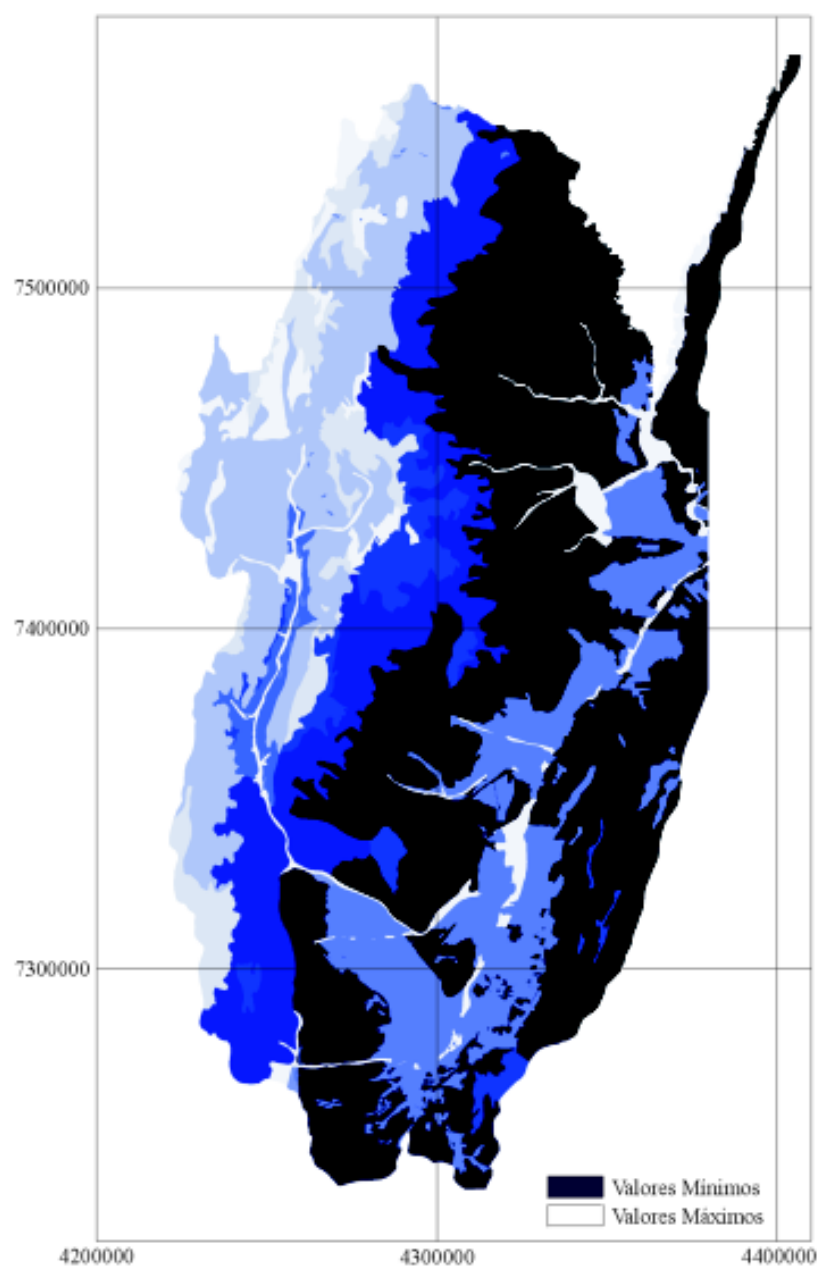


Figura Nº 11

COEFICIENTE "Y"

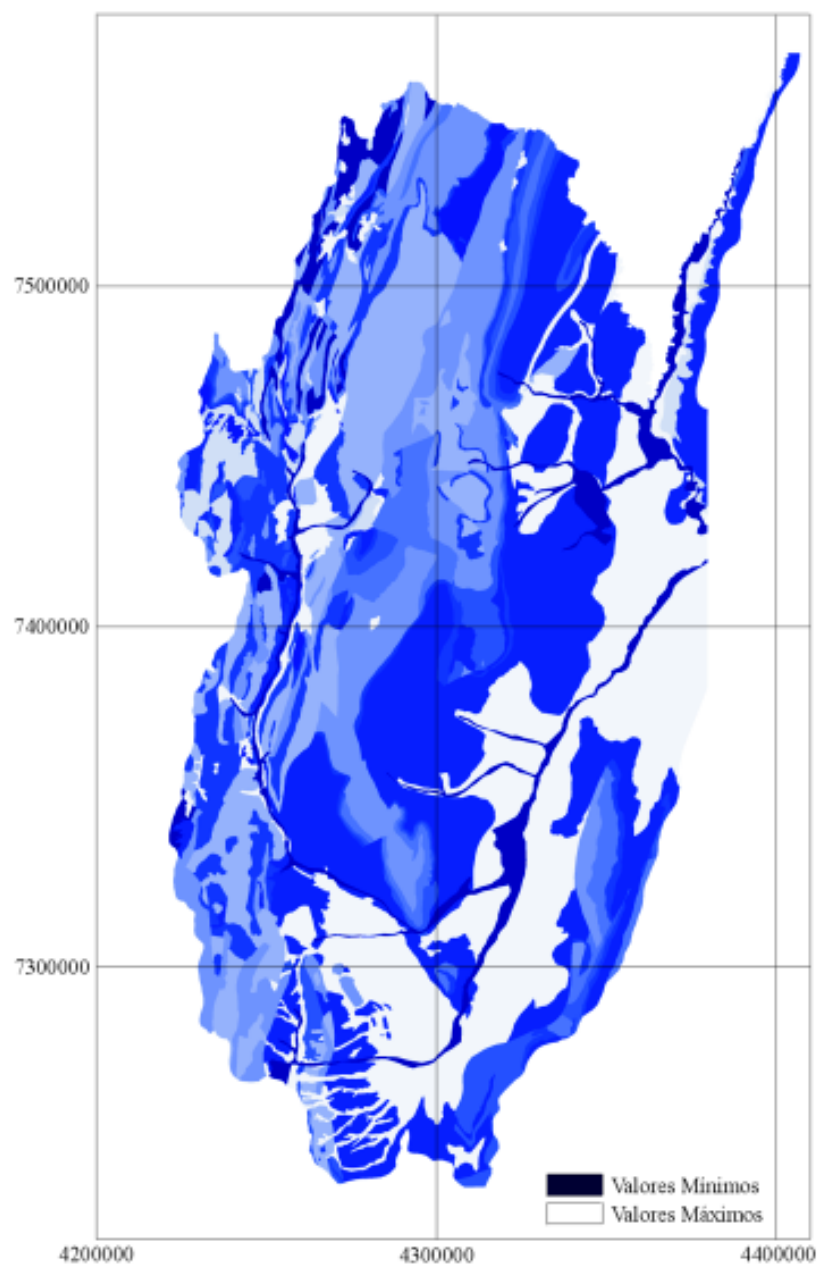


Figura N° 12

COEFICIENTE “ Φ ”

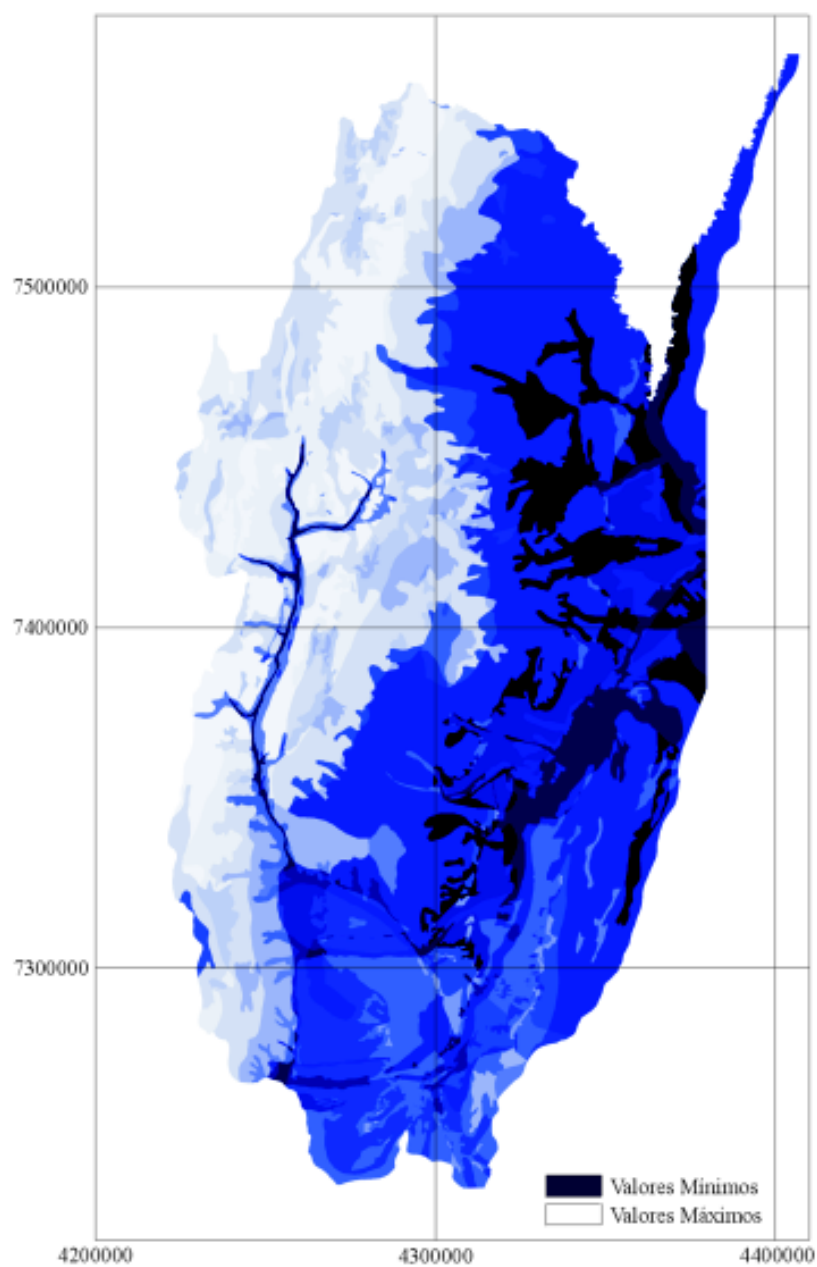


Figura N° 13

PENDIENTES

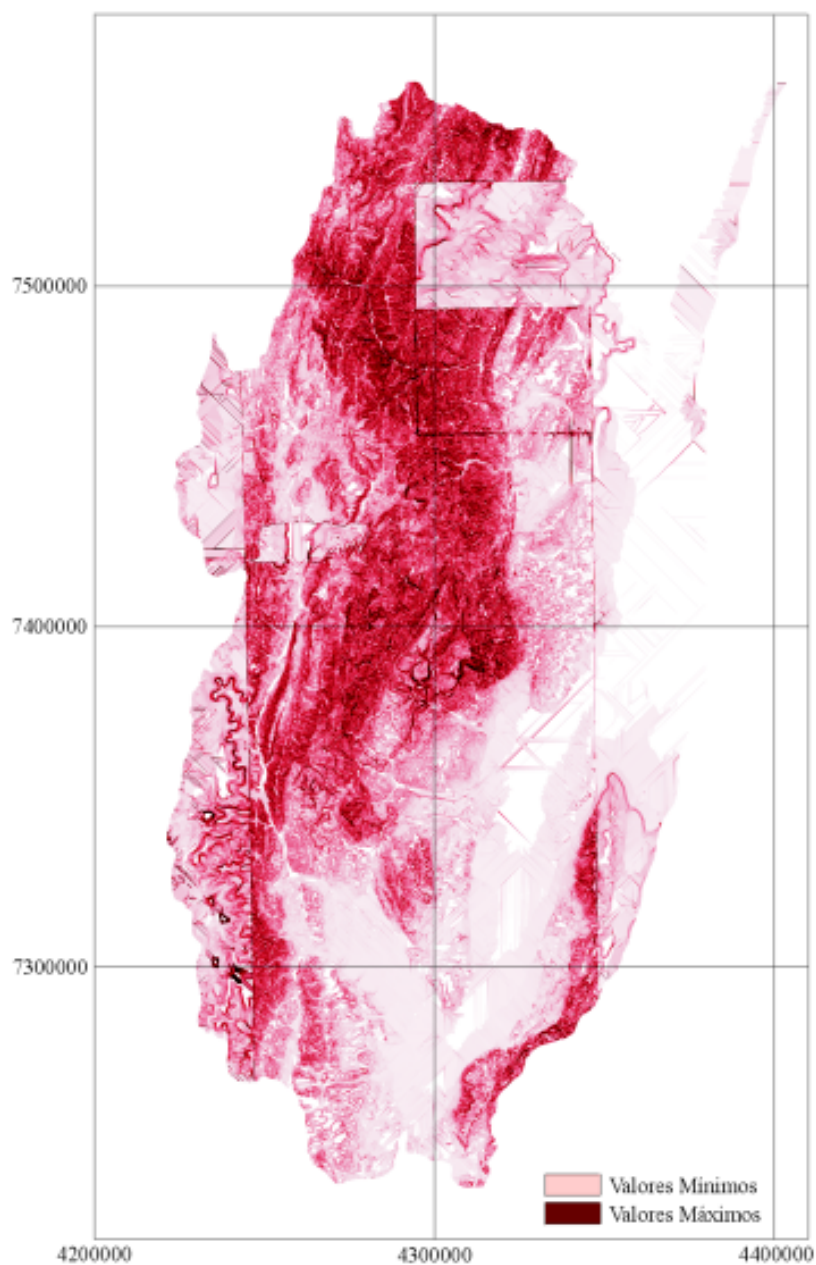


Figura N° 14

PARÁMETRO “Z”

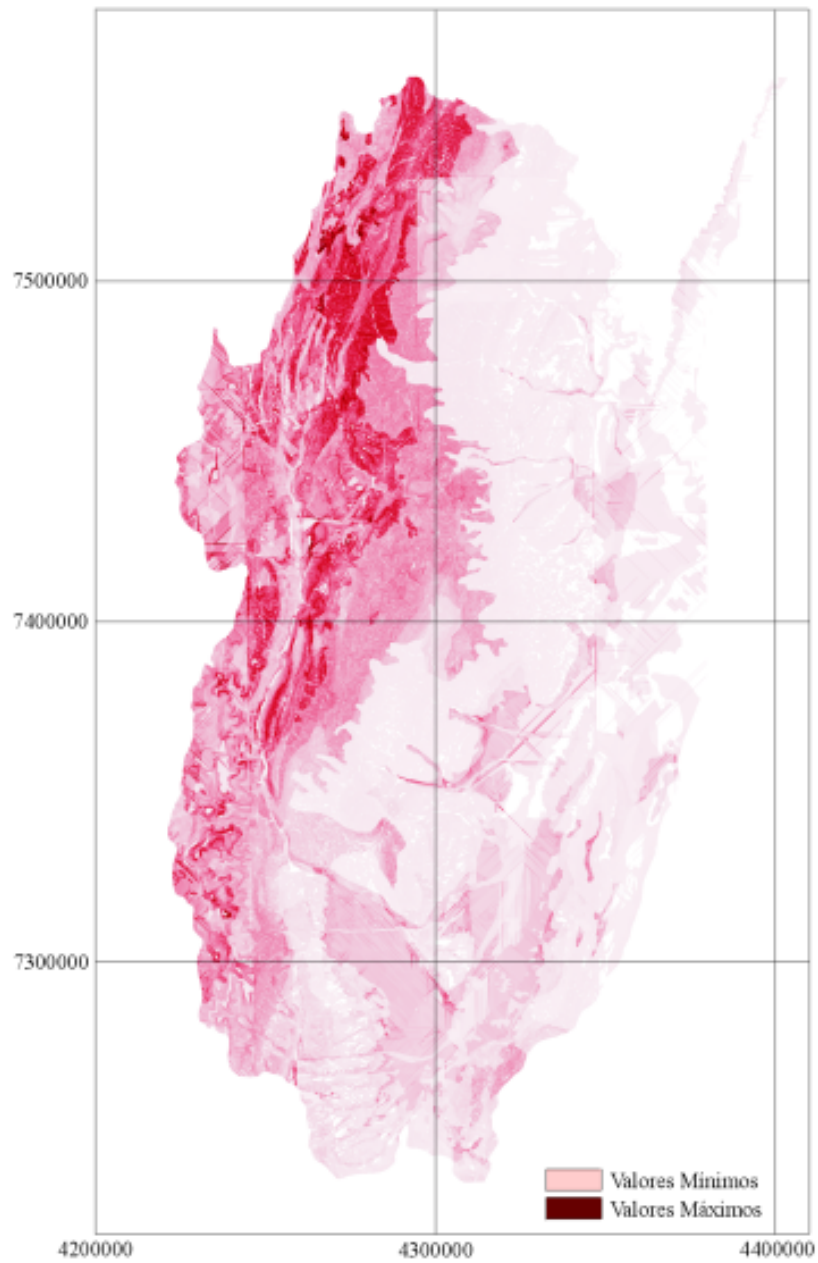


Figura N° 15

TASA DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS (W_c/F_c)

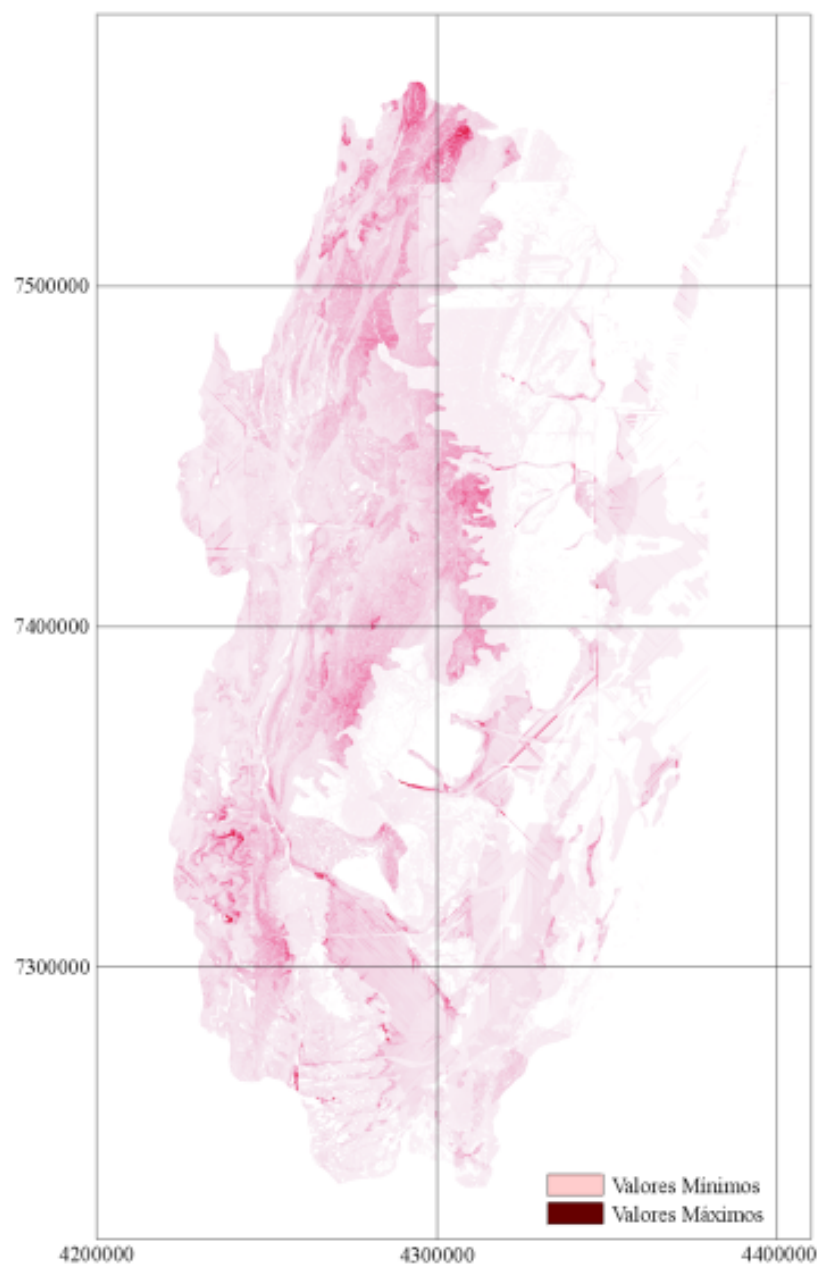


Figura N° 16

Wc

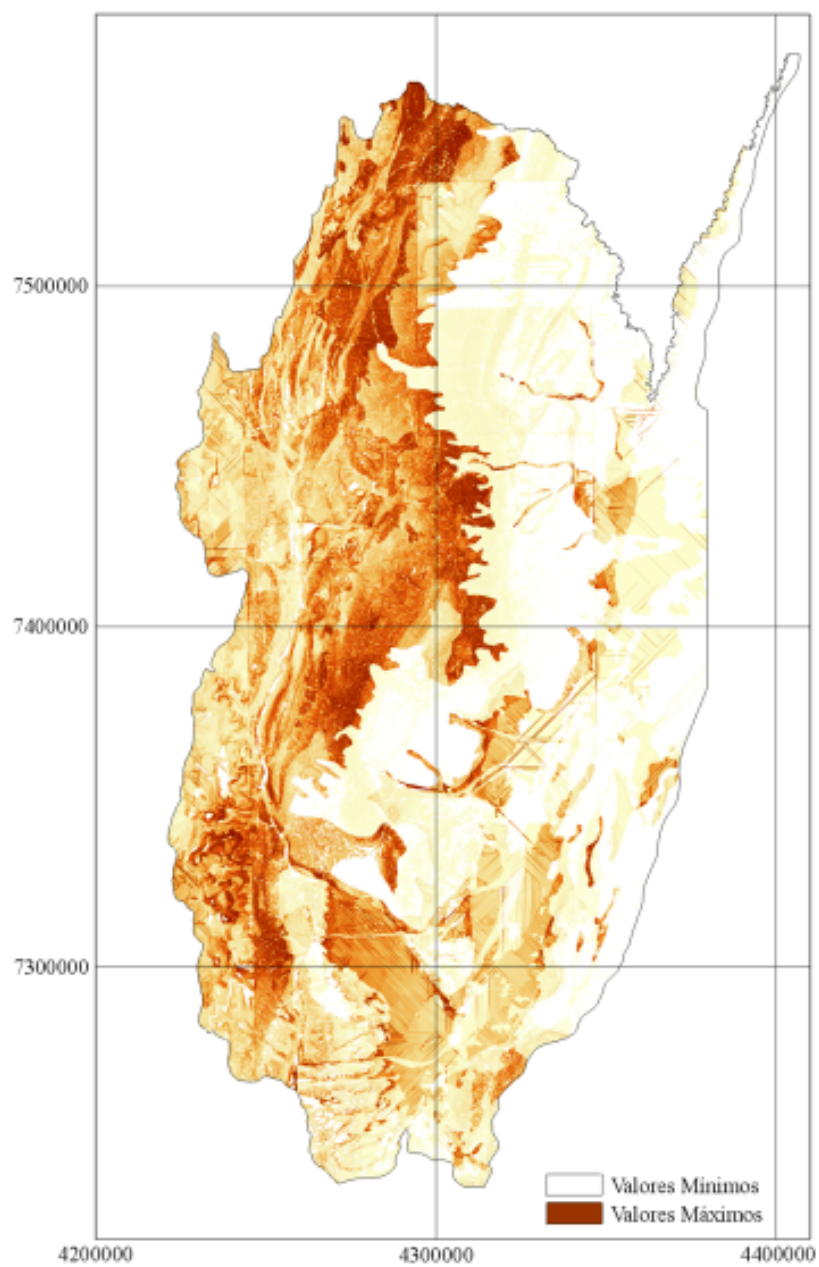


Figura N° 17

Wc x R

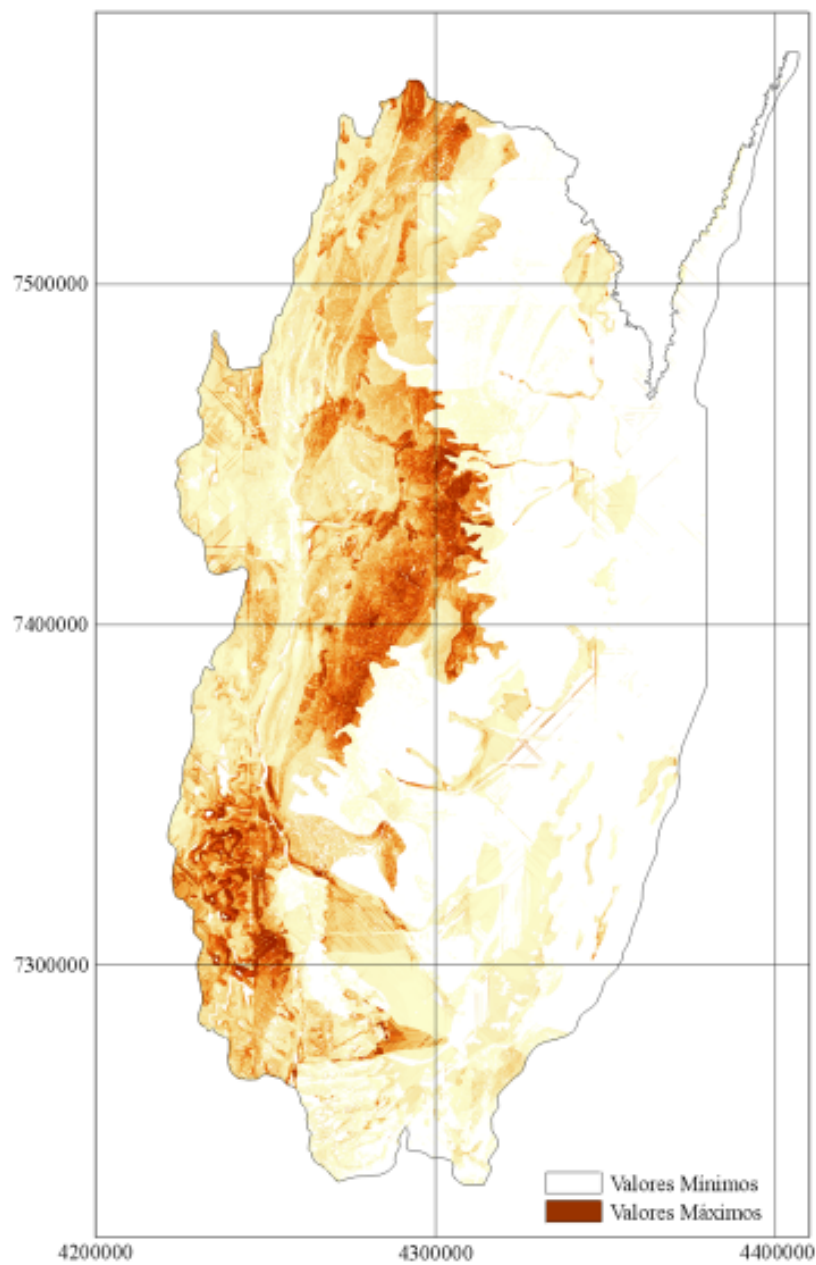


Figura N° 18

Generación y transporte de sedimentos

ÁREAS ASOCIADAS A SECCIONES DE AFORO

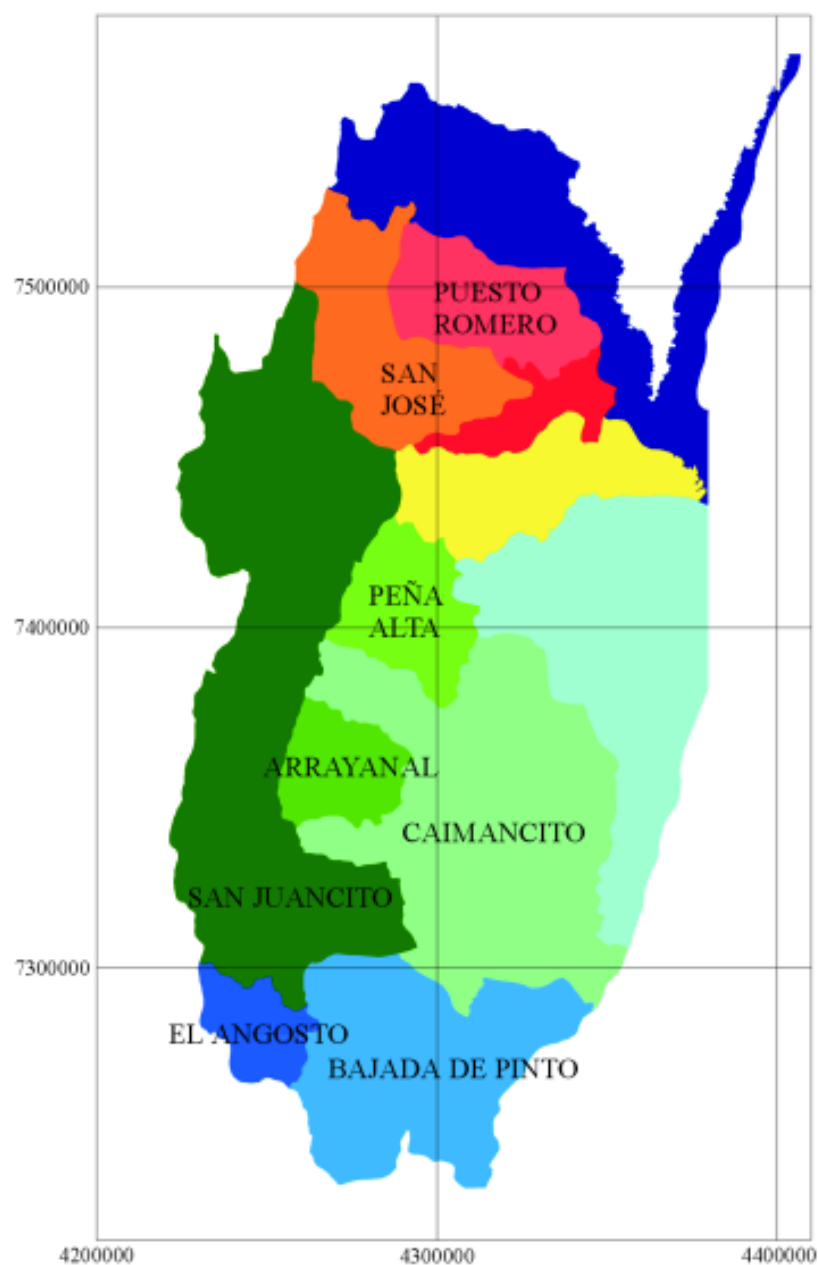


Figura N° 19

Estación San José Río Iruya

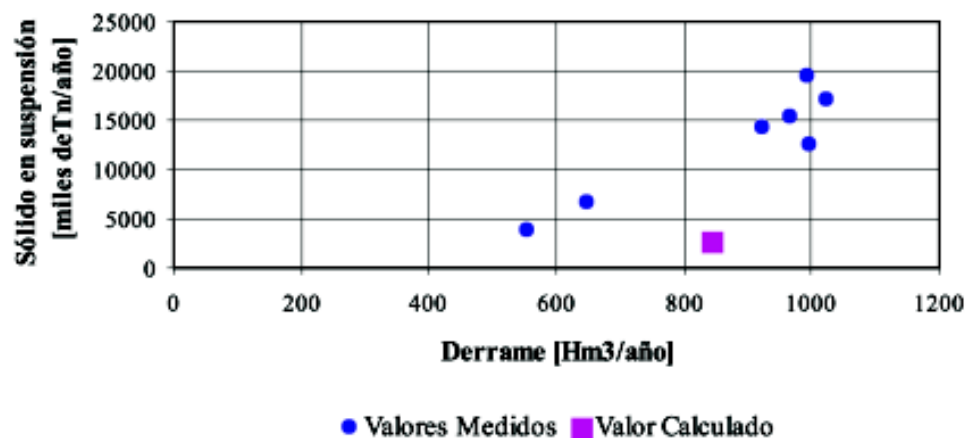


Figura N° 20

Estación Puesto Romero Río Pescado

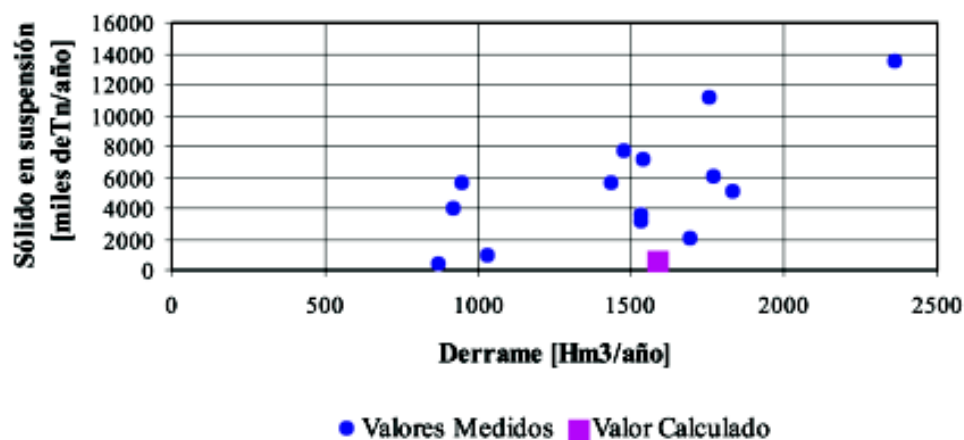


Figura N° 21

Estación El Angosto Río Mojotoro

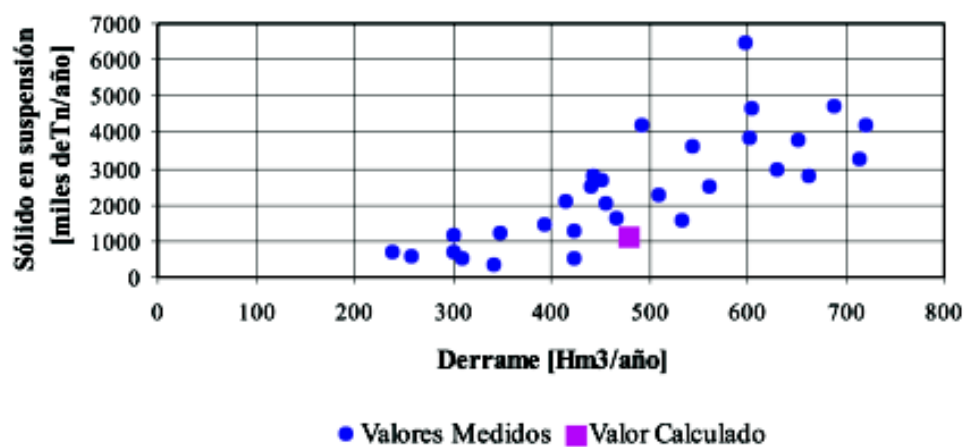


Figura N° 22

Estación Bajada de Pinto Río Lavayén

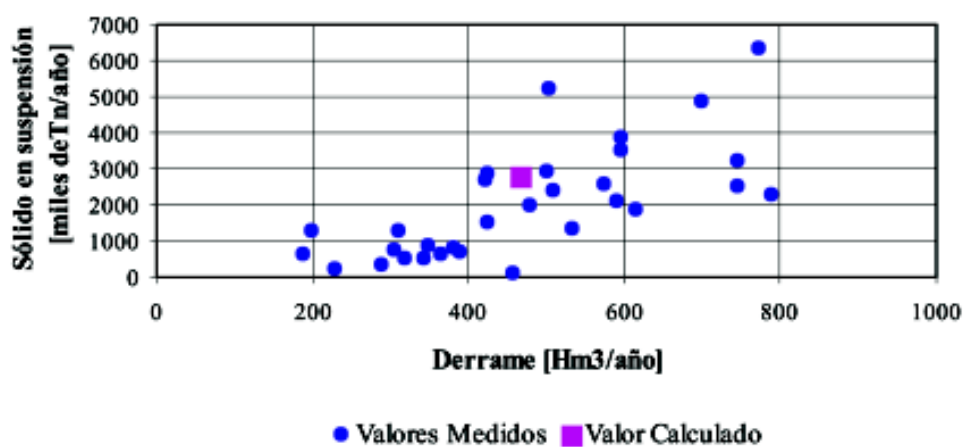


Figura N° 23

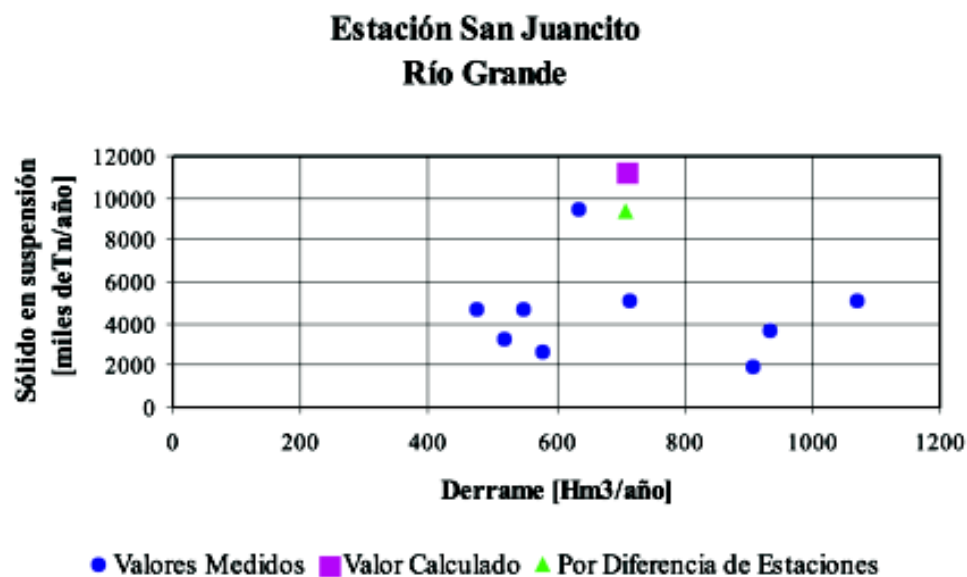


Figura N° 24

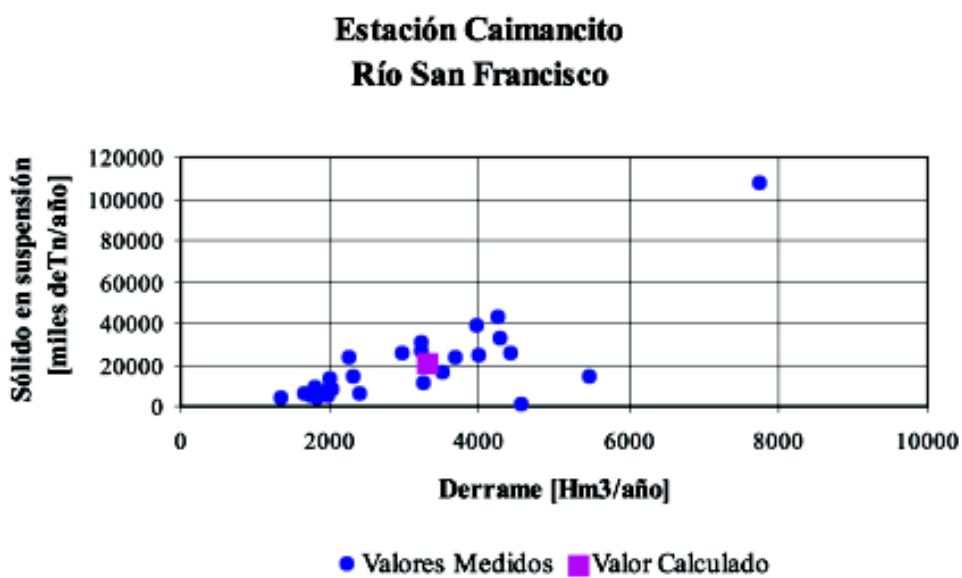


Figura N° 25

Estaciones Bajada de Pinto y El Angosto

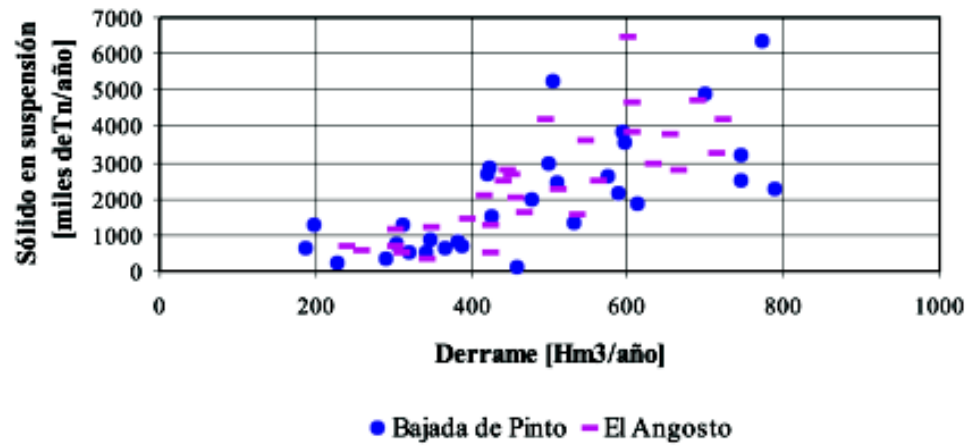


Figura N° 26

ÁREAS CON MAYOR SUSCEPTIBILIDAD PARA
LA GENERACIÓN DE MOVIMIENTOS
DE REMOCIÓN EN MASA RÁPIDOS

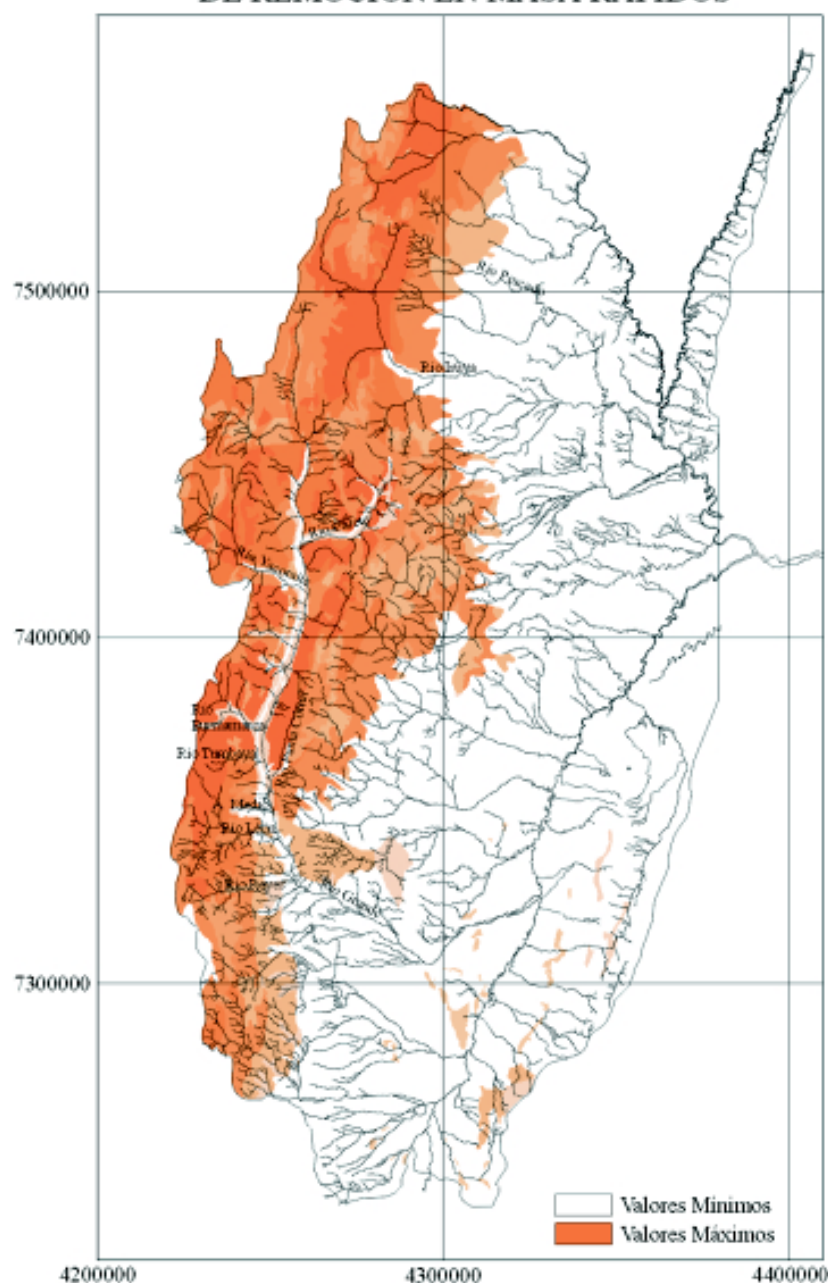


Figura N° 27

Coefficient values for the observed erosion process «p»

Basin or area fully attacked by gulleying and deep process of erosion.	1.0
About 80% of area under rills and gullies.	0.9
About 50% of area under rills and gullies.	0.8
Entire area attacked by surface erosion: detritus and debris, few rills and gullies (deep erosion), and heavy karst erosion.	0.7
Entire area attacked by erosion, but without visible deep effects (rills, gullies, rockfalls, etc.).	0.6
50% of area attacked by surface erosion, while the rest of the basin is unattacked.	0.5
20% of the area attacked by surface erosion, and 80% unattacked.	0.3
Land surface without visible erosion effects; minor rockfalls or slips in stream channel.	0.2
Land surface without visible erosion effects; mostly crop fields.	0.15
Land surface without visible erosion effects; mostly under woods or perennial crops (meadows, pastures, etc.).	0.1

Tabla N° 1

Land use coefficient «X»

Denuded unarable land (badlands).	1.0
Field ploughed up/down the hill.	0.9
Orchards and vineyards without low vegetation.	0.7
Field contour-farmed.	0.63
Degrade forest and shrub on eroded soil.	0.6
Dry mountain pastures.	0.6
Meadows and similar perennial crops.	0.4
Grass-grown and drained pastures.	0.3
Good forest on steep slopes.	0.2
Good forest on gentle slopes.	0.05

Tabla N° 2

Coefficient of soil resistance to erosion «Y»

Sand, gravel and loose soil.	2.0
Loess, tuff, saline soil, steppe soil and the like.	1.6
Weathered limestone and marl.	1.2
Serpentine, red sandstone, flysch deposits.	1.1
Podzol, parapodzol, desintegrated schist: micaschist, gneiss, argillaceous schist, etc.	1.0
Compact and schistose limestones; tera rossa and humose-silicate soil.	0.9
Brown forest soil and mountain soils.	0.8
Smonitsa, valley and back bog soils.	0.6
Chernozem and alluvial deposits of good texture.	0.5
Bare compact igneous rocks.	0.25

Tabla N° 3

Subcuenca	Area	Perímetro	Longitud del cauce	Longitud de afluentes	Subcuenca	Area	Perímetro	Longitud del cauce	Longitud de afluentes
	[m2]	[m]	[m]	[m]		[m2]	[m]	[m]	[m]
1	347341550	108191	22825	15063	56	465366818	124959	66215	48218
2	869925763	198576	51602	33930	57	451820960	96491	22296	45866
3	753924008	124128	58604	86049	58	349672480	98770	25225	5496
4	294175335	94505	36301	13434	59	597355317	116791	43256	104841
5	143187467	123793	84595	39769	60	70864921	49606	5183	0
6	758742204	139313	43721	41530	61	619932438	111351	49733	91293
7	551032298	124731	58351	72769	62	216634005	68324	21831	25328
8	252844006	91945	24340	15638	63	631458244	131893	47189	0
9	199022274	82590	30731	53422	64	260114453	72958	19299	27237
10	525411620	114318	44115	49076	65	371142761	104655	37504	53136
11	236067362	81914	26368	0	66	191533166	100052	5379	0
12	236067362	81960	12411	0	67	351045750	114651	10380	16834
13	587559064	108639	44759	46029	68	777305622	134599	30937	51393
14	541579814	143386	21906	78648	69	243881645	70283	18203	44080
15	33218436	93191	22207	86566	70	249866032	83470	11719	38718
16	490062758	130245	49777	113702	71	360834343	120137	50845	56931
17	472010964	113963	25507	89743	72	308849675	88622	37281	43089
18	140736033	54967	13573	8417	73	497492603	122342	51906	41681
19	274587591	85069	26010	72694	74	583820742	146004	27126	54200
20	393655844	84473	30246	67141	75	193955672	66825	17094	33640
21	216570649	87153	25946	0	76	273750914	85438	32103	66589
22	87876724	59195	17883	3956	77	339558997	99252	41655	71873
23	259529823	83359	21933	37054	78	203642966	62044	17256	37725
24	285138708	25490	45907	52160	79	347701891	116608	18710	0
25	264168861	90096	37130	27015	80	276212010	81980	26134	60733
26	224188837	90504	43641	33941	81	137392682	57116	15459	8086
27	183436839	87444	28698	18514	82	324700259	98429	22003	63857
28	331268296	89282	33966	79045	83	505836519	117410	38790	38669
29	146824014	70928	14599	2560	84	598198088	111810	25383	14233
30	184688675	63781	16255	37420	85	375233630	113942	27697	25496
31	627751365	110975	43096	81388	86	173353800	55334	13195	23296
32	342607849	90885	17309	10898	87	214041144	88871	36897	14171
33	342607849	90885	18662	54978	88	542834533	155594	44053	34698
34	368097171	79104	29694	32885	89	236447948	70460	15633	27218
35	162730052	67189	28394	30981	90	137320533	70056	16481	15766
36	165242472	62178	23327	23602	91	250443502	84715	26823	37765
37	88583460	48612	12754	3949	92	271544737	90846	27135	0
38	489589676	121683	32285	40007	93	191200079	78769	24370	43668
39	497920615	104295	46670	62901	94	215750739	68587	14727	48440
40	208176876	77140	18660	35027	95	392800187	119807	15172	4518
41	321684706	91371	36719	93791	96	271039677	75530	25757	65294
42	178352868	81924	20347	27294	97	369661065	92195	15098	72106
43	114820025	51569	15780	4889	98	682744958	133990	38960	15635
44	366838358	87779	33310	93808	99	243170830	103170	33272	5580
45	152041559	78079	32490	15532	100	128825312	51101	20407	17727
46	787850255	164812	74253	90585	101	524575452	1207994	38064	73249
47	108413201	47339	9580	14621	102	412637034	92635	26276	53864
48	265984769	75006	27403	23553	103	125384828	59946	19781	35543
49	382130073	102835	53858	54156	104	547024657	131414	28364	31177
50	177103475	81315	17042	2917	105	168261467	65518	15415	16071
51	273982280	70513	17134	44217	106	196628286	78226	24156	17350
52	424340413	99511	32921	86291	107	196557536	76427	33446	22977
53	133772073	68737	20256	22001	108	362244720	97758	38937	64559
54	672891589	163141	33544	6686	109	359215553	130034	51441	60587
55	264729372	89792	18039	30505	110	386527664	104223	55350	30704

Tabla N° 4

Subcuenca	Cota Mínima [m]	Cota Máxima [m]	Cota Media [m]	D [km]	Subcuenca	Cota Mínima [m]	Cota Máxima [m]	Cota Media [m]	D [km]
1	1300	4700	3108	1.808	56	398	3300	990	0.591
2	925	5000	3270	2.345	57	2200	4200	3414	1.214
3	976	4400	2588	1.611	58	2100	4867	3349	1.249
4	799	3350	1629	0.830	59	800	5000	2478	1.678
5	310	663	511	0.200	60	750	2367	1556	0.806
6	2200	5000	3963	1.763	61	376	3500	1104	0.728
7	737	4600	2310	1.574	62	376	1300	527	0.151
8	650	1915	1248	0.598	63	385	461	418	0.033
9	455	750	528	0.073	64	2100	4000	3255	1.155
10	3400	4900	3957	0.557	65	900	4800	2349	1.449
11	1400	4900	3412	2.012	66	385	2600	719	0.333
12	1200	4200	2482	1.282	67	389	1900	795	0.406
13	900	4600	2314	1.414	68	375	1800	571	0.196
14	500	2000	959	0.459	69	2656	4600	3873	1.217
15	439	1891	840	0.401	70	1552	4000	2571	1.020
16	415	750	525	0.110	71	900	4000	1887	0.987
17	2933	4200	3780	0.847	72	900	4018	1829	0.929
18	3090	4200	3513	0.423	73	395	1700	873	0.478
19	3100	4875	3776	0.676	74	376	1800	582	0.206
20	1400	4900	3409	2.009	75	3000	5000	4056	1.056
21	720	3250	1593	0.873	76	1248	4187	2092	0.844
22	600	1300	890	0.290	77	900	2500	1537	0.637
23	441	1000	634	0.193	78	608	1800	1020	0.412
24	420	727	503	0.083	79	400	878	485	0.085
25	730	4567	2114	1.384	80	1517	5000	3688	2.172
26	712	4500	1865	1.153	81	1231	2300	1522	0.291
27	600	2267	1004	0.404	82	893	2250	1284	0.391
28	498	1700	786	0.288	83	400	2250	768	0.368
29	415	750	459	0.044	84	400	2600	865	0.465
30	377	750	471	0.094	85	490	1800	1029	0.540
31	2890	4400	3922	1.032	86	1500	5000	3084	1.584
32	2717	4400	3485	0.768	87	914	3100	1432	0.517
33	2883	4533	3452	0.569	88	400	2300	753	0.353
34	3400	5000	4146	0.746	89	999	2520	1529	0.530
35	1450	4675	3283	1.833	90	1700	4467	3640	1.940
36	1464	4700	3021	1.557	91	846	1628	1131	0.285
37	941	3100	1680	0.739	92	468	2033	797	0.330
38	391	875	499	0.108	93	1687	5000	3637	1.951
39	491	3600	1143	0.652	94	1321	3500	1848	0.527
40	2871	5000	3807	0.936	95	463	1000	665	0.202
41	1100	5100	2774	1.674	96	2126	4373	3412	1.286
42	2700	4500	3637	0.937	97	1200	3989	1836	0.636
43	2736	4700	3554	0.818	98	600	2000	932	0.332
44	1588	5100	3643	2.055	99	493	2300	874	0.381
45	1580	4700	3164	1.584	100	900	2233	1541	0.641
46	383	1925	605	0.222	101	600	1900	1029	0.429
47	2600	4333	3199	0.599	102	526	2200	941	0.415
48	2519	4700	3675	1.156	103	1195	3500	2268	1.074
49	500	3200	1379	0.879	104	600	1900	988	0.388
50	415	740	497	0.082	105	600	1900	929	0.329
51	2400	4400	3476	1.076	106	593	2200	938	0.346
52	1100	4700	2902	1.802	107	577	2200	970	0.393
53	1100	4400	2497	1.397	108	691	1867	1171	0.479
54	383	1000	497	0.114	109	696	1900	1017	0.321
55	800	3600	2099	1.299	110	700	2200	1112	0.412

Tabla N° 5

Subcuenca	O [km]	D [km]	Lc [km]	Li [km]	F [km ²]	R
1	108.191	1.808	22.825	15.063	347.342	0.0465
2	198.576	2.345	51.602	33.930	869.926	0.0344
3	124.128	1.611	58.604	86.049	753.924	0.0396
4	94.505	0.830	36.301	13.434	294.175	0.0323
5	123.793	0.200	84.595	39.769	143.187	0.0457
6	139.313	1.763	43.721	41.530	758.742	0.0328
7	124.731	1.574	58.351	72.769	551.032	0.0488
8	91.945	0.598	24.340	15.638	252.844	0.0342
9	82.590	0.073	30.731	53.422	199.022	0.0255
10	114.318	0.557	44.115	49.076	525.412	0.0262
11	81.914	2.012	26.368	0.000	236.067	0.0394
12	81.960	1.282	12.411	0.000	236.067	0.0240
13	108.639	1.414	44.759	46.029	587.559	0.0350
14	143.386	0.459	21.906	78.648	541.580	0.0472
15	93.191	0.401	22.207	86.566	33.218	0.6219
16	130.245	0.110	49.777	113.702	490.063	0.0211
17	113.963	0.847	25.507	89.743	472.011	0.0676
18	54.967	0.423	13.573	8.417	140.736	0.0320
19	85.069	0.676	26.010	72.694	274.588	0.0757
20	84.473	2.009	30.246	67.141	393.656	0.0801
21	87.153	0.873	25.946	0.000	216.571	0.0291
22	59.195	0.290	17.883	3.956	87.877	0.0369
23	83.359	0.193	21.933	37.054	259.530	0.0285
24	25.490	0.083	45.907	52.160	285.139	0.0090
25	90.096	1.384	37.130	27.015	264.169	0.0575
26	90.504	1.153	43.641	33.941	224.189	0.0659
27	87.444	0.404	28.698	18.514	183.437	0.0395
28	89.282	0.288	33.966	79.045	331.268	0.0393
29	70.928	0.044	14.599	2.560	146.824	0.0084
30	63.781	0.094	16.255	37.420	184.689	0.0271
31	110.975	1.032	43.096	81.388	627.751	0.0400
32	90.885	0.768	17.309	10.898	342.608	0.0252
33	90.885	0.569	18.662	54.978	342.608	0.0539
34	79.104	0.746	29.694	32.885	368.097	0.0329
35	67.189	1.833	28.394	30.981	162.730	0.1055
36	62.178	1.557	23.327	23.602	165.242	0.0838
37	48.612	0.739	12.754	3.949	88.583	0.0497
38	121.683	0.108	32.285	40.007	489.590	0.0126
39	104.295	0.652	46.670	62.901	497.921	0.0320
40	77.140	0.936	18.660	35.027	208.177	0.0765
41	91.371	1.674	36.719	93.791	321.685	0.1074
42	81.924	0.937	20.347	27.294	178.353	0.0771
43	51.569	0.818	15.780	4.889	114.820	0.0454
44	87.779	2.055	33.310	93.808	366.838	0.1075
45	78.079	1.584	32.490	15.532	152.042	0.0827
46	164.812	0.222	74.253	90.585	787.850	0.0150
47	47.339	0.599	9.580	14.621	108.413	0.0607
48	75.006	1.156	27.403	23.553	265.985	0.0477
49	102.835	0.879	53.858	54.156	382.130	0.0421
50	81.315	0.082	17.042	2.917	177.103	0.0108
51	70.513	1.076	17.134	44.217	273.982	0.0719
52	99.511	1.802	32.921	86.291	424.340	0.0877
53	68.737	1.397	20.256	22.001	133.772	0.1023
54	163.141	0.114	33.544	6.686	672.892	0.0059
55	89.792	1.299	18.039	30.505	264.729	0.0706

Generación y transporte de sedimentos

Tabla N° 6

Subcuenca	O [km]	D [km]	Lc [km]	Li [km]	F [km ²]	R
56	124.959	0.591	66.215	48.218	465.367	0.0277
57	96.491	1.214	22.296	45.866	451.821	0.0506
58	98.770	1.249	25.225	5.496	349.672	0.0277
59	116.791	1.678	43.256	104.841	597.355	0.0652
60	49.606	0.806	5.183	0.000	70.865	0.0305
61	111.351	0.728	49.733	91.293	619.932	0.0343
62	68.324	0.151	21.831	25.328	216.634	0.0220
63	131.893	0.033	47.189	0.000	631.458	0.0027
64	72.958	1.155	19.299	27.237	260.114	0.0560
65	104.655	1.449	37.504	53.136	371.143	0.0633
66	100.052	0.333	5.379	0.000	191.533	0.0105
67	114.651	0.406	10.380	16.834	351.046	0.0260
68	134.599	0.196	30.937	51.393	777.306	0.0133
69	70.283	1.217	18.203	44.080	243.882	0.0837
70	83.470	1.020	11.719	38.718	249.866	0.0857
71	120.137	0.987	50.845	56.931	360.834	0.0535
72	88.622	0.929	37.281	43.089	308.850	0.0499
73	122.342	0.478	51.906	41.681	497.493	0.0232
74	146.004	0.206	27.126	54.200	583.821	0.0206
75	66.825	1.056	17.094	33.640	193.956	0.0811
76	85.438	0.844	32.103	66.589	273.751	0.0727
77	99.252	0.637	41.655	71.873	339.559	0.0514
78	62.044	0.412	17.256	37.725	203.643	0.0501
79	116.608	0.085	18.710	0.000	347.702	0.0059
80	81.980	2.172	26.134	60.733	276.212	0.1161
81	57.116	0.291	15.459	8.086	137.393	0.0274
82	98.429	0.391	22.003	63.857	324.700	0.0513
83	117.410	0.368	38.790	38.669	505.837	0.0206
84	111.810	0.465	25.383	14.233	598.198	0.0135
85	113.942	0.540	27.697	25.496	375.234	0.0295
86	55.334	1.584	13.195	23.296	173.354	0.0850
87	88.871	0.517	36.897	14.171	214.041	0.0345
88	155.594	0.353	44.053	34.698	542.835	0.0199
89	70.460	0.530	15.633	27.218	236.448	0.0432
90	70.056	1.940	16.481	15.766	137.321	0.1034
91	84.715	0.285	26.823	37.765	250.444	0.0344
92	90.846	0.330	27.135	0.000	271.545	0.0147
93	78.769	1.951	24.370	43.668	191.200	0.1283
94	68.587	0.527	14.727	48.440	215.751	0.0712
95	119.807	0.202	15.172	4.518	392.800	0.0098
96	75.530	1.286	25.757	65.294	271.040	0.0926
97	92.195	0.636	15.098	72.106	369.661	0.0720
98	133.990	0.332	38.960	15.635	682.745	0.0109
99	103.170	0.381	33.272	5.580	243.171	0.0232
100	51.101	0.641	20.407	17.727	128.825	0.0557
101	1207.994	0.429	38.064	73.249	524.575	0.1005
102	92.635	0.415	26.276	53.864	412.637	0.0332
103	59.946	1.074	19.781	35.543	125.385	0.1189
104	131.414	0.388	28.364	31.177	547.025	0.0203
105	65.518	0.329	15.415	16.071	168.261	0.0342
106	78.226	0.346	24.156	17.350	196.628	0.0321
107	76.427	0.393	33.446	22.977	196.558	0.0362
108	97.758	0.479	38.937	64.559	362.245	0.0400
109	130.034	0.321	51.441	60.587	359.216	0.0328
110	104.223	0.412	55.350	30.704	386.528	0.0223

Tabla N° 6

Subcuenca	R	W [m3/año]	G [m3/año]	Subcuenca	R	W [m3/año]	G [m3/año]
1	0.0465	7311720	339776	56	0.0277	1321387	36651
2	0.0344	12711460	437766	57	0.0506	2234751	112995
3	0.0396	3181751	125851	58	0.0277	3151463	87316
4	0.0323	469656	15185	59	0.0652	6976301	454627
5	0.0457	52494	2400	60	0.0305	104024	3169
6	0.0328	10603400	347569	61	0.0343	2466013	84586
7	0.0488	2585811	126119	62	0.0220	510963	11234
8	0.0342	85675	2926	63	0.0027	240472	652
9	0.0255	168161	4287	64	0.0560	1498916	84009
10	0.0262	3966213	103727	65	0.0633	3395654	215008
11	0.0394	7411033	292183	66	0.0105	946557	9982
12	0.0240	2994664	72007	67	0.0260	1350518	35060
13	0.0350	3080520	107734	68	0.0133	1014060	13475
14	0.0472	424623	20054	69	0.0837	1947086	163067
15	0.6219	121146	75337	70	0.0857	3322850	284906
16	0.0211	251239	5308	71	0.0535	1175937	62867
17	0.0676	3226801	218013	72	0.0499	1093848	54633
18	0.0320	760135	24293	73	0.0232	2347904	54533
19	0.0757	2703808	204624	74	0.0206	628966	12947
20	0.0801	3820348	305932	75	0.0811	2438810	197770
21	0.0291	347422	10099	76	0.0727	4045834	294168
22	0.0369	104491	3860	77	0.0514	2464530	126797
23	0.0285	385057	10983	78	0.0501	579606	29021
24	0.0090	166396	1490	79	0.0059	786278	4640
25	0.0575	1036425	59620	80	0.1161	3612748	419552
26	0.0659	1363792	89886	81	0.0274	380058	10427
27	0.0395	224834	8890	82	0.0513	2024617	103772
28	0.0393	346821	13644	83	0.0206	927124	19131
29	0.0084	213321	1790	84	0.0135	2510360	33863
30	0.0271	33834	916	85	0.0295	421848	12439
31	0.0400	3227374	129019	86	0.0850	2890994	245654
32	0.0252	1508749	38004	87	0.0345	2510116	86592
33	0.0539	1109549	59828	88	0.0199	2091856	41634
34	0.0329	3610454	118819	89	0.0432	229216	9900
35	0.1055	2319457	244590	90	0.1034	1318321	136298
36	0.0838	2793044	234159	91	0.0344	2627446	90393
37	0.0497	753882	37434	92	0.0147	1069609	15751
38	0.0126	910448	11505	93	0.1283	2295228	294559
39	0.0320	2696867	86359	94	0.0712	2769079	197040
40	0.0765	1881462	143839	95	0.0098	1364438	13382
41	0.1074	4085818	438805	96	0.0926	1545208	143059
42	0.0771	1072671	82737	97	0.0720	2953907	212604
43	0.0454	1094165	49629	98	0.0109	5251570	57217
44	0.1075	4157255	446783	99	0.0232	961348	22268
45	0.0827	2080649	171974	100	0.0557	116619	6496
46	0.0150	1529213	22975	101	0.1005	2871895	288521
47	0.0607	492257	29878	102	0.0332	986405	32725
48	0.0477	2745994	130974	103	0.1189	713584	84818
49	0.0421	1886330	79402	104	0.0203	3059058	61963
50	0.0108	110727	1195	105	0.0342	627862	21453
51	0.0719	1837594	132079	106	0.0321	933895	30023
52	0.0877	5252884	460418	107	0.0362	1043267	37787
53	0.1023	1402202	143460	108	0.0400	1418212	56683
54	0.0059	970537	5735	109	0.0328	623864	20472
55	0.0706	3006408	212382	110	0.0223	1296080	28946

Tabla N° 7

Generación y transporte de sedimentos

CAPÍTULO B

CAPÍTULO B

B) MODELO DE TRANSPORTE SÓLIDO PARA LA ALTA CUENCA. ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE LOS PRINCIPALES RÍOS QUE LA COMPONEN.

b. 1) Recopilación y análisis de antecedentes.

i. Resultados de las tareas de campo realizadas en el marco del proyecto: perfiles transversales en los ríos de la red, granulometrías del material del lecho, cota de ceros de escalas hidrométricas vinculadas a la red IGM.

La Dirección Provincial de Recursos Hídricos de Jujuy (DPRHJ) realizó en el marco del PEA, tareas de campo que involucraron el relevamiento de perfiles transversales, en distintas zonas de los ríos Bermejo, San Francisco, Grande y Lavayén. La ubicación en planta de cada uno de ellos se puede observar en las Figuras N° 1 a 8, y las planillas de coordenadas x, y, z, en las Tablas N° 1 a 14. Allí mismo, se presentan los gráficos correspondientes. Algunos de los perfiles están referidos al cero del IGM. Los restantes fueron vinculados a dicho cero, por una comisión conjunta de la DPRHJ y la Administración Provincial de Aguas del Chaco (APA). En la Tabla N° 15 se indica la cota IGM de los mojones de referencia de cada uno de los perfiles señalados.

Con referencia al material del lecho, se realizó una campaña a cargo del LHA, en la que se tomaron muestras fotográficas para el análisis granulométrico en las siguientes secciones: zona dique Los Molinos en el río Grande, sección El Piquete en el río Lavayén, y en la zona del puente de la Ruta N° 34 en el río Bermejo. Razones climáticas impidieron la toma de muestras en el resto de las secciones. El resultado del análisis granulométrico efectuado se presenta en el Anexo II, no obstante, las curvas granulométricas elaboradas correspondientes se detallan en las Figuras N° 9, 10 (ambas del río Grande), 11 (río Lavayén) y 12 (río Bermejo).

ii. Datos de niveles y caudales líquidos, y caudales sólidos, en todas las estaciones de la red de mediciones de EVARSA en la Alta Cuenca.

En los cuadros que se presentan a continuación, se detallan las estaciones de aforo ubicadas en la Alta Cuenca del río Bermejo, con los períodos de registro correspondientes, de las cuales ha sido posible recopilar los datos de niveles, caudales líquidos y sólidos, en soporte magnético.

Debe señalarse la existencia de mayor cantidad de información básica, pero se encuentra en gran parte sólo asentada en las planillas originales de aforos, y no informatizada. La duración y las características de los trabajos que se desarrollaron hace que el volcado de los datos en soporte magnético sea una tarea que excede el alcance de aquéllos.

Por lo tanto, en virtud de la experiencia y conocimiento del tema, se ha privilegiado la información estrictamente necesaria para el correcto desarrollo de los trabajos, procediéndose sí, en esos casos, a pasar los datos del papel a planillas de cálculo. A tal fin, se destinó una comisión a la sede de la Gerencia de EVARSA del Noroeste en Tucumán, donde se procedió a la recopilación de la información histórica necesaria. Se deja constancia que resultará valioso cualquier esfuerzo o gestión que implique el

pasaje del total de los datos a soporte magnético.

A continuación se presentan los cuadros citados, con la información informatizada recopilada:

RÍO	ESTACIÓN	Caudales líquidos aforados y lecturas de escala:
		PERÍODO DE REGISTRO
Bermejo	Aguas Blancas	1963 - 1995
Bermejo	Arrazayal	1978 - 1985
Bermejo	Balapuca	1971 - 1995
Bermejo	Alarache	1986 - 1995
Bermejo	Pozo Sarmiento	1989 - 1998
San Francisco	Caimancito	1964 - 1998
Pescado	Cuatro Cedros	1986 - 1995
Tarija	San Telmo	1986 - 1997
Iruya	San José	1985 - 1998
Grande de Tarija	Astilleros	1978 - 1985

RÍO	ESTACIÓN	Caudales medios diarios:
		PERÍODO DE REGISTRO
Bermejo	Aguas Blancas	1944 - 1995
Bermejo	Balapuca	1971 - 1995
Bermejo	Alarache	1971 - 1995
Bermejo	Pozo Sarmiento (*)	1940 - 1995
San Francisco	Caimancito	1947 - 1995
Pescado	Cuatro Cedros	1956 - 1995
Tarija	San Telmo	1964 - 1995
Iruya	San José	1980 - 1995
Iruya	Anta Muerta - El Angosto	1971 - 1976

RÍO	ESTACIÓN	Caudales medios mensuales:
		PERÍODO DE REGISTRO
Bermejo	Aguas Blancas	1944 / 1995
Bermejo	Balapuca	1971 / 1995
Bermejo	Alarache	1971 / 1995
Bermejo	Pozo Sarmiento (*)	1940 / 1995
San Francisco	Caimancito	1946 / 1995
Pescado	Cuatro Cedros	1956 / 1995
Tarija	San Telmo	1964 / 1995
Iruya	San José	1979 / 1996
Iruya	Anta Muerta - El Angosto	1955 - 1979
Astillero	El Angosto	1983 - 1987
Piedras	San Antonio	1983 - 1991
Grande	San Juancito	1967 - 1981
Lavayén	Bajada de Pinto	1970 - 1980

(*) La estación de aforos Pozo Sarmiento se encuentra aproximadamente 5 km. aguas arriba de la estación Zanja del Tigre. En esta última se aforó hasta Enero de 1988, y a partir de Febrero de 1988, comenzó a operar la estación de Pozo Sarmiento.

En el Anuario de Agua y Energía se presentan los transportes sólidos en suspensión mensuales para las estaciones de la Alta Cuenca que se detallan en la Tabla N° 16. En la misma referencia se presenta también, para cada estación, un dato de la granulometría de los sólidos suspendidos. Este dato es, en

general, puntual, correspondiendo en algunos casos a la media de un período. En base a esa información se elaboraron los gráficos granulométricos que se presentan en las Figuras N° 13 a 35.

En la recopilación realizada, no se hallaron datos de aforos sólidos de arrastre de fondo, así como tampoco de análisis granulométricos del material del lecho, con excepción de algunos datos puntuales.

De las estaciones que se mencionan en el cuadro siguiente, se obtuvieron además de los datos hidrológicos antes mencionados, los aforos sólidos. A partir del año 1993, las mediciones de sólidos en suspensión se realizan teniendo en cuenta en forma separada la fracción gruesa de la fina:

RÍO	ESTACIÓN	PERÍODO DE REGISTRO
Bermejo	Aguas Blancas	1963 - 1995
Bermejo	Balapuca	1971 - 1995
Bermejo	Alarache	1986 - 1995
Bermejo	Arrazayal	1981 - 1984
Bermejo	Pozo Sarmiento	1989 - 1995
San Francisco	Caimancito	1985 - 1998
Pescado	Cuatro Cedros	1986 - 1995
Tarija	San Telmo	1986 - 1995
Iruya	San José	1985 - 1998

iii. Datos pluviométricos y pluviográficos en todas las estaciones de la red.

La necesidad del dato básico pluviométrico en el presente trabajo, surge de su utilización para la estimación de la producción de sedimentos por erosión superficial en la Alta Cuenca del río Bermejo. La carta temática con las isohietas anuales

(input del modelo utilizado), ha sido provista por el PEA a este Laboratorio para su uso, y por lo tanto, la tarea de recopilación de datos se redujo, en este caso, a la identificación de las estaciones pluviométricas y pluviográficas en la Alta Cuenca, las que se han volcado en las Tablas N° 17 y 18.

Un mayor detalle se pudo obtener en la cuenca del río Iruya, de la información recopilada en COREBE en el marco del Plan de Manejo Integrado de la Cuenca del Río Iruya. En el cuadro siguiente (pie de página) se presentan las estaciones, las variables medidas, la frecuencia de medición y el período disponible.

iv. Relevamientos de secciones transversales en correspondencia con las estaciones de la red de EVARSA.

El conocimiento de la evolución en el tiempo de las secciones transversales de los ríos de la red, es un dato de gran importancia a la hora de evaluar el comportamiento morfológico del río. Es por esto que se trató de reunir la mayor cantidad de información disponible en este sentido.

Las estaciones de aforo manejadas antes por Agua y Energía y hoy por EVARSA, constituyen una fuente importante de información, ya que en cada aforo se levanta la sección transversal. Como ya se expresara, se destinó una comisión a la sede de la Gerencia de EVARSA del Noroeste en Tucumán, donde se procedió a la recopilación de la información histórica necesaria, directamente de las planillas de aforo.

En virtud del gran volumen de información existente, en papel, se identificaron algunos periodos de interés, volcando esa información en soporte magnético.

Estación	Variable medida	Frec.	Fecha inicial	RÍO IRUYA
				Fecha final
San José	Temp-Hum	diaria	sep 92	abr 98
Colanzuli	Temp-Hum	diaria	nov 92	feb 98
San José	Viento-Evp	diaria	set 92	abr 98
Colanzuli	Viento-Evp	diaria	nov 92	feb 98
San José	Precipitación	diaria	nov 80	abr 98
Iruya	Precipitación	diaria	oct 82	feb 98
Higueras	Precipitación	diaria	dic 82	feb 98
San Antonio	Precipitación	diaria	set 82	feb 98
San Isidro	Precipitación	diaria	dic 83	feb 98
Nazareno	Precipitación	diaria	jun 83	feb 98
Paltorco	Precipitación	diaria	oct 84	feb 98
Tuc-tuca	Precipitación	diaria	oct 82	feb 98
Poscaya	Precipitación	diaria	oct 84	feb 98
Colanzuli	Precipitación	diaria	nov 91	feb 98
El Molino	Precipitación	diaria	dic 82	feb 98
Pabellón	Precipitación	diaria	nov 84	feb 98

Es así que en la Alta Cuenca del Bermejo se recopilaron las planillas de aforo para las fechas que se detallan a continuación. En estas planillas consta el dato caudal, área del cauce, velocidad media, y lectura de escala. Las cotas no están referidas al cero del IGM, sino que poseen un referenciamiento local arbitrario.

ESTACIÓN	FECHA	FIGURA N°
Pozo Sarmiento	6/12/97 al 11/5/98	Figura N° 36
Zanja del Tigre	5/2/81	Figura N° 37
Caimancito	3/5/84	Figura N° 38
Aguas Blancas	30/10/80 al 0/7/81 20/10/83 al 1/3/84	Figura N° 39 Figura N° 40

Las progresivas de las verticales de aforo detalladas en las planillas mencionadas, son relativas al mismo punto inicial, pero las cotas especificadas son tomadas respecto al nivel de la superficie del agua, es decir, profundidades. Sólo cuentan con la lectura de escala en el momento del aforo, sin mencionar la cota del cero respectivo, por lo que se ha supuesto que en el período considerado, la cota del cero no ha variado, de modo de poder superponer las secciones, y determinar su evolución en el tiempo.

Por otra parte, se han podido recopilar, de la misma fuente, planillas de aforo donde se presenta la sección referenciada a un mojón de cota arbitraria. En este caso se pueden comparar, con mayor grado de certeza, las secciones con el transcurso de los años. Del mismo modo, pueden visualizarse las secciones completas (no sólo hasta el pelo de agua como en el caso anterior). En base a estas planillas, que se volcaron a soporte magnético, se confeccionaron gráficos comparativos de la evolución de las secciones respectivas, que se detallan en el siguiente cuadro:

ESTACIÓN	FECHAS	FIGURA N°
Alarache	13/10/93, 24/5/94, 14/9/95	Figura N° 41
Balapuca	1/9/88, 13/10/93, 14/9/95	Figura N° 42
Aguas Blancas	30/8/88, 29/5/90, 15/6/92, 26/7/93, 18/6/94, 13/9/95, 5/9/97	Figura N° 43
Pozo Sarmiento	19/5/88, 30/5/90, 3/8/93, 17/6/94, 11/9/95, 25/9/97	Figura N° 44
Caimancito	4/8/93, 15/9/95, 28/8/97	Figura N° 45

Como puede apreciarse, las fechas de los levantamientos corresponden a meses de aguas bajas, por lo que la información consignada permite evaluar el funcionamiento del sistema después del paso de la época de crecientes.

v. Cartografía de toda la AC, a la menor escala disponible. Líneas de nivelación del IGM en la AC.

Al igual que en el caso de los datos de lluvia, el mayor grado de utilización de la cartografía de la cuenca se concentra en el estudio de la producción de sedimentos por erosión superficial. También en este caso, y como se ha explicado en los puntos de las actividades a.1) y a.2), las cartas temáticas correspondientes al igual que las curvas de nivel, fueron entregadas por el PEA, de acuerdo a lo especificado.

Esta información también fue utilizada para la implementación del modelo matemático morfológico de los principales ríos de la red.

No obstante puede decirse aquí que la cartografía del Instituto Geográfico Militar que abarca toda la cuenca del río Bermejo se encuentra disponible en escala 1:500000, detallándose a continuación las hojas correspondientes a la Alta Cuenca del río Bermejo:

Hoja N°	Nombre
2366	La Quiaca
2566	Salta
2363	Tartagal
2563	Monte Quemado

En base a la cartografía citada, se ha digitalizado un plano de ubicación general de los puntos geográficos más destacables de la cuenca del río Bermejo, considerándose entre otros, la ubicación de las estaciones de aforo, posicionadas según coordenadas dadas por EVARSA, líneas de nivelación IGM, rutas, ciudades, y la red hidrográfica. En base a la interpretación de una foto satelital, se ubicó la zona de desbordes en la cuenca media y baja (Plano N° 1).

En la Figura N° 46 se detallan las líneas de nivelación IGM que se encuentran en la Alta Cuenca.

Es de resaltar la existencia de una línea de nivelación de Alta Precisión, que se desarrolla entre el Nodal 229, ubicado en la población de Pichanal (Argentina) y el Banco de Nivel N° 39, localizado en el Puente Internacional sobre el río Bermejo (Bolivia). La nivelación fue realizada en el año 1997, en el marco de las tareas llevadas a cabo para el Anteproyecto Definitivo de los Aprovechamientos de Las Pavas, Arrazayal y Cambarí, por los consultores contratados a tal fin.

Esta línea de nivelación sirvió de apoyo a la vinculación altimétrica de los perfiles transversales levantados sobre el río Bermejo, descriptos en el punto b.1). Su traza puede observarse en el Plano N° 1.

vi. Imágenes satelitales de la zona de estudio.

En este caso el PEA proveyó a este Laboratorio el juego de imágenes Landsat adquirido para el desarrollo del Programa, correspondientes al período seco de 1997. El detalle de las mismas es el siguiente (ver pie de página):

Dichas imágenes han sido de suma utilidad a la hora de determinar cambios morfológicos en planta de los ríos a modelar, anchos del valle y del curso de agua, etc.

vii. Fotografías aéreas de la zona de estudio.

En este caso, se consultaron los juegos de fotos aéreas adquiridos en el marco de los estudios básicos realizados para el proyecto de las presas de Las Pavas y Arrazayal, sobre el río Bermejo Superior, y Cambarí, sobre el río Tarija.

viii. Recopilación de estudios de trabajos afines realizados en todos los ríos de la red, que permitan la extracción de datos básicos relacionados con los citados en los ítems anteriores.

El desarrollo de este punto se incorporó dentro de las Referencias generales.

b.2) Interpretación y análisis de la información básica.

i. Delimitación del área de estudio y definición de la red de cauces a modelar.

En el Plano N° 2 se ha definido la red de cauces a modelar, con la ubicación de las estaciones de aforos existentes, y de las presas proyectadas Las Pavas, Arrazayal y Cambarí. Dicha red está compuesta, en principio, por los ríos Bermejo (desde Estación Balapuca hasta Junta de San Francisco), Grande de Ta-

rija (desde Estación Astilleros hasta Junta de San Antonio), Grande (desde el dique Los Molinos hasta la confluencia con el Lavayén), Lavayén (desde Estación Bajada de Pinto hasta la confluencia con el Grande), San Francisco (desde la confluencia Grande - Lavayén hasta Junta de San Francisco).

En el interior de la red presentada, existen estaciones de aforo, de datos de caudales líquidos, sólidos en suspensión, y niveles líquidos, que fueron utilizadas en la calibración del modelo. Ellas son: Arrazayal, Aguas Blancas, Zanja del Tigre - Pozo Sarmiento (sobre el Bermejo), San Telmo (sobre el Grande de Tarija), San Juancito (sobre el río Grande) y Caimancito (sobre el San Francisco).

Los cauces se esquematizaron mediante secciones transversales distanciadas 4000 m, obtenidas a partir de los relevamientos realizados en el marco del estudio, de la información específica adicional recopilada (cartas topográficas desarrolladas en el marco de los proyectos de las presas en la Alta Cuenca, estudios particulares en algunas zonas de los ríos de la red), en combinación con las imágenes satelitales, fotos aéreas, y, en especial, la topografía de la cuenca, a escala 1:250000, provista por el PEA. También de la carta temática topográfica se obtuvo la delimitación definitiva de cuencas y subcuencas.

ii. Elaboración de los datos batimétricos y de sedimentos.

Como ya se expresara, resulta de suma utilidad para conocer el comportamiento morfológico de los cauces de los ríos, tener información acerca de la evolución de perfiles transversales relevados en diversas secciones, y en distintas fechas, referidos a un mismo cero. Para los fines buscados en este caso, no resulta imprescindible que el nivel de referencia sea el cero del IGM, bastando cualquier cero local arbitrario para cada sección.

La falta de referencia de los perfiles de las distintas secciones a un cero común (el del IGM), tiene sí la desventaja de no poder evaluar la evolución del cauce a lo largo del río, debido a que entonces las secciones ya no se pueden relacionar para establecer, por ejemplo, la pendiente del río entre tramos.

Las planillas de aforos recopiladas, si bien cumplen perfectamente con el formato necesario para obtener un caudal líquido, presentan un esquema tal que no resulta trivial, a partir de las mismas, la

CTRIMG	PATH	ROW	limsupizq_y	limsupizq_x	FAJA
28226	P230	075	4367690	7708367	4
28227	P230	076	4334846	7545951	4
28102	P230	077	4296792	7390392	4
28103	P231	075	3515873	7706391	3
27978	P231	076	3479483	7547331	3
27979	P231	077	3443177	7388437	3

determinación de secciones transversales de río comparables entre diferentes aforos. En particular, referir las progresivas y las profundidades a orígenes comunes para todas las secciones analizadas, resultó una tarea dificultosa, debiendo apelarse al criterio ingenieril para su elaboración, no siempre lográndose el objetivo buscado con el grado de precisión deseado.

Teniendo en cuenta lo antes expresado, se realizó la comparación de los perfiles transversales recopilados, detallados en el punto b.1) iv., evaluándose las estaciones de Alarache, Balapuca, Aguas Blancas y Pozo Sarmiento, en el río Bermejo y, Caimancito en el río San Francisco.

En las estaciones de Alarache (Figura N° 41) y Balapuca (Figura N° 42), ambas sobre el río Bermejo Superior y aguas arriba de Aguas Blancas, sólo se han podido recopilar secciones correspondientes a meses de aguas bajas. A partir de estos datos, que abarcan tres años en el caso de Alarache y ocho en el caso de Balapuca, puede observarse que en ambos casos las secciones se mantienen relativamente estables, entre períodos de aguas bajas. Como características generales de la zona en la que se ubican las secciones analizadas, puede decirse que éstas presentan laderas con barrancas, vegetación en la parte superior de las mismas, y hacia el centro, playas con arenas y cantos rodados de granulometría extendida. En aguas bajas los anchos superficiales son inferiores a los 50 m.

A partir de la Figura N° 41, se observa en Alarache un descenso generalizado del lecho de la sección entre 1993 y 1994, y un recrecimiento del mismo en 1995, a niveles superiores a los de 1993. Con el fin de explicar este comportamiento, en el cuadro siguiente se presentan los caudales medios mensuales y los máximos medios diarios (en m³/s), para el período de creciente de cada año (considerando desde diciembre a abril):

Período	dic.	en.	feb.	mar.	abr.	Q.M.m.d.
1993-94	27	28	48	20	11	323
1994-95	18	41	20	50	20	167

Puede observarse que, si bien poco puede decirse a partir de los caudales medios mensuales, los caudales máximos medios diarios registrados indican un comportamiento que va en el sentido de la evolución de las secciones antes explicada. Estos comentarios, realizados en base al análisis de la información básica disponible, serán desarrollados y confirmados, o no, a partir de la implementación del modelo matemático morfológico.

En Balapuca, a partir de la Figura N° 42, se observa una situación similar. La cota media del lecho de la sección es más alta en 1988, descendiendo en 1993, y recreciendo en 1995, en este caso a niveles algo inferiores a los de 1988.

Para Alarache, la pendiente de la superficie libre medida en aguas bajas, en conjunto con el levantamiento de la sección, varía entre 0.003 y 0.0095 (con una media de 0.00585), mientras que en Balapuca, que se encuentra aguas abajo, la pendiente tiene un valor medio de 0.0002, coincidente con los valores individuales medidos.

Como conclusión del análisis de estas dos secciones, en los períodos de registro disponibles, puede decirse que, en general, y comparando épocas de aguas bajas, las mismas mantienen una estabilidad en su forma y en la cota media del lecho, la que parece variar en función de los caudales pasantes en cada caso.

En cuanto a la sección de la estación Aguas Blancas, se ha obtenido mayor cantidad de información. Se han comparado las secciones completas para el período de aguas bajas, correspondientes a los años 1988, 90, 92, 93, 94, 95 y 97 (meses entre mayo y septiembre).

El resultado obtenido puede apreciarse en la Figura N° 43. Se observa que, al igual que en los casos anteriores, y bajo las mismas consideraciones, la sección permanece estable, conservando sus características. En este caso puede darse más generalidad a la conclusión debido al mayor número de años analizados.

Como ya se expresara, para la estación Aguas Blancas se ha podido comparar la evolución de la sección con el paso de las crecidas de los años 1980/81 y 1983/84. Especialmente en la primera, se produjeron importantes variaciones del caudal medio diario (desde alrededor de 20 m³/s hasta 1454 m³/s, en enero de 1981).

Las secciones transversales correspondientes a cada aforo han sido comparadas teniendo en cuenta la lectura de escala, y suponiendo que en ese período no ha cambiado la cota del cero. En general, se trata de una sección encajonada entre barrancas con algún tipo de vegetación de tipo rala a mediana altura, hacia la parte más elevada de la margen derecha. En la parte más baja se encuentra un pedregal con cantos rodados. La margen izquierda se encuentra en cierta forma removida por la presencia de un camino boliviano. La zona de mayor profundidad, se aproxima hacia margen izquierda. El ancho

superficial oscila entre 100 m, en aguas bajas, a 150 m, en aguas altas. La pendiente del pelo de agua medida en esta zona para el período de aguas bajas es en término medio igual a 0.0002.

En la Figura N° 39 puede observarse la evolución de la sección transversal durante el período de aguas altas del año 1980/81, a través de la graficación de los perfiles correspondientes a siete aforos. Se consigna en el gráfico, para cada perfil, el valor de la lectura de la escala y del caudal aforado, así como la fecha respectiva. Resulta interesante ver la variación del perfil desde su estado inicial, hasta valores máximos puntuales de erosión, y cambios en la forma de la sección, para tener luego una recuperación de la cota del lecho con la recesión del hidrograma de crecida.

Se continúa el análisis con la sección correspondiente a la estación Pozo Sarmiento, aguas abajo de la sección de Aguas Blancas. Al igual que en los casos anteriores, se han comparado las secciones en aguas bajas, prácticamente para los mismos años que en Aguas Blancas, evidenciándose una sección igualmente estable, sufriendo como es de esperarse erosión durante la crecida y deposición al reducirse el caudal (Figura N° 44).

Lo dicho puede apreciarse claramente en la Figura N° 36, donde se ha comparado la evolución de la sección en el período de crecientes del año 1997/98. Durante este proceso la variación máxima de la cota del fondo fue del orden del metro. Las márgenes son en barranca, siendo más empinada en margen izquierda, y hacia ambos lados, en las zonas más elevadas, posee vegetación tupida y alta, mientras que hacia el centro de la sección, se va reduciendo en altura, llegando a ser maleza y pastos. El ancho superficial se extiende entre 100 m. en aguas bajas, y 200 m. en aguas altas. Se ha obtenido la sección transversal correspondiente a un aforo de la sección Zanja del Tigre, que se encuentra 5 km. hacia aguas abajo, de fecha 5/2/81, en el que el caudal medio diario fue 7788 m³/s (Figura N° 37).

En cuanto al río San Francisco, en la estación Caimancito, se recopilaron secciones transversales correspondientes a las épocas de aguas bajas de los años 1993, 95 y 97. Las mismas se han graficado en la Figura N° 45. De acuerdo a las posiciones variables que adopta el talweg, se puede inferir que se trata de un río divagante, en la zona de emplazamiento de la sección de aforo.

En cuanto a los datos de granulometría de los sedimentos del lecho de los ríos de la red, como se expresara en el punto b.1) i, se tomaron muestras cuyas curvas granulométricas se presentan en las Figuras N° 9, 10 (ambas del río Grande), 11 (río Lavayén) y 12 (río Bermejo, en Embarcación). Detalles de las mismas pueden encontrarse en el

Anexo II. Como también se expresara, dificultades climáticas impidieron la toma de mayor número de muestras.

Pudieron recopilarse curvas granulométricas de material en suspensión y del lecho del río Bermejo en correspondencia con las estaciones Alarache (Figura N° 47), Balapuca (Figura N° 48) y Aguas Blancas (Figura N° 49). De esta información, producida por EVARSA, y de acuerdo a la referencia consultada, la distribución de la arena en suspensión se obtuvo mediante la composición de varias muestras captadas a lo largo de un año de muestreos, involucrando por lo tanto distintos eventos hidrológicos. En lo que se refiere al material del lecho, y siempre de acuerdo a la referencia, se presentan las distribuciones de la arena y grava media (entre 0.062 mm y 10 mm), por un lado, y la de material superior a 10 mm por el otro.

Con los datos de aforos sólidos en suspensión, se elaboraron curvas caudal líquido-caudal sólido, para cada una de las estaciones analizadas.

En la Figura N° 50 se presentan los resultados obtenidos para la estación Balapuca. Se observa un grado de dispersión de los datos, mucho mayor para los caudales bajos, pero que es normal para el tipo de variable analizada. En este caso el período de análisis se inicia en 1993, año en el que EVARSA comenzó a separar, de la carga sólida en suspensión total, la fracción fina (limos y arcillas) de la gruesa (arenas). El período total disponible es desde 1971, pero las planillas analizadas de las que se levantaron los datos presentan incertidumbres acerca de las unidades en las que se expresa el caudal sólido. Prueba de ello es el gráfico presentado en la Figura N° 51, en el que se ha volcado el total de pares de valores caudal líquido - sólido disponibles. La gran dispersión observada sólo se fundamenta en el hecho señalado, o en algún otro de origen desconocido. Es por esto que se optó por trabajar con las series desde 1993 en adelante, en las estaciones en las que se observó este tipo de inconveniente.

En la citada Figura N° 50, se ha graficado una curva media que vincula las variables analizadas. Para la implementación del modelo morfológico del Bermejo Superior, resultan necesarias expresiones que vinculen el caudal líquido con la fracción gruesa del caudal sólido total en suspensión. Esto es así, porque las fórmulas que permiten calcular el transporte total de fondo (arrastre más suspensión), en general, y la fórmula de Di Silvio, que es la empleada en el modelo ALPS-2, en particular, no incluyen la carga de lavado.

Como los datos medidos dan el transporte en suspensión total (carga de lavado más suspensión de la capa de fondo), debe hacerse la separación, considerando en este caso como definición de car-

ga de lavado, a aquélla fracción cuyo diámetro no supera los 62 μ . Los análisis relativos a este tema serán presentados dentro del desarrollo de próximos puntos, al explicar la tarea concerniente a la preparación de los datos básicos para la implementación del modelo de transporte.

En la Figura N° 52 se presentan los resultados obtenidos para la estación Arrazayal. En este caso el período disponible fue 1981-1984.

En la estación Aguas Blancas se contó con un período de registros de caudales sólidos que abarca desde 1963 a 1995, pero al igual que en el caso de Balapuca, se trabajó desde 1993, presentándose los resultados en la Figura N° 53.

El mismo análisis se realizó para las restantes estaciones: Pozo Sarmiento (Figura N° 54, período 1993-95), San José (Figura N° 55, período 1993-95), Cuatro Cedros (Figura N° 56, período 1993-95), Caimancito (Figura N° 57, período 1993-95), Astilleros (Figura N° 58, período 1981-85) y San Telmo (Figura N° 59, período 1993-95).

En cada una de las figuras aquí citadas, se presenta la expresión correspondiente a la curva de ajuste. Es oportuno mencionar que los valores de R^2 obtenidos son los adecuados cuando se vinculan caudales líquidos y sólidos en suspensión (del orden de 0.7), mientras que el exponente del caudal líquido se encuentra en la mayoría de los casos en el orden de 2, lo que resulta coincidente con el exponente que presenta dicha variable en la fórmula de Di Silvio para el cálculo del transporte total de fondo.

iii. Análisis de los niveles y caudales en las distintas estaciones. Estadística de caudales, determinación de caudales característicos de los cauces de la red, incluyendo caudales de diseño para los escenarios de aplicación del modelo matemático.

Con los datos de caudales recopilados en las distintas estaciones, de acuerdo al detalle presentado en el punto b.1) ii, se han elaborado curvas de duración para las estaciones más relevantes, en función de la implementación del modelo. A continuación se detallan estaciones analizadas y los períodos considerados: Balapuca (1971-95, Figura N° 60), Arrazayal (1978-84, Figura N° 61), Aguas Blancas (1963-95, Figura N° 62), Pozo Sarmiento (1989-98, Figura N° 63), San José (1980-95, Figura N° 64), Cuatro Cedros (1956-95, Figura N° 65), Caimancito (1947-95, Figura N° 66), Astilleros (1978-85, Figura N° 67) y San Telmo (1986-95, Figura N° 68).

Las estaciones sobre los ríos Grande (San Juancito) y Lavayén (Bajada de Pinto), dejaron de ser operadas por Agua y Energía, pasando a depender de organismos provinciales. De acuerdo a la información recopilada, los datos de caudales líquidos medidos en la actualidad corresponden a aguas bajas, siendo de poca importancia para el estudio que nos ocupa. Además están volcados en planillas, lo que, sumado a lo anterior, motivó la imposibilidad de su elaboración, en virtud del alcance del presente estudio.

En el anuario 1994 de EVARSA, se presentan los caudales medios mensuales en San Juancito, para el período de registro 1967/81, y en Bajada de Pinto, para el período de registro 1970/80, consignándose que el 1/3/1981 ambas estaciones se transfirieron a la provincia de Jujuy.

La variabilidad de las cotas del lecho y hasta de la forma de las secciones transversales de los ríos analizados, tal como se ha demostrado en el punto anterior, hace que la relación entre los niveles y caudales líquidos en cada una de las estaciones no constituya una única curva, sino que conforma una nube de puntos, con mayor o menor dispersión según el caso, si se grafican todos los pares de valores H y Q , sin discriminar. A modo de ejemplo, esto puede observarse en la Figura N° 69 para Aguas Blancas, y en la Figura N° 70 para Astilleros.

Si se dibujan separadamente los pares de valores H - Q para cada año, se observa que los puntos sí se acomodan siguiendo aproximadamente una única ley, aunque también se observa dispersión. Este ejercicio se presenta en la Figura N° 71, para la estación Caimancito.

Debe mencionarse en este sentido, que posibles corrimientos de las escalas hidrométricas, comunes en ocasión de crecientes, sobre todo en los primeros tramos de dichas escalas, suman errores en la determinación de las relaciones H - Q . Al respecto, salvo algunos casos aislados, no se cuenta con información sobre los movimientos de las escalas, y la relación entre los ceros anteriores y posteriores a dichos movimientos.

No obstante todo lo explicado, pero teniéndolo en cuenta, se ha intentado definir una ley H - Q en cada caso, para su utilización en la conversión de caudales a alturas. Como ejemplo del problema planteado, se presentan en las Figuras N° 72 y 73, los datos correspondientes a la sección de Aguas Blancas para gastos menores y mayores a 150 m³/s respectivamente. Se puede observar que, a pesar de ubicarse los valores siguiendo aproximadamente una ley, se evidencia la dispersión señalada debido a los posibles errores mencionados. El valor límite de 150 m³/s surge de la apreciación realizada del total

de los datos, ya que, para caudales menores y mayores a ese valor, aquéllos se disponen con tendencias diferentes.

Debe tenerse en cuenta que las curvas de ajuste encontradas sólo tienen validez en el rango de variación de los parámetros involucrados expuestos.

Por otra parte, y de acuerdo a las necesidades del modelo morfológico a utilizar, se han determinado curvas de duración anual características de caudales medios diarios para cada estación, las que se definen como la media de las curvas de duración anuales de las series de registros analizadas. Como ejemplo se presenta en este ítem la curva correspondiente a la estación Pozo Sarmiento (Figura N° 74).

A partir de estas curvas, y de las relaciones entre el caudal líquido y el caudal sólido en suspensión, obtenidas para las distintas estaciones (punto b.2) ii), se calcularon también curvas de duración anual características del transporte de sedimentos en suspensión. También como ejemplo, se presenta la correspondiente a los sedimentos suspendidos totales en la estación Pozo Sarmiento (Figura N° 75).

iv. Analizar los resultados de la producción de sedimentos en las subcuencas.

El desarrollo de esta tarea se encuentra concentrado completamente en el capítulo a).

v. Ubicación de las obras existentes en los cauces de la red.

Se trata de identificar los hechos físicos de esta naturaleza existentes en la Alta Cuenca, que tengan relación con los cauces de la red a analizar, los que se han volcado en el Plano N° 1.

Existe un tendido de vías del Ferrocarril General Belgrano que proviene del norte de la población de Tartagal, en concordancia con el trazado de la Ruta Nacional (RN) 34, continuando hacia el sur hasta la población de Embarcación. En este recorrido, intercepta la RN 86 (de tierra) en la primera población, y antes del cruce del río Seco, encuentra la RN 81, que proviene desde Hickman. Las vías, al igual que la RN 34, cruzan otros riachos que desembocan en la laguna San José, y entre las poblaciones de Embarcación y Pichanal, cruzan al río Bermejo mediante sendos puentes.

Desde Pichanal y hacia el sur, la RN 34 toma un rumbo sud-oeste, hacia la localidad de Lib. Gral. San Martín en la provincia de Jujuy, cruzando los ríos Seco, de las Piedras y San Lorenzo (afuentes del río San Francisco), entre otros. Las vías del Ferrocarril, a su vez, se bifurcan, continuando un ramal este recorrido, y el otro, hacia el sur-este, junto con la Ruta Provincial (RP) 5, cruzando el río San Francisco y pasando por las lomas de Olmedo, hasta Apolinario Saravia. A partir de este punto, tuercen hacia el sud-oeste, después de cruzar el río Del

Valle Dorado, siguiendo éste último hacia aguas arriba. Las vías continúan hasta J.V. González, al igual que la RP 30, y la RP 5 se separa hacia el sudoeste, hasta encontrarse con la RN 34.

La RN 34, junto con el Ferrocarril, desde la localidad de Lib. Gral. San Martín, hacia el sur, cruzan los ríos Ledesma, Negro, Grande y Mojotoro, entre otros. Desde el cruce con el río Grande y hacia San Salvador de Jujuy, se unen a la anterior la RN 66, cuya traza va bordeando al río Grande por margen derecha, y la RP 56, sobre margen izquierda. Las vías del Ferrocarril llegan a la localidad de Perico, donde confluyen otros dos ramales: uno que viene desde el sur, paralelo a las RN 9 y 34, que desde la localidad de Rosario de la Frontera y hasta 10 km al sur de Gral. Güemes, coinciden en sus trazas, y otro ramal desde el norte junto a la RN 66, cruzando ambos el río Perico y otros afluentes del río Grande.

Al norte de la localidad de Caimancito, y desde la RN 34, parte hacia el sud-este la RP 1, que cruza el río San Francisco, en las cercanías de la estación de aforos de EVARSA. A partir de allí, tuerce el rumbo hacia el sur, hacia la localidad de Santa Clara, volviendo luego sobre la RN 34 hacia el oeste.

La RN 9, que desde el sur une la ciudad de Salta con la de San Salvador de Jujuy, cruza al río Mojotoro y Perico, entre los más importantes. Desde ésta última localidad y hacia el norte, continúa sobre la margen derecha del río Grande, cruzando todos los afluentes correspondientes a este último hasta la población de Humahuaca, y una vez que recorre la quebrada del mismo nombre, pasa por la localidad de Abra Pampa. En su camino hacia Bolivia, antes de abandonar a la Argentina, pasa por la población de La Quiaca. El Ferrocarril desarrolla un recorrido similar a esta ruta. Hacia el norte de Humahuaca, y a partir de los 25 km aproximadamente, la RN 9 deja de ser pavimentada para ser un camino consolidado.

Desde Pichanal hacia el norte, parte la RN 50, que una vez que ha pasado por la ciudad de San Ramón de la Nueva Orán, cruza el río Blanco o Zenta y el río Pescado, entre otros afluentes del río Bermejo sobre margen derecha, concluyendo por último con el propio río Bermejo, en el Puente Internacional.

Dentro de la red de caminos señalada, existen otras rutas provinciales, cuyas trazas se encuentran aún en estado de caminos consolidados o como simples huellas.

vi. Definición de las características morfológicas y sedimentológicas de los cauces de la red: ajuste de ecuaciones de transporte sólido en base a las mediciones, análisis de la evolución morfológica de los cauces a partir del estudio de la variación de las secciones transversales en las estaciones de aforo de EVARSA.

En este punto se tratan de definir las características morfológicas y sedimentológicas de los cauces de la red a modelar, a partir de la información básica recopilada y analizada.

Se realizó el ajuste de ecuaciones de transporte sólido a partir de las mediciones, y un análisis de la evolución morfológica de los cauces a partir del estudio de la variación de las secciones transversales en las estaciones de aforo. Estos temas fueron desarrollados en el punto b.2) ii.

A partir del análisis de los datos básicos recopilados se obtuvo importante información acerca del funcionamiento hidrosedimentológico de los ríos en estudio, descrita en el citado punto b.2) ii. Las definiciones acerca de dicho funcionamiento se completaron a partir de la implementación y uso de los modelos de generación y transporte de sedimentos, que permiten la integración de los conocimientos alcanzados, y la obtención de conclusiones para los diferentes escenarios de análisis del sistema.

Resulta oportuno realizar en este punto una descripción general del sistema en estudio. Como es sabido, la cuenca del Río Bermejo abarca una superficie aproximada de 133000 km² desarrollándose sus nacientes en las provincias argentinas de Salta y Jujuy y en el departamento de Tarija, en la República de Bolivia. De la superficie total, cerca de 50000 km² constituyen la llamada Alta Cuenca, con cursos de agua de características de montaña, escenario de estudio del presente trabajo. Está situada en el extremo noroeste de Argentina y sur-sudeste de Bolivia, llegando hasta la Junta de San Francisco, confluencia entre el río Bermejo y el río San Francisco (Plano N° 1).

Desde el punto de vista hidrológico, la cuenca del Bermejo presenta un prolongado período de recepción y otro muy acotado de elevados caudales provenientes de las intensas lluvias del período estival. El período de aguas altas corresponde a los meses del verano, cuando ocurren las máximas precipitaciones. El período de estiaje es de abril a octubre, con valores mínimos generalmente en este último mes.

El río Bermejo nace en Bolivia, de la confluencia de los ríos Orosas y Condado, y constituye el límite internacional en un recorrido de unos 80 km, hasta su unión, en la Junta de San Antonio, con el río Grande de Tarija. Este último río nace de la confluencia de los ríos Tarija e Itaú, desde donde presenta una dirección hacia el sur-sudoeste. También el río Grande de Tarija, junto al recorrido inferior del río Itaú, constituyen el límite internacional.

En el tramo mencionado, desde sus nacientes hasta la Junta de San Antonio, el río Bermejo presenta pendientes medias del cauce principal que van desde el 3 % al 1 %. En la Fotografía N° 1, puede observarse al río Bermejo en la zona de sus nacientes, donde corre encajonado entre laderas cubiertas por vegetación.

Hacia aguas abajo, el río presenta las características mencionadas en el punto b.2) ii: laderas con barrancas, vegetación en la parte superior de las mismas, y hacia el centro, playas con arenas y cantos rodados de granulometría extendida. Los anchos van creciendo hacia aguas abajo desde el orden de 50 m. en la zona de la estación de aforos Alarache hasta aproximadamente 150 m., en la zona de la estación de aforos Aguas Blancas.

Lo dicho puede observarse en las Fotografías N° 2, correspondiente a Alarache, N° 3, estación de aforos Balapuca, y N° 4, Aguas Blancas. En este último sitio se nota el incremento del ancho mencionado.

Por su parte el río Grande de Tarija presenta pendientes menores a las Bermejo. En la Fotografía N° 5 puede observarse a este río, aguas arriba de la Junta de San Antonio, a la altura de la localidad de Puerto Bermejo. Se aprecia la diferencia del paisaje, y la mayor preponderancia de material fino en las zonas del lecho expuestas.

A partir de los registros disponibles, resulta que el caudal medio anual en la Junta de San Antonio es de 215 m³/s, de los cuales el 56 % corresponde al río Grande de Tarija y el 44 % al río Bermejo.

Desde la Junta de San Antonio, el río Bermejo sigue la dirección noroeste-sudeste, y recibe todos sus afluentes por margen derecha hasta la Junta de San Francisco, siendo el más caudaloso el río Pescado, cuyo tributario principal es el río Iruya, de alta producción de sedimentos. Después de la afluencia del río Pescado, el módulo del río alcanza los 347 m³/s. Del total del derrame anual, más del 85 % se produce en el período estival.

En la Fotografía N° 6 puede observarse al río Bermejo en la zona correspondiente al Perfil Transversal 7 (Tabla N° 7, Figura N° 4), ubicado aguas abajo de la afluencia del río Pescado, y aguas arriba de la del río Blanco o Zenta. Puede apreciarse la diferencia del paisaje con respecto al tramo superior del río, resaltándose la existencia de barrancas de material fino.

Esto se hace más notorio hacia aguas abajo, tal como puede verse en la Fotografía N° 7, correspondiente a la zona denominada «Chanchito Frito» (Tabla N° 9, Figura N° 5), con la presencia de una importante barranca sobre margen izquierda.

Siguiendo hacia aguas abajo, en la Fotografía N° 8 se presenta el río en la zona de emplazamiento de la estación de aforos de Pozo Sarmiento (Tabla N° 10, Figura N° 5). Pueden verse tramos de la escala hidrométrica, y nuevamente la presencia de una barranca arcillosa sobre la margen opuesta, lo que es

coincidente con la descripción efectuada en el punto b.2) ii. La Fotografía N° 9 muestra una panorámica del río en la zona.

La Fotografía N° 10 corresponde a la zona de Zanja del Tigre (Tabla N° 11, Figura N° 6), unos 5 km. aguas abajo de Pozo Sarmiento, lugar donde funcionaba antiguamente la estación de aforos. Finalmente, la Fotografía N° 11 muestra al río Bermejo desde el puente de la Ruta Nacional 34, hacia aguas abajo, en las cercanías de la localidad de Embarcación. El perfil transversal levantado más cercano es el de «La Quena» (Tabla N° 12, Figura N° 6). Puede observarse el aumento del ancho del río, con respecto a los anteriores.

El tramo del río Bermejo analizado, especialmente desde la desembocadura del río Blanco, presenta importantes barrancas de materiales finos, las que, por desmoronamiento, constituyen un aporte de este tipo de material al sistema.

Por su parte, el río San Francisco está formado por los ríos Grande de Jujuy y Lavayén. El río Grande atraviesa la Quebrada de Humahuaca, en un recorrido de dirección norte-sur por la provincia de Jujuy, hasta recibir al río Reyes por su margen derecha. En este tramo desembocan numerosos afluentes, muchos de los cuales sólo aportan durante las grandes tormentas, ya que en el período de estiaje los escasos caudales son utilizados para riego, permaneciendo sus cursos secos durante gran parte del tiempo.

La Fotografía N° 12 muestra una vista del río Grande de Jujuy aguas abajo del dique Los Molinos (Tabla N° 1, Figura N° 1), mientras que la Fotografía N° 13 muestra el mismo río en la zona de la estación de aforos San Juancito (Tabla N° 2, Figura N° 1). La Fotografía N° 14 también corresponde al río Grande, aguas abajo, en la zona del puente de la RN 34 (Tabla N° 3, Figura N° 1). Puede observarse la presencia de gravas y rodados.

El río San Francisco corre desde su origen con rumbo nor-noreste hasta la junta homónima donde se une con el río Bermejo.

La Fotografía N° 15 ya corresponde a dicho río, a la altura del puente de la RP N° 1, en las cercanías de la estación de aforos Caimancito (Tabla N° 6), mientras que la Fotografía N° 16, muestra al mismo río en la zona del puente de la Ruta Provincial 5. Se observa la diferencia del paisaje, y la preponderancia de materiales finos.

Finalmente el río Lavayén puede observarse en la Fotografía N° 17, en la zona de la estación de aforos Bajada de Pinto (Tabla N° 4, Figura N° 1), y en la Fotografía N° 18, aguas abajo del sitio anterior, en la zona del puente de la RP 1.

El caudal medio anual aguas abajo de la unión del río Bermejo con el río San Francisco es de 446 m³/s, lo que representa el 2.5 % del módulo del

río Paraná en Corrientes.

De acuerdo a los datos disponibles, puede decirse que la cuenca del San Francisco, aporta el 30 % del caudal líquido, y la del Bermejo, el 70 %. Si se analizan los caudales sólidos en suspensión, los porcentajes pasan a ser 20 % y 80 % respectivamente.

Siempre en base a los aforos referidos, si se discriminan los aportes sólidos de los principales ríos de la cuenca del Bermejo, se encuentra que el 51 % de los sedimentos corresponden al río Iruya, el 18 % al río Grande de Tarija, el 12 % al Bermejo Superior, el 11 % al Blanco o Zenta y el 8 % restante al Pescado. De estos porcentajes surge claramente la importancia del río Iruya como productor de sedimentos: su aporte constituye el 41 % del total de los sólidos suspendidos volcados por el Bermejo al sistema Paraguay - Paraná, lo que significa casi el 30 % del sólido transportado en suspensión por el Paraná en Corrientes.

En cuanto a cantidad de sedimentos producidos, considerando la serie de aforos sólidos en Pozo Sarmiento - Zanja del Tigre y en Caimancito, se obtiene para la primera un transporte en suspensión medio de 70508100 toneladas al año en el río Bermejo (79 %), y para la segunda uno de 18901200 toneladas al año en el río San Francisco (21 %), lo que da un total de 89409300 toneladas al año.

Analizando los registros en Pozo Sarmiento, desde que se computa la fracción fina y gruesa de los sedimentos suspendidos, se observa una altísima variación de las proporciones de ambas fracciones. Para aguas altas (sobre 72 datos), se tiene en promedio un 77 % de finos y un 23 % de gruesos, mientras que para aguas bajas (22 datos), los porcentajes son del 73 % y 27 %, respectivamente. Se observa un aumento del porcentaje de la fracción gruesa con respecto a la fina en aguas bajas, lo que estaría indicando la asociación directa entre la carga de lavado y la alta pluviosidad en la cuenca.

b.3) Modelo de transporte sólido para la Alta Cuenca del río Bermejo.

El modelo de transporte se aplicó a una red compuesta por los ríos Bermejo (desde Estación Balapuca hasta Junta de San Francisco), Grande de Tarija (desde Estación Astilleros hasta Junta de San Antonio), Grande (desde Estación San Juancito hasta la confluencia con el Lavayén), Lavayén (desde Estación Bajada de Pinto hasta la confluencia con el Grande), San Francisco (desde la confluencia Grande - Lavayén hasta Junta de San Francisco).

De acuerdo a la organización del estudio, los ríos correspondientes a la cuenca propia del Bermejo fueron estudiados con el modelo matemático morfológico ALPS-2, desarrollado por el Experto contratado por el PEA, Ing. Máximo Peviani (Peviani, M., 1993), mientras que los ríos de la cuen-

ca del San Francisco se estudiaron con el modelo análogo, ANDES, desarrollado en el LHA del INA especialmente para este proyecto, con el asesoramiento y la supervisión del Experto mencionado.

En primer término se detallan las tareas realizadas en la cuenca del río San Francisco, describiéndose en detalle el Modelo Morfológico correspondiente, mientras que con posterioridad, se presentan los resultados del Modelo Morfológico del Río Bermejo, transcribiéndose el informe del Experto Ing. Peviani (Peviani, M.; 1999). Cabe señalar que todos los datos básicos (de toda la Alta Cuenca) fueron recopilados, analizados y procesados en el LHA, y luego pasados al Experto los correspondientes al río Bermejo. De este modo, el tratamiento de la totalidad de los datos se encuentra detallado a partir del punto siguiente.

b.3) 1. Características del modelo morfológico de transporte en la cuenca del Río San Francisco (modelo ANDES).

El fenómeno de erosión del suelo en zonas de montaña puede presentarse de diferentes formas según se trate de movimientos volumétricos, superficiales, o lineales dentro del curso de agua. Los deslizamientos de laderas y las coladas de detritos pertenecen al primer grupo, los movimientos de las capas superficiales de terreno al segundo, y la erosión, transporte y deposición dentro del curso de agua al tercero. En el primer caso, la fuerza de la gravedad actúa sobre los granos en forma directa, mientras que en el tercero los sedimentos son transportados por la acción del flujo, en forma de arrastre en el lecho en una capa de cierto espesor, en suspensión formando parte de la corriente, y como carga de lavado. Esta última se diferencia de la carga en suspensión en que el tamaño de sus partículas es extremadamente fino y no se encuentra dentro de los elementos presentes en el lecho, razón por lo que se considera que no interactúa con el fondo, haciéndose irrelevante en el cálculo de la erosión o deposición en este tipo de ríos (Busquets M., 1997).

El estudio de la evolución de un río en un largo período de tiempo (p.ej., decenas de años), permite explicar las características morfológicas que se observan en la naturaleza (p.ej., cambios en los perfiles longitudinales y distribuciones granulométricas), a la vez que sirve como base, como condiciones iniciales y de borde, para el estudio de eventos de corta duración, tales como procesos de crecidas extremas, grandes lluvias y deslizamientos masivos.

Para el análisis de cambios morfológicos en un río en largos períodos de tiempo, es comúnmente aceptado considerar un ingreso anual equivalente de agua y sedimentos dentro del sistema, asumiéndolo constante a lo largo del año. En realidad, estos ingresos distan de ser constantes, presentando al menos, dos grandes variaciones: los cambios estacionales (intra anuales) y los ciclos hidrológicos (plurianuales). Asimismo, los cambios morfológicos debidos a eventos extremos, caracterizados por grandes lluvias, como también, grandes incorporaciones de sedimentos alimentando el curso de agua, pueden permanecer durante un gran período de tiempo. A su vez, la capacidad de transporte de sedimentos del río no es una función lineal de los caudales líquidos ni de los tamaños de los granos del sedimento, significando que el sistema reacciona en forma diferente dependiendo de la intensidad de las fluctuaciones hidrológicas y sedimentológicas (Peviani M., 1993).

Entre las principales características de los ríos de montaña, se pueden señalar, los típicos hidrogramas empinados debido a los grandes picos de caudales, y las fuertes variaciones en cantidad y clase de sedimentos ingresantes. Los ríos de montaña poseen un lecho en donde las partículas alcanzan los tamaños gruesos, del orden de las decenas de centímetros, con pendientes longitudinales empinadas, alternando entre modelos de rápidas y hoyas. En planta son casi rectos, con pocas curvas, las cuales están siempre relacionadas con las características geológicas del valle. En el pie de monte, las pendientes son más suaves, con características típicamente anastomosadas. El cauce divaga en forma entrelazada dentro del valle y este último, participa de los escurrimientos de crecida, desarrollándose picos de velocidad con altas concentraciones de sedimentos en suspensión.

MODELO TEÓRICO.

El presente trabajo describe un modelo numérico simplificado en gran escala de tiempo, para representar la evolución morfológica de ríos de montaña.

Las siguientes hipótesis son tenidas en cuenta para poder aplicar el conjunto de ecuaciones diferenciales que describe el fenómeno físico (Di Silvio, G.; Peviani, M.; 1991):

† la celeridad de las ondas de crecida en ríos de montaña es mucho mayor que la de los cambios del lecho. Esto conduce a asumir la adaptación instantánea a las modificaciones en el caudal en cada brazo del sistema de drenaje (escurrimiento cuasi-permanente).

† el modelo de escurrimiento en ríos de montaña es una secuencia de regímenes supercrítico y subcrítico, pasando por la condición crítica y un resalto hidráulico respectivamente, con un número de

Froude muy cercano a la unidad. La pérdida de energía local en un resalto hidráulico débil, así como también la variación de la energía cinética, son despreciables comparando con la pérdida por fricción del escurrimiento en sí mismo. Tomando una extensión relativamente uniforme del río en la cual muchas de estas secuencias ocurren, se puede asumir que el régimen promedio está aceptablemente bien representado por un escurrimiento cuasi-uniforme.

† se asume que la ecuación de movimiento para cada fracción en la que se divide la curva granulométrica del sedimento, tanto como transporte de fondo como en suspensión, está completamente gobernada por los parámetros medios locales, tales como el caudal, la pendiente de fondo, el ancho del canal, el tamaño del grano, etc. Esto significa adaptación instantánea en el perfil vertical de concentración.

Como consecuencia de las simplificaciones previas, el conjunto de ecuaciones utilizadas se resuelve tal como se expresa en los párrafos siguientes.

Para la continuidad de la fase sólida se ha implementado un modelo en dos estratos (Di Silvio, G.; Peviani, M.; 1989). Si bien los sedimentos se mueven continuamente de una capa a la otra, su comportamiento en cada capa es marcadamente diferente.

Se define una capa superior de transporte total, en la que se desarrolla el transporte en suspensión y el de fondo, donde prevalece el movimiento longitudinal, debido a la velocidad del escurrimiento en la dirección de la corriente, sobre el vertical, dado por las fluctuaciones de la turbulencia y por la velocidad de caída de las partículas.

Debajo del anterior, se define un estrato activo, o de mezcla, de espesor δ y composición granulométrica β_i , donde la partícula no está en movimiento horizontal sino que está sujeta a movimiento vertical, desde y hacia el estrato de transporte total (Figura N° 76 a).

El sistema de ecuaciones diferenciales de la fracción granulométrica i -ésima está compuesto por:

a) Ecuación de continuidad del sedimento en el estrato de transporte:

$$BD_i + T_{i,x} = 0 \quad [1]$$

Expresa el balance entre el transporte T_i (m^3/s) y la deposición neta D_i (flujo neto vertical de la clase granulométrica i -ésima, expresado en $m^3/(s.m)$), siendo B el ancho del río (m). $T_{i,x}$ es la variación del transporte total de la clase i -ésima respecto de la distancia x (derivada parcial respecto de x) dado por la ecuación:

$$T_i = \alpha \frac{I^n Q^m}{B^p d_i^q} \beta_i r_i \quad [2]$$

con

$$r_i = \left(\frac{d_i}{\sum \beta_i d_i} \right)^s$$

donde r_i es el coeficiente de corrección que tiene en cuenta el efecto de exposición y ocultamiento para el caso de material no uniforme, debido a que en una mezcla, las partículas más finas/gruesas poseen menor/mayor movilidad que en el caso de material uniforme. Se produce un fenómeno de acorazamiento en el que las partículas más gruesas esconden a las más finas en sus espacios, mientras que las partículas más finas participan disminuyendo la fricción del fondo y las partículas mayores pueden trasladarse con menor resistencia. Q es el caudal líquido (m^3/s), B es el ancho del cauce e , I es la pendiente longitudinal, d_i es el tamaño representativo de cada fracción granulométrica y β_i el porcentaje respectivo. El coeficiente α , y los exponentes m , n , p , q y s son evaluados empíricamente.

b) Ecuación del balance vertical de sedimento en el estrato de mezcla:

$$\beta_i^* z_x + (\delta \beta_i)_x - D_i = 0 \quad [3]$$

Representa el intercambio vertical de sedimento y conduce al cálculo de los cambios en la composición de la zona de mezcla. z es la cota del fondo con composición granulométrica no modificada, δ es el espesor de la capa de mezcla y se considera igual a $2d_{90}$ (doble del diámetro representativo de las partículas gruesas). A su vez,

$$z_x + \delta_x - \sum D_i = 0$$

y Z es la cota de fondo ($z + \delta$), cuya variación está dada por:

$$Z_x = \sum D_i \quad [4]$$

La ecuación anterior determina la continuidad del cambio vertical del sedimento y su resolución permite definir la composición granulométrica del estrato de mezcla. $\beta_i^* = \beta_{i0}$ (composición granulométrica del material no perturbado debajo de la capa de mezcla), si $\sum D_i < 0$ (erosión). Mientras que $\beta_i^* = \beta_i$ (composición del estrato de mezcla), si $\sum D_i > 0$ (depósito).

En el modelo, si bien se calcula la variación en el tiempo del espesor del estrato de mezcla, en el caso de aplicación (ríos Grande de Jujuy, Lavayén y San Francisco), se ha adoptado la constancia del mismo ($\delta_x = 0$), debido a que como los datos granulométricos fueron escasos, no aportaba certeza representar en forma más precisa esta mo-

dificación. Al mismo tiempo, al disminuir la cantidad de parámetros variables, se limitan las perturbaciones que se traducen en inestabilidades numéricas.

La ecuación para el escurrimiento es de acuerdo a Strickler:

$$Z_x = \left(\frac{U}{24 \frac{d_{90}^{1/6} R^{2/3}}{}} \right)^2 = I \quad [5]$$

donde Z_x es la variación en el espacio de la cota de fondo, U es la velocidad media del escurrimiento, d_{90} es el diámetro que corresponde al 90 % en peso de la curva granulométrica acumulada (o sea, el tamaño representativo de las mayores partículas), I la pendiente del tramo del río y R el radio hidráulico (relación entre el área mojada y el perímetro mojado).

c) Ecuación de celeridad:

El análisis anterior del conjunto de ecuaciones diferenciales parciales conduce a las expresiones de celeridades características c_i y c , para una modificación de las variables β_i y Z respectivamente.

- Para la variable β_i :

$$c_i = \frac{a_i r_i - s a_i \beta_i \left(\sum \beta_i d_i \right)^{s+1}}{\delta B} \quad [6]$$

con

$$a_i = \alpha \frac{I^n Q^m}{B^p d_i^q}$$

- Para la variable Z :

$$c_i = \sum \frac{a_i r_i - s a_i \beta_i \left(\sum \beta_i d_i \right)^{s+1} \left(\sum D_i - \beta_i \right)}{\delta B} \quad [7]$$

En un modelo como el planteado, la elección del paso de tiempo debe realizarse en base al número de Courant para encontrar la estabilidad y convergencia del sistema. De este modo:

$$\Delta t = \sigma \frac{\Delta x}{c_{\max}}$$

donde Δt es el paso de tiempo, Δx es el paso espacial, $c_{\max}$ es el mayor valor de la celeridad calculada y σ es el número de Courant, el cual debe ser mayor que 0 y menor o igual a 1.

Estas ecuaciones resultan ser relativamente sencillas debido a que dentro de las hipótesis se supuso un escurrimiento cuasi - uniforme.

Modelo numérico.

El conjunto de ecuaciones de continuidad de sedimentos ha sido resuelto numéricamente usando el método aproximado en diferencias finitas con esquema de predicción y corrección. En la fase de predicción se ha utilizado el esquema de avance en el tiempo y en el espacio (F.T.F.S.) y para la corrección, el esquema de cuatro puntos (Figura N° 76 b). Las ecuaciones de continuidad en el estrato de transporte y en el estrato de mezcla han sido resueltas mediante las siguientes ecuaciones en diferencias finitas para cada fracción granulométrica:

a) Predicción (F.T.F.S.):

$$D_{ij}^k = \frac{T_{ij-1}^n - T_{ij}^n}{B_j \Delta x} \quad Z_j^k = Z_j^n + \Delta t \sum_{i=1}^k D_{ij}^k \quad \beta_{ij}^k = \beta_{ij}^n + \frac{\Delta t}{\delta} \left[D_{ij}^k - \beta_{ij}^* \sum_{i=1}^k D_{ij}^k \right]$$

b) Corrección (cuatro puntos):

$$D_{ij}^{n+1} = \frac{[(1-\theta)(T_{ij}^n - T_{ij}^n) + \theta(T_{ij}^s - T_{ij}^s)]}{B_j \Delta x}$$

$$Z_j^{n+1} = Z_j^n + \Delta t \sum_{i=1}^k D_{ij}^{n+1}$$

$$\beta_{ij}^{n+1} = \beta_{ij}^n + \frac{\Delta t}{\delta} \left[D_{ij}^{n+1} - \beta_{ij}^* \sum_{i=1}^k D_{ij}^{n+1} \right]$$

Secuencia de cálculo.

La secuencia de cálculo resulta la siguiente:

1). La ecuación de transporte de sedimento [2] es aplicada en cada punto de la grilla en el nivel n de tiempo, en el cual la geometría del río y los datos del sedimento son conocidos.

2). Los valores D_i^s y β_i^s son calculados en cada punto de la grilla usando la ecuación de continuidad para el sedimento [1] con el esquema predictor y la ecuación de balance vertical [3]. Luego el transporte de sedimento (T_i^s) se calcula nuevamente en cada punto en función del valor β_i hallado.

3). Aplicando nuevamente la ecuación [1] con el esquema corrector, se calcula el valor D_i^{n+1} y con la ecuación [3] se calcula en cada punto el valor β_i^{n+1} .

4). El transporte de sedimentos en el nivel $n+1$ de tiempo es calculado ahora, como una función de β_i^{n+1} .

5). Al final, el nuevo nivel del fondo (Z) es calculado a partir de la ecuación [4] con el valor D_i^{n+1} .

6). El nivel de agua se calcula con la expresión [5].

Verificación del modelo matemático ANDES con resultados de modelo físico.

Se ha verificado el funcionamiento del modelo matemático ANDES con los resultados de un modelo físico realizado en el LHA, con motivo de los estudios de erosión en el cauce del río Medina, aguas abajo del Dique Villa Lola (pcia. de Tucumán, Argentina). El trabajo se basa en el modelo físico a fondo móvil en escala 1:25, cuyo objetivo fue analizar la erosión que sufre el cauce, para evaluar la protección a colocar en el lecho, en correspondencia con la traza de un mineroducto (Loschacoff, C.; Brea, J.D.; 1999). A continuación se presenta una breve descripción del trabajo, y los resultados logrados con el modelo matemático.

La granulometría de los sedimentos en el lecho del río Medina y en el modelo físico se presentan en el cuadro siguiente: (ver cuadro en pie de página)

En el modelo matemático se representó un tramo del río de 250 m. de largo, con un ancho de 62.42 m., y el caudal de crecida de 375 m³/s. La pendiente original del río es de 0.02, que junto con las granulometrías especificadas, evidencian un comportamiento netamente montañoso. Se ha evaluado la configuración del lecho y la pendiente longitudinal, entre otros parámetros, en el instante inicial y su modificación a lo largo del tiempo, en un período total de 72 hs. Para las condiciones de ensayo del modelo físico, sin aporte sólido en la cabecera, se determinó que la pendiente tiende a suavizarse, reduciéndose del valor original de 0.02, al valor de 0.0052, al cabo del primer día, en donde se distingue la variación más rápida, y llegando a ser de 0.0024 al cabo de 72 horas, período en el que se produce la pendiente cercana al equilibrio. El ensayo en el modelo físico fue de alrededor de 5 horas, tiempo que corresponde a aproximadamente 1 día en el prototipo, y donde se ha llegado al mismo valor de la pendiente que la encontrada en el modelo matemático para igual tiempo.

A su vez, se estudió la variación de la composición granulométrica en cada una de las secciones, comparándolas con la muestra tomada en los 2 cm. superiores del lecho en el modelo físico y que corresponde con el espesor de la capa de mezcla (igual a 2*d₉₀) una vez que se realizó el ensayo con el caudal correspondiente. Como resultado del paso de la crecida, la composición granulométrica sufre un acorazamiento, fenómeno que se produce en los lechos con granulometría extendida, coincidiendo una vez más los resultados del modelo físico con los del modelo matemático (Figura N° 77).

i. Implementación del modelo morfológico del sistema Grande - Lavayén - San Francisco.

Esta tarea implica la preparación de datos básicos, la selección de las secciones de verificación (si las hubiera), y la definición de las condiciones de borde e iniciales de cálculo, en base a todo lo cual puede lograrse la implementación del modelo.

Es oportuno resaltar en este punto la marcada ausencia de datos básicos apropiados en los ríos

diámetro sedimentos en el río (m.). d ₉₀ = 0.25 m.	Diámetro modelo (m.)	porcentaje %
0.019375	0.000775	1
0.027250	0.001090	3
0.038500	0.001540	11
0.054500	0.002180	17
0.077125	0.003090	21
0.109125	0.004370	9
0.217750	0.008710	38

de la red a modelar, a pesar de que justamente se seleccionaron los cursos más importantes y con más registros disponibles. En efecto, en los puntos siguientes se analizarán los problemas encontrados en relación a este tema. Los datos disponibles fueron mínimos, muchas veces insuficientes para tener resultados cuantitativos confiables a partir de la modelación. Dentro de los alcances del proyecto se relevaron algunos datos básicos indispensables para la implementación del modelo (granulometrías del lecho, secciones transversales). Tampoco se contó con un buen número de estaciones hidrométricas en la red que permitiera la calibración del modelo, tal como existen sobre el Bermejo superior.

Por lo tanto, tal como se desarrolla en los puntos siguientes, el modelo implementado permite explicar el funcionamiento morfológico del sistema Grande - Lavayén - San Francisco desde un punto de vista cualitativo. Del mismo modo, permite evaluar las posibles consecuencias de políticas de manejo de las subcuencas de análisis que afecten, por ejemplo, la carga sólida aportada al sistema. Lo realizado permite cumplir con los objetivos del proyecto, a la escala de análisis fijada.

Para lograr resultados cuantitativos confiables, la misma herramienta de cálculo debe ser alimentada con mayor cantidad de datos, y de buena calidad. En algunos casos esto no se consigue en cortos periodos de tiempo, ya que una de las falencias es la de registros de niveles líquidos, caudales líquidos y sólidos en estaciones de la red, a nivel diario, y en un periodo de medición lo suficientemente largo como para tener valores representativos.

No obstante, el modelo desarrollado constituye un paso adelante en el conocimiento del sistema, tal como lo fue el mapa de producción de sedimentos y de zonas susceptibles de fenómenos de remoción en masa (Brea, J.D.; Spalletti, P.D.; Spalletti, L.; Rafaelli, S., 1999), los que servirán de base a trabajos y desarrollos futuros más específicos en la cuenca.

1. Análisis de los datos.

La implementación del modelo descrito anteriormente requiere la definición de condiciones de borde e iniciales. Para la correcta aplicación del mismo, es necesario conocer los datos geométricos de la sección transversal del río en cada punto de la grilla adoptada, los caudales ingresantes, ya sean líquidos y sólidos, como así también, la composición granulométrica del lecho en todos los puntos de la red.

Un modelo de gran escala de tiempo se utiliza para determinar los parámetros geométricos del cauce (como cota del lecho, variación del ancho, etc.) y la composición granulométrica del mismo en todos los cursos de la red, bajo condiciones ordinarias de escurrimiento.

A continuación se analiza cada uno de los datos básicos considerados.

1.1. Caudales líquidos.

A partir de los datos disponibles de caudales líquidos, se calculó el caudal formativo o modelador del cauce, que resulta igual al que escurriendo en forma constante, transporta la misma cantidad de sedimentos que el hidrograma anual.

Tal como se expresara con anterioridad, las estaciones sobre los ríos Grande (San Juancito) y Lavayén (Bajada de Pinto), dejaron hace tiempo de ser operadas por Agua y Energía, pasando a depender de organismos provinciales. De acuerdo a la información recopilada, los datos de caudales líquidos medidos en la actualidad corresponden a aguas bajas, siendo de poca importancia para el estudio que nos ocupa. Además están volcados en planillas de campo, lo que, sumado a lo anterior, motivó la imposibilidad de su elaboración.

En efecto, la estación de medición San Juancito es la única sobre el río Grande, y cuenta con el registro de caudales líquidos medios mensuales (Agua y Energía Eléctrica, 1991), desde el mes de septiembre de 1967 hasta el mes de mayo de 1981 (Tabla N° 19). Para las corridas del modelo mismo se calculó un caudal líquido representativo sólo del período disponible. Para ello, en base a los caudales medios mensuales, se elaboró una curva de duración anual para cada año y a partir de ésta, la curva de duración anual característica de caudales medios mensuales (Figura N° 78), de acuerdo a la metodología ya explicada.

Del mismo modo, para la estación Bajada de Pinto, única sobre el río Lavayén (Agua y Energía Eléctrica, 1991), se encuentran los valores de caudales medios mensuales, pero desde el mes de septiembre de 1942, hasta el mes de agosto de 1980 (Tabla N° 20). Siendo que en la estación San Juancito el período de registro es menor, se hace inevitable la consideración sólo del período en común. Con estos datos se elaboró la curva de duración anual característica de caudales líquidos medios mensuales para la estación Bajada de Pinto (Figura N° 79).

En el río San Francisco, sólo se encuentra la estación de Caimancito. En esta sección se dispone de aforos líquidos diarios y lecturas de escala desde 1964 hasta 1998 y, a su vez, caudales medios diarios desde 1947 hasta 1995. También se encuentran disponibles (Agua y Energía Eléctrica, 1991), los datos

correspondientes a los valores medios mensuales desde 1946 hasta 1990 (Tabla N° 21). En esta sección se ha realizado el mismo tratamiento de la información que en las secciones anteriormente citadas, de modo de poder comparar en forma consistente el mismo tipo de datos, considerando sólo los caudales medios mensuales. Por lo tanto, para el mismo período que para las estaciones San Juancito y Bajada de Pinto, se ha elaborado la curva de duración anual característica de caudales medios mensuales (Figura N° 80). En el punto b.2) iii. se han tratado los datos diarios de la estación, de modo de obtener la curva de duración a partir de dichos datos, al igual que para las estaciones del Bermejo superior analizadas.

Al analizar los caudales líquidos con las curvas de duración anual característica de caudales líquidos medios mensuales, en las diferentes estaciones, se observa que los caudales medios de Caimancito son superiores a la suma de los caudales medios de San Juancito y Bajada de Pinto, por lo que se determina que los ríos intermedios afluentes del San Francisco incorporan caudales líquidos importantes. Entre ellos, se pueden mencionar, al río Negro, río Ledesma y río San Lorenzo (Plano N° 1).

1.2. Caudales sólidos y granulometrías.

Para las mismas secciones, San Juancito sobre el río Grande, Bajada de Pinto sobre el río Lavayén y Caimancito sobre el río San Francisco, se encuentran datos de material sólido en suspensión que han pasado por las secciones respectivas en cada mes (Agua y Energía Eléctrica, 1991). Pero como en el caso de los caudales líquidos, la información corresponde a distintos períodos de mediciones, ya que las estaciones no han operado en forma continuada ni durante los mismos años (Tablas N° 22, 23 y 24).

Se ha recopilado de la misma referencia, un dato puntual de la granulometría del sedimento en suspensión, en las correspondientes secciones (Figuras N° 81, 82 y 83).

Como se señalara anteriormente, en el marco del PEA, el LHA del INA realizó muestras fotográficas del lecho en la sección Los Molinos, ubicada en el río Grande, y aguas arriba de San Juancito (Fotografías N° 1 y 2 - Anexo II) y, en la sección El Piquete, en el río Lavayén (Fotografía N° 3 - Anexo II). Los resultados de los análisis granulométricos correspondientes se presentan en el Anexo II. La evaluación de la granulometría por métodos fotográficos permite una valoración de los tamaños mayores a 8 mm., por lo que fue necesario la estimación de un porcentaje de partículas menores. A su vez, se han realizado muestras granulométricas de margen en Caimancito y en la zona cercana a Pichanal, que corresponderían con las secciones 34 y 52 del modelo, respectivamente, ambas sobre el río San Francisco. Con el análisis granulométrico se ha elaborado para cada sección, la curva granulométrica acumulada. Por otra parte, se observa que los tamaños máximos de las partículas en la zona de San Juancito, como así también en El Piquete, son muy superiores a los encontrados en la región central y hacia aguas abajo del río San Francisco, por lo que fue necesario para la aplicación del modelo, la estimación de curvas granulométricas intermedias para las secciones comprendidas entre ellas, e incluso, para los ríos tributarios (Figura N° 84).

A partir de las curvas granulométricas y debido a la gran diferencia existente entre los diámetros del sedimento de distintos tramos de los ríos, se han considerado ocho tamaños de partículas a ser incorporados en el modelo, con la correspondiente composición porcentual (ver cuadro en pie de página):

1.3. Secciones transversales.

Como se expresara en el punto b.1) i., entre las secciones que relevó la Dirección Provincial de Recursos Hídricos de Jujuy por encargo del PEA, se encuentran las de San Juancito y San Pedro en el río Grande, Bajada de Pinto y El Piquete en el río Lavayén y, Caimancito en el río San Francisco, las

secciones tamaño (m)	San Juancito río Grande (de secc. 1 a 12)	El Piquete río Lavayén (de secc. 1 a 14)	Caimancito río San Francisco (de secc. 24 a 44)	Pichanal Río San Francisco (de secc. 45 a 55)
0.11	45%	—	—	—
0.07	30%	45%	—	—
0.03	12%	18%	—	—
0.01	3%	2%	—	—
0.0045	5%	15%	—	—
0.0010	5%	10%	3%	—
0.00033	—	10%	82%	78%
0.00015	—	—	15%	22%

secciones tamaño (m)	río San Francisco (de secc. 13 a 18)	río San Francisco (de secc. 19 a 23)	río Negro (tributario en secc. 19)	Ríos Ledesma y San Lorenzo (tributarios en secc. 25 y 29)
0.11	—	—	—	—
0.07	—	—	—	—
0.03	—	—	—	—
0.01	45%	—	—	—
0.0045	35%	—	—	—
0.0010	13%	50%	3%	—
0.00033	7%	35%	82%	78%
0.00015	—	15%	15%	22%

cuales se han corregido según las cotas correspondientes (Tabla N° 15) y tomadas en la extensión de interés para el modelo (Figuras N° 85, 86 y 87). En los casi 220 km. de río a modelar (Grande y San Francisco), sólo se contó con estas secciones, por lo que fue necesario mediante algún medio determinar la configuración de las secciones intermedias a lo largo de los ríos estudiados. A tal fin, se han utilizado las imágenes satelitales correspondientes a estos tramos, con el fin de evaluar el ancho del valle y del río en cada tramo (Tabla N° 25).

En virtud de la incertidumbre en la determinación de la geometría de las secciones transversales antes citada, sólo se han considerado variaciones medias de las mismas en los distintos tramos, teniendo en cuenta la configuración en planta de los ríos, las cartas topográficas y los relevamientos puntuales efectuados. Así, en el río Grande, desde la sección 1 (San Juancito) hasta la sección 6, se ha considerado una sección semejante a la primera. La sección 7 coincide con la batimetría realizada en las proximidades de la localidad de San Pedro, y a partir de allí, entre las secciones 8 y 10, se han ampliado los cauces, teniendo en cuenta la forma anastomosada que toma el curso, o sea que su cauce central se encuentra diversificado. Las secciones 11 y 12, próximas a la confluencia con el río Lavayén, en las que se forman dos canales, se han reducido en ancho, en comparación con las anteriores (Planos N° 3 y 4).

En el río San Francisco se han realizado modificaciones tendientes a compatibilizar las secciones originales con la observación de las imágenes satelitales. Asimismo, sólo se modificaron en forma media, y por tramos. Entre las secciones 13 a 32, se ha mantenido la misma forma y sección, entre las secciones 33 y 39, se ha respetado la forma y el ancho de la sección Caimancito (34), y a partir de allí, y hacia la desembocadura en el río Bermejo, se ha dividido por tramos, considerando anchos medios.

En el río Lavayén, se ha considerado entre las secciones 1 y 7, secciones iguales a la de Bajada de Pinto (1), y desde la 11 (El Piquete) hasta la 14 (anterior a la confluencia con el río Grande), secciones similares a El Piquete (11). Entre las secciones 8 y 10 se han empleado secciones interpoladas.

Lo detallado anteriormente, resulta de haber realizado ensayos de prueba y calibración, hasta lograr las correspondientes secciones adoptadas. Esta tarea consistió en determinar, a partir de las secciones levantadas, una configuración de los cursos de agua que diera como resultado de la modelación, un comportamiento similar al observado en los ríos en la realidad.

Los cursos modelados quedaron representados por secciones transversales con equidistancia 4,000 m.. De este modo el río Grande, desde la sección inicial correspondiente a la estación San Juancito, presenta 12 secciones hasta la confluencia con el río Lavayén. Este último río resultó modelado desde la sección de la estación Bajada de Pinto, con un total de 14 secciones. Finalmente, el río San Francisco parte en la sección 13, llegando a la desembocadura en el río Bermejo, donde se encuentra la sección 55 (Plano N° 3). En el punto b.3) iii., al describir las corridas de producción, se dan más detalles sobre la implementación del modelo.

ii. Calibración y validación del modelo, en base a los datos analizados.

De acuerdo a lo expresado en los puntos anteriores, la calibración del modelo se encaró en función de los escasos datos básicos disponibles.

La ecuación [2] presentada anteriormente debe ser calibrada en función del transporte sólido del río. Expresa el transporte total, en m³/s, del material del fondo (QBT).

Los datos granulométricos recopilados disponibles (Figuras N° 81, 82 y 83) muestran que el transporte sólido total en suspensión presenta un alto porcentaje de partículas de tamaño menor a 62 micrones. Si esto se compara con los análisis granulométricos de las muestras del lecho, se concluye que la fracción fina de la carga total suspendida (limos y arcillas) no se encuentra significativamente en el

lecho, considerándose de este modo que constituye la carga de lavado del río en el tramo estudiado. En virtud de lo expresado, se consideraron los registros de caudal sólido total en suspensión disponibles, compuestos por un lado, por la carga de lavado (limos y arcillas), y por el otro, por la carga de fondo en suspensión (arenas) (QsG). Esta última es la que interactúa con el lecho del río, participando de los procesos de erosión/deposición, tal como se explicara en puntos anteriores.

Resumiendo, el transporte total de material del fondo (QBT) se divide en transporte en suspensión dentro de la corriente líquida (QBs) y en transporte de arrastre en una capa del fondo (QB). Como se explicara en el párrafo anterior, de acuerdo a la definición de la carga de lavado adoptada, resulta en este caso QsG igual a QBs. Esto implica que a QsG (= QBs), que surge de los aforos sólidos en suspensión considerando la fracción gruesa, se le debe agregar el QB, para llegar a obtener el transporte total QBT.

Resulta útil en el nivel alcanzado, realizar una nota aclaratoria de la nomenclatura utilizada. A tal fin se presenta un breve resumen:

Ql: caudal líquido (m³/s),

Qs: transporte sólido (kg/s) ó (m³/s),

QsT: sólidos totales aforados en suspensión (finos + gruesos, arcillas y limos más arenas),

QBT: transporte total del material presente en el fondo,

QBs: transporte en suspensión del material presente en el fondo (*),

QsG: transporte en suspensión de material grueso, mayor a 62 μ m. (arenas) (*),

QB: transporte del material de fondo en la capa de arrastre,

QsF: transporte en suspensión de material fino (arcillas y limos - carga de lavado).

Nota (*): En base a los estudios realizados, y teniendo en cuenta lo explicado sobre la carga de lavado (QsF), resulta que QsG = QBs.

En ausencia de datos básicos específicos, el valor de QB se ha calculado a partir de la expresión de Meyer - Peter y Müller (Vanoni, V., 1975), aplicada a cada estación (Figuras N° 88, 89 y 90). En la Figura N° 88 se presenta para la estación San Juancito la comparación entre las relaciones del Ql con los siguientes caudales sólidos: QBs, QB, QBT. De este modo, el transporte total QBT considerado resultó la suma del transporte en suspensión QBs, medido, más el transporte calculado en el fondo QB. Las Figuras N° 89 y 90 son análogas a la descripta, pero para las estaciones Bajada de Pinto y Caimancito, respectivamente.

Con estos valores de QBT, se ha calibrado la ecuación de Di Silvio y Peviani, utilizada en el modelo ANDES, siendo los coeficientes respectivos los siguientes:

Sección	San Juancito	Bajada de Pinto	Caimancito
Coefficiente			
α	0.09	0.09	0.09
s	0.4	0.2	0.4
m	1.8	1.8	1.8
n	2.1	2.1	2.1
p	0.8	0.8	0.8
q	1.2	1.2	1.2

Para una rápida aplicación de las expresiones, se ha evaluado una aproximación a la ecuación [2] de transporte sólido total (QBT), que surge de una regresión potencial, tal como se aprecia en las tres figuras precitadas. En base a la curva de duración anual característica de caudales medios mensuales, y con la relación establecida entre caudales líquidos y caudales sólidos totales, se ha confeccionado para cada estación, la curva de duración anual característica de sólidos totales transportados (Figuras N° 91, 92 y 93).

De los datos disponibles en la estación San Juancito (Agua y Energía Eléctrica, 1991), el transporte sólido total en suspensión promedio anual, resulta cercano a 4500000 tn. Considerando, a partir de la granulometría del sedimento en suspensión recopilada, que alrededor del 12 % del material es grueso, se tiene que el transporte en suspensión grueso promedio anual es del orden de los 540000 tn. Si desde la curva de duración anual característica de transporte sólido medio mensual, se calcula el transporte sólido total anual, se obtiene un valor de QBT de 830000 tn/año.

Realizando el mismo análisis para la estación Bajada de Pinto se llega a que el transporte sólido de gruesos en suspensión para un año promedio es de 250000 tn (12 % del total, de acuerdo a la granulometría). El cálculo del transporte por arrastre en la capa del fondo (QB) resultó ser variable con respecto a los valores de transporte sólido grueso en suspensión (QBs) medido. En términos generales, para bajos caudales líquidos el QB es mayor a QBs e inversamente, para caudales líquidos grandes, QB resulta inferior a QBs (Figura N° 89). Sumando los valores correspondientes para obtener el transporte sólido total de material de fondo (QBT = QBs + QB), y realizando la integración sobre la curva de duración anual característica de caudales líquidos, se llega a un valor de 150000 tn/año.

En la estación de aforos Caimancito se obtiene que, el transporte sólido de gruesos en suspensión para un año promedio resulta de alrededor de 2500000 tn (15 % según el dato puntual de granulometría). El cálculo del transporte por arrastre en la capa del fondo (QB) resultó ser tam-

bién variable, como en las secciones anteriores, y con valores que fluctúan entre 0.5 y 1.5 del valor del grueso suspendido (QsG) según los caudales líquidos (Figura N° 90), por lo que, realizando la suma e integrando en la curva de duración anual característica correspondiente, el valor de QBT varía entre 3750000 tn y 6250000 tn/año.

Si realizamos la evaluación del transporte total entre las secciones de San Juancito junto con Bajada de Pinto, llegamos a un valor total que supera el 1000000 tn. al año. Al comparar con la estación Caimancito, cuyo valor es superior, se puede apreciar que la diferencia proviene de los demás ríos de la cuenca, como así también de erosiones que se producen en los tramos intermedios.

Como ya se expresara, en la sección Caimancito, debido a la mayor disponibilidad de datos, se ha elaborado la curva de duración anual característica de caudales líquidos medios diarios (Figura N° 94). En esta sección, existen aforos sólidos en suspensión para el período 1985-1998. A partir del año 1993, las mediciones se realizan discriminando la fracción fina de la gruesa. Con estos datos, se ha analizado el porcentaje de cada fracción respecto del total del sedimento en suspensión, en función de los caudales líquidos (Figura N° 95). Recordando que, como las muestras de material del lecho no evidencian la existencia de partículas inferiores a 62 μ m en cantidad importante, se ha establecido que el transporte del material de tamaño inferior constituye la carga de lavado. Por lo tanto, se ha estimado la tendencia entre las distintas fracciones. Con finalidad sólo comparativa se ha elaborado un gráfico que muestra los sólidos gruesos aforados en suspensión, el 30 % de los sólidos suspendidos totales (fino y grueso), y los gruesos según la curva de tendencia calculada anteriormente (Figura N° 96). El valor del 30 % asignado a la fracción gruesa surge de una media de los aforos sólidos, mientras que el 15 % asignado a la misma fracción en el párrafo preanterior, surge de la curva granulométrica del sólido suspendido. Se considerará en lo sucesivo este último porcentaje por ser además el que aparece como valor medio de aguas altas (Figura N° 96).

Hasta aquí se han analizado los datos para las estaciones de los ríos del sistema Grande - Lavayén - San Francisco. Se presentan a continuación los análisis realizados en las estaciones de la alta cuenca del río Bermejo, y que fueron utilizados para la implementación y uso del modelo morfológico del río Bermejo ALPS-2 (Peviani, M., 1999).

Tal como se detallara en puntos antecedentes, las estaciones analizadas fueron: sobre el río Bermejo, aguas arriba de la junta de San Antonio, Balapuca, Arrazayal y Aguas Blancas; en el río Grande de Tarija, Astilleros y San Telmo; en el río Pescado, Cuatro Cedros - Puesto Romero, y en el río Bermejo, aguas arriba de la junta de San Francisco, Pozo Sarmiento (Plano N° 2).

En la sección de Balapuca, donde se cuenta con aforos de material en suspensión, con discriminación de fracción fina y gruesa a partir del año 1993, se han analizado los porcentajes correspondientes respecto del total del material en suspensión, en función del caudal líquido, evaluándose a su vez, la concentración total (Figura N° 97). En esta estación, se encuentran disponibles los caudales líquidos desde 1978. Para estos valores, se han elaborado las curvas de duración anual de caudales líquidos medios diarios para cada año, y a partir de éstas, la curva de duración anual característica de caudales medios diarios (Figura N° 98). Se consideró un porcentaje representativo de la fracción gruesa del material en suspensión, y se ha comparado con los gruesos aforados. Se establecieron curvas de tendencia para cada conjunto de datos, siendo las mismas, regresiones de tipo potencial (Figura N° 99a). Como primera calibración de la ecuación [2] de Di Silvio y Peviani, se empleó una granulometría de material del lecho correspondiente a esta sección que se encuentra citada anteriormente (Figura N° 99b). Como ya se expresara, la ecuación referida calcula el transporte sólido total del material presente en el fondo (QBT), de modo que para poder compararlo con el sólido en suspensión (QBs), se ha tenido en cuenta sólo un porcentaje de aquél.

A partir de la curva de aproximación al 10% de los sólidos totales en suspensión (QsT), se determinó la curva de duración anual característica de transporte sólido en suspensión para el mismo período (Figura N° 100).

En la estación Arrazayal se disponen los aforos sólidos en suspensión para el período 1981 a 1984. Debido a la ausencia de valores discriminados, ha sido estimado un porcentaje de gruesos, y con éstos, evaluar una línea de tendencia (Figura N° 101). Los aforos líquidos se realizaron entre los años 1978 a 1984. A partir de allí, se determinó la curva de duración anual de los líquidos aforados para el período total, y la misma curva para el transporte sólido en suspensión (Figura N° 102).

En la estación Aguas Blancas se dispone del mismo tipo de datos que en la sección Balapuca, por lo que se ha efectuado el mismo análisis, que se presenta en las Figuras N° 103 a 107.

En la estación Cuatro Cedros sobre el río Pescado se ha realizado el mismo estudio, pero no se dispone de granulometrías ni de parámetros geométricos de la sección transversal del río, como ancho y pendiente,

por lo que no se pudo efectuar la calibración preliminar de la ecuación [2] (Figuras N° 108 a 110).

En la estación Astilleros no se encuentran aforos sólidos suspendidos con diferenciación de fracción gruesa y fina. En este caso, se ha considerado que el transporte de sólidos gruesos en suspensión es igual al 20 % del total en suspensión. A partir de esta suposición, se establecieron las demás curvas características (Figuras N° 111 a 113).

En la estación San Telmo se pudo realizar el análisis discriminado de la información, pero tampoco se ha podido calibrar la ecuación [2], debido a la ausencia de datos geométricos de la sección transversal, tal como se indicara para el caso de Cuatro Cedros (Figuras N° 114 a 117).

Por último, para la estación de Pozo Sarmiento se han evaluado los porcentajes de las distintas fracciones del material sólido en suspensión (QsF y QsG) respecto del total suspendido (QsT), hallándose la línea de tendencia de los sólidos gruesos (Figuras N° 118 y 119). Se cuenta con los caudales líquidos medios diarios desde 1978 hasta 1994, con excepción de 1986 y 1987. En base a estos datos, se elaboró la curva de duración anual característica de caudales medios diarios, y conjuntamente con la ecuación de caudal sólido en función del caudal líquido ($Q_s = f(Q_l)$) se determinó la curva de duración anual característica de caudales sólidos en suspensión (Figuras N° 120 y 121).

Volviendo al modelo del sistema Grande - Lavayén - San Francisco, resulta oportuno reiterar la marcada ausencia de datos básicos apropiados en los ríos de la red a modelar. En relación con la calibración del modelo, no se contó con la información necesaria para lograr tal fin, salvo parcialmente en lo referente a la ecuación de transporte, tal como se ha descrito en este punto.

La ausencia de datos hidrométricos en estaciones intermedias, así como la falta de coincidencia tanto en los períodos de los registros disponibles en las estaciones, como en la frecuencia de las mediciones, impidieron una calibración del modelo. Esto hace que el modelo implementado permita explicar el funcionamiento morfológico del sistema estudiado sólo desde un punto de vista cualitativo.

iii. Corridas de producción.

A partir de las curvas de duración anual característica del transporte total de material de fondo (QBT), se ha determinado para cada estación, el transporte total anual (Figuras N° 91, 92 y 93). En base este valor, y con las expresiones de aproximación correspondientes ($QBT = f(Q_l)$), se ha evaluado el caudal líquido formativo. Para cada estación se obtuvo:

En el modelo, la diferencia de caudales líquidos entre los distintos tramos se ha tenido en

Sección	Caudal formativo - Q_l (m ³ /s)
San Juancito	31
Bajada de Pinto	20
Caimancito	117

cuenta considerando los afluentes Negro, Ledesma y San Lorenzo, los tres sobre el río San Francisco. Si bien no se cuenta con datos del aporte líquido y sólido de cada uno de ellos, se ha estimado que el río Negro y el río Ledesma incorporan igual caudal, 15 m³/s cada uno, y el San Lorenzo de 36 m³/s. La diferencia surge de la observación de las cartas temáticas correspondientes de las distintas subcuencas, siendo el arroyo San Lorenzo el que aporta las aguas del río Valle Grande, con una superficie de cuenca mayor. Tampoco en estos casos se contó con información de granulometrías correspondientes a cada uno, por lo que se han estimado las curvas granulométricas respectivas como se ha señalado en puntos precedentes.

En una primera etapa, se han modelado el río Grande y el río Lavayén por separado, mientras que en una segunda etapa se modeló el río Grande junto con el San Francisco, considerando a los ríos Lavayén, Negro, Ledesma y San Lorenzo, como afluentes. Las secciones de ingreso de estos afluentes fueron las N° 13, 19, 25 y 29 respectivamente (Plano N° 3).

Primeramente, se ha modelado el transporte de cada uno de los ríos de acuerdo a su capacidad de transporte, y en la etapa final, se ha considerado el ingreso de material transportado por el río Grande en la sección inicial, reducido en un 30 %.

1. Río Grande.

Tal como ya se expresara, en un primer término no se realizaron series de corridas del modelo que permitieran ajustar el paso de tiempo Δt más apropiado, y además llegar a una configuración de secciones del río semejante a la que surgía del análisis conjunto de los relevamientos de campo, cartas topográficas e imágenes satelitales (Plano N° 3). Se consideraron valores de Δt variables entre 15 minutos y 12 horas.

Una vez determinada la mejor configuración, se realizaron las corridas de producción obteniéndose la variación de la cota del lecho del río Grande, y los demás parámetros de interés (variación del ancho superficial y del tirante, etc), para tiempos de 30 días, 1 año, 5 años y 10 años. Los resultados se presentan en las Figuras N° 122 y 123. El caudal considerado fue constante e igual al formativo del río calculado en puntos anteriores.

Se puede observar, en forma general, en las secciones donde se produce un aumento del ancho

(disminución de la velocidad), y disminución de la pendiente, se reduce la capacidad de transporte, por lo que se generan deposiciones. Al ir consecuentemente variando la pendiente, se producen cambios en la capacidad de transporte. Se observa que entre las secciones 8 y 10 (zona en la que el río presenta un modelo anastomosado tal como se aprecia en la imagen satelital), se evidencia la tendencia a la deposición o a la estabilidad de las secciones más amplias. Por otra parte, hacia la desembocadura, como se ha supuesto una división en dos canales, con la disminución del ancho líquido efectivo, se ve una tendencia al encauzamiento existente. Las variaciones máximas en la cota del fondo son cercanas a 1.75 m. en la deposición, y de 0.25 m. en la erosión, hacia aguas arriba, ambas para 10 años de modelación. Las mayores variaciones en el ancho, se producen en la zona anastomosada, donde el cauce puede divagar libremente en el valle. Los valores de erosión/deposición presentados, por las razones expuestas a lo largo del informe, sólo deben considerarse como indicativos de órdenes de magnitud, resaltándose que el modelo responde al funcionamiento del río que se verifica en la realidad.

2. Río Lavayén.

La aplicación del modelo al río Lavayén se efectuó de manera análoga a la explicada en el punto anterior. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras N° 124 y 125. Se observa que hacia la confluencia con el río Grande existen zonas con tendencia a la deposición, con valores máximos del orden de los 0.30 m. Dichas deposiciones comienzan en las secciones donde se produce una disminución de la pendiente, lo cual a su vez, se traduce en un aumento paulatino del ancho superficial.

3. Río San Francisco.

En primera instancia, y siempre con la misma metodología, se ha modelado el río San Francisco en forma separada, desde la confluencia de los ríos Grande y Lavayén. En una primera evaluación se consideró, el caudal entrante desde el río Grande y el río Lavayén igual a 51 m³/s y los tributarios en las secciones correspondientes en el ingreso de los ríos Negro (15 m³/s), Ledesma (15 m³/s), y San Lorenzo (36 m³/s). Sólo se contó con información granulométrica del lecho del río en las secciones Caimancito y Pichanal, por lo que fue necesario interpolar tamaños entre las muestras del río Grande (con diámetros que superan los 0.10 m) y las de los lugares mencionados en el río San Francisco (diámetros de hasta 500 μ m.). Por ello, se distingue que en el ingreso de los tributarios mencionados, como el caudal ingresante por los mismos es significativo respecto del que trae el río, se producen erosiones (Figura N° 126). En las secciones siguientes, predominan las deposiciones. Esto se traduce en secciones más amplias que coinciden con los tramos anastomosados del río que se observan en las imágenes, a partir de la sección de Caimancito (sección 34) y hacia aguas abajo hasta la confluencia con el río Bermejo.

Nuevamente aquí se señala la ausencia de mediciones específicas, que en este caso impidieron modelar con precisión la acometida de tributarios de importancia, en lo que hace a los caudales líquidos y sólidos por ellos aportados, y a las características de los materiales del lecho del río San Francisco en los lugares de aporte de los mismos.

4. Sistema Grande - San Francisco.

Una vez establecidas las condiciones más apropiadas para cada uno de los ríos estudiados, se modeló el río Grande junto con el río San Francisco, considerando como afluentes al río Lavayén en la sección 13, y a los ríos Negro, Ledesma y San Lorenzo, en las secciones 19, 25 y 29, respectivamente. Como paso de tiempo se consideró 15 minutos, ya que valores mayores producían inestabilidades numéricas para las condiciones variables del río en cuestión. Para el análisis se consideró un período de tiempo total de 5 años.

En primer término, se efectuó una corrida del modelo considerando al río con la capacidad de transporte correspondiente a cada sección, considerando el 100% del transporte sólido ingresante en la sección de inicio (San Juancito, sección 1), y el 50% del caudal sólido ingresante en los tributarios. Los resultados se presentan en las Figuras N° 127 y 128.

En las primeras secciones (1 a 5) se observa que, hasta que no se produce un cambio geométrico de la sección, dado por el aumento del ancho o la disminución de la pendiente, el curso continúa en equilibrio. Al llegar a la sección de San Pedro (7), donde comienzan modificaciones importantes, se evidencian deposiciones que coinciden con las zonas anastomosadas, y hasta la confluencia con el Lavayén. El comportamiento del río Grande resulta el mismo que el explicado en el punto b.3) iii 1.. A partir de esta sección (13), el ingreso de material sólido transportado por el río Lavayén genera deposiciones, que coinciden con el cambio de la pendiente en el río San Francisco. A partir de este punto, el comportamiento

del río es el descripto en el punto b.3) iii 3.: al llegar a las secciones de aporte de los tributarios se observan erosiones, producto de la combinación no verificada de caudales líquidos aportados de importancia con materiales finos en el lecho del río. Hacia la sección Caimancito (34), se desarrollan deposiciones, mientras que partir de este punto comienza a evidenciarse una situación tendiente al equilibrio y la adaptación a las secciones más amplias y de menores pendientes de las zonas cercanas a la desembocadura con el río Bermejo en la Junta de San Francisco.

A los fines de evaluar cómo se comporta el sistema ante una variación de la carga sólida aportada, se realizó una corrida en las mismas condiciones de inicio que la descripta, pero considerando una reducción del aporte sólido en la sección de inicio del río Grande, del 30 % del aporte total. Una reducción del monto mencionado puede asociarse acciones difusas en la cuenca, como prácticas agropecuarias especiales de protección del suelo.

Los resultados se presentan en la Figura N° 129. Se observa que la disminución en el caudal sólido ingresante al sistema se traduce en una erosión en las primeras secciones. Si bien, hacia la sección cercana a San Pedro (7), se evidencia una deposición que coincide con las zonas anastomosadas, se reduce la magnitud de la misma, y entre las secciones 9 y 15, no se evidencian grandes variaciones del nivel del lecho. Una vez que se incorporan los tributarios, se puede decir que el río toma las mismas características que en la modelación del escenario anterior. Por lo tanto puede concluirse que la reducción del caudal sólido modelada es recuperada casi en su totalidad en el mismo río Grande, y parte en el San Francisco, sin afectar al resto del sistema.

Para el primer caso estudiado, se evaluaron las variaciones que se producen en la composición granulométrica del estrato de mezcla, presentándose los resultados en las Figuras N° 130 y 131. En las secciones del río Grande, con mayores tamaños de sedimentos en el fondo, se observa una leve tendencia a la mejor distribución de los tamaños dentro de la mezcla. En las secciones como la 13, donde se produce el ingreso de un tributario con materiales de tamaño mayor a los presentes en el fondo (río Lavayén), se observa cómo se modifica la composición haciéndose más gruesa, coincidiendo a su vez, con la deposición, sobre todo de las partículas mayores. El perfil longitudinal de los ríos y la variación de las secciones más comprometidas, se pueden observar en las figuras subsiguientes (Figuras N° 132, 133 y 134).

Como hecho a resaltar puede decirse que, al analizar el sistema Grande - San Francisco, la tendencia marca zonas de deposición entre Caimancito y

la Junta de San Francisco, lo que estaría indicando que del volumen de material sólido de fondo pasante por Caimancito, no constituye el total ingresado al Bermejo, sino que el ingreso efectivo sería menor. De todos modos, ante las incertidumbres ya expuestas, que invalidan el uso cuantitativo de los resultados aquí obtenidos, las corridas del modelo del río Bermejo inferior se realizaron considerando como ingresantes al Bermejo los caudales medidos en Caimancito (Brea, J.D., 1999).

b.3) 2. Características del modelo morfológico de transporte ALPS-2, en el Río Bermejo Superior (Peviani, M.A.; 1999).

Alcance de los estudios morfológicos en la Alta Cuenca del río Bermejo.

La zona de interés se concentra particularmente en los cauces de los siguientes ríos (Plano N° 2):

† Bermejo Superior Tramo I, desde estación Balapuca hasta la Junta de San Antonio;

† Grande de Tarija, desde estación Astilleros hasta la Junta de San Antonio;

† Bermejo Superior Tramo II, desde la Junta de San Antonio hasta la Junta de San Francisco (aguas abajo de Embarcación); incluyendo los aportes líquidos y sólidos del afluente Tarija sobre el Grande de Tarija y de los afluentes Iruya - Pescado, Blanco, Santa María - Colorado y San Francisco sobre el río Bermejo Superior Tramo I.

El río San Francisco, incluyendo sus afluentes río Grande y río Lavayén, fueron estudiados en el ítem b.3) 1., desarrollado por los especialistas del Laboratorio de Hidráulica Aplicada del INA.

El objetivo principal del estudio fue la evaluación de la capacidad de transporte sólido en la red de drenaje de la Alta Cuenca del río Bermejo, de la mecánica morfológica de sus cauces y en particular, la determinación de la cantidad, por clase granulométrica, de los sedimentos transportados hacia la Baja Cuenca y el sistema Paraguay - Paraná - Río de la Plata. Se considera tanto la situación actual de la cuenca, como la correspondiente a acciones de intervención antrópica, tales como la presencia de aprovechamientos hidroeléctricos, obras de reducción del transporte sólido en la red fluvial y acciones difusas de protección contra la erosión.

La metodología de estudio se basa en la aplicación de un modelo numérico en una dimensión, que permite simular los procesos hidráulicos y sedimentológicos en los cauces multigranulares de fuerte pendiente, como lo son los ríos de la Alta Cuenca del Bermejo. Una descripción del modelo numérico utilizado, ALPS-2, se presentan en la referencia correspondiente (Peviani, M.; 1999).

i. Implementación del modelo morfológico del río Bermejo Superior.

La primera fase de los estudios consiste en la recopilación, análisis y elaboración de datos necesarios para el conocimiento de las características morfológicas, sedimentológicas e hidrológicas de la zona de interés, como así también, de los procesos de transporte sólido y de mecánica fluvial en los cauces principales de la red de drenaje de la Alta Cuenca del Bermejo.

Los trabajos se han realizado en completa sinergia, con la participación de los especialistas del Laboratorio de Hidráulica del INA, de los consultores y de los profesionales de las instituciones que han colaborado en la ejecución de las tareas o han aportado su experiencia específica en distintos temas.

Tal como ya se señalara, la red fluvial principal estudiada está conformada por los ríos:

† Grande de Tarija, desde la estación Astilleros hasta la confluencia con el río Bermejo en Junta de San Antonio, por un total de 92 km. aproximadamente, * Bermejo Superior Tramo I, desde la estación Balapuca hasta la confluencia con el río Grande de Tarija en Junta de San Antonio, por un total de 84 km. aproximadamente, * Bermejo Superior Tramo II, desde la Junta de San Antonio hasta aguas abajo de la confluencia del río San Francisco, por un total de 128 km. aproximadamente.

Asimismo, fueron considerados en los estudios los ingresos líquidos y sólidos provenientes de los principales ríos que confluyen en los anteriormente mencionados. De este modo, se han tenido en cuenta los aportes del río Tarija al Grande de Tarija, y de los ríos Iruya - Pescado, Blanco, Santa María - Colorado y San Francisco al río Bermejo Superior Tramo II.

1. Datos de la morfología de los ríos.

Los datos morfológicos necesarios para el estudio del transporte sólido y de la mecánica fluvial son básicamente el perfil longitudinal de los ríos y la descripción de las secciones transversales del cauce.

El trazado en planta del cauce de los ríos interesados en el estudio, se obtuvo a partir de la cartografía de base en escala 1:100000.

Se consultaron además otras fuentes de información, que se detallan a continuación:

Nombre	escala	Hojas N°
Carta Nacional, Bolivia	1:50000	6725,6726,6727,6627
Carta Provincial, Salta	1:100000	2366-18, 2363-13, 2363-19, 2363-27
Carta COREBE-CODETAR Embarcación.	1:250000	Aprovechamientos seleccionados en fase I, toda la cuenca con cierre en
Carta PEA-INA-OEA	1:500000	hasta confluencia con el río Paraguay (Brea, Busquets; 1999)

Con respecto a los datos de perfiles transversales de los ríos, se cuenta con información proveniente de distintas fuentes, tales como:

† Relevamientos efectuados en distintos períodos de las secciones donde se han realizado aforos por Agua y Energía y, ahora por EVARSA: Alarache, Balapuca, Aguas Blancas, Pozo Sarmiento y Zanja del Tigre (Figuras N° 41, 42, 43, 44, 37).

† Relevamientos de perfiles transversales efectuados por la Dirección Provincial de Recursos Hídricos de Jujuy (DPRHJ) en el marco del PEA, en distintas zonas de los ríos Bermejo, San Francisco, Grande y Lavayén, como se presenta en el ítem b.1) i. (Figuras N° 1 a 8; Tablas N° 1 a 14).

† Información morfológica adicional recopilada, que ha sido desarrollada en el marco de los proyectos de las presas en la Alta Cuenca y para estudios particulares en algunas zonas de los ríos de la red.

† Fotos aéreas adquiridas en el marco de los estudios básicos realizados para el proyecto de las presas de Las Pavas y Arrazayal sobre el río Bermejo Superior, y Cambarí sobre el río Tarija.

† Imágenes satelitales Landsat de la zona de estudio, provistas por el PEA, correspondientes al período seco de 1997.

En particular, las imágenes satelitales han sido de mucha utilidad para cubrir los espacios vacíos de información correspondientes al ancho morfológico (cauce) y al ancho hidráulico (flujo líquido) en los tramos de los ríos en estudio. En el INA, se elaboraron las imágenes satelitales del río Bermejo (N° 230-76 con fecha 30/6/97 y N° 231-75/76 con fecha 2/4/97) y, del río Grande de Tarija (N° 231-75/76 con fecha 2/4/97), procediendo a medir el ancho del cauce morfológico, de coloración marrón, y el ancho del flujo líquido, correspondiente al flujo de las aguas para el caudal pasante, de coloración azulada, en distintos puntos de interés a lo largo del trazado de los ríos.

Como resultado del análisis combinado de toda la información disponible, se obtuvieron los datos morfológicos de pendiente longitudinal y de ancho morfológico de los cauces en número aceptable para la aplicación del modelo numérico.

La Figura N° 135 presenta el resultado de la elaboración efectuada en el INA del trazado de los cauces, en la cual se han indicado las secciones transversales donde se dispone de información morfológica, además de la localización de los puntos de cálculo del modelo, equidistantes en 4000 m..

2. Datos de la composición sedimentológica del lecho de los ríos.

Los datos sedimentológicos necesarios para los estudios son la composición granulométrica del material del lecho de los ríos principales y de los afluentes. Los sedimentos que se encuentran en los cauces de los ríos de montaña presentan dimensiones muy variadas que a su vez tienen distinto comportamiento con respecto al transporte hacia aguas abajo por la acción de la corriente fluvial.

Fue necesario, por lo tanto, recopilar los datos existentes sobre el material del lecho de los ríos objeto del presente estudio y además, realizar campañas de mediciones integrativas:

† Se recopilaron curvas granulométricas de material en suspensión y del lecho del río Bermejo en correspondencia con las estaciones de Alarache, Balapuca y Aguas Blancas. De esta información producida por EVARSA, y de acuerdo a la referencia consultada, la distribución de la arena en suspensión se obtuvo mediante la composición de varias muestras captadas a lo largo de un año de muestreos, involucrando por lo tanto distintos eventos hidrológicos. En lo que se refiere al material del lecho, y siempre de acuerdo a la referencia, se presentan las distribuciones de la arena y grava media (entre 0.062 mm. y 10 mm.), por un lado, y la del material superior a 10 mm. por el otro, como muestran las Figuras N° 47, 48 y 49.

† En el Anuario de Agua y Energía se presentan los transportes sólidos en suspensión mensuales para 22 estaciones de medición localizadas de la Alta Cuenca. En la misma referencia se presenta también, para cada estación, un dato de la granulometría de los sólidos suspendidos. Este dato es, en general, puntual, correspondiendo en algunos casos a la media de un periodo. En base a esa información, en el INA se elaboraron gráficos granulométricos que se presentan en el ítem b.1) ii. (Figuras N° 13 a 35).

† Con referencia al material del lecho, se realizaron campañas a cargo del INA, en la que se tomaron muestras fotográficas para el análisis granulométrico en las siguientes secciones: zona dique Los Molinos en el río Grande, sección El Piquete en el río Lavayén, y en la zona del puente de la Ruta N° 34 en el río Bermejo. Razones climáticas impidieron la toma de muestras en el resto de las secciones. Estos análisis sin embargo carecen de la fracción fina de sedimento. El resultado

de los análisis granulométricos efectuados se encuentra en el Anexo II. En particular, la Figura N° 12 presenta el correspondiente análisis granulométrico del material del lecho del río Bermejo, en localidad Embarcación.

† Ulteriormente, el INA elaboró datos granulométricos de muestreos del material del lecho en el río Bermejo en las localidades de Pozo Sarmiento, La Quena (Embarcación), Chanco Frito, Zanja del Tigre y Carmelo Rodríguez; y en el río San Francisco, en las localidades de Pichanal y Caimancito. Además, se obtuvo un posterior dato granulométrico en la localidad Chanco Frito. Si bien, estas muestras aparentemente carecen de la fracción gruesa de sedimento, han sido de mucha utilidad para el análisis de la tipología de material en el lecho.

El análisis de toda la información disponible descripta precedentemente, llevó a las siguientes conclusiones preliminares:

a) el lecho del río Bermejo en el tramo en estudio está compuesto por material multigranular, cuyas partículas varían entre limo y arcilla, con diámetros inferiores a los 62 micrones (con presencia entre 3 y 10 % del total en peso de la muestra), y piedra, con diámetros hasta 300 mm.;

b) la fracción de sedimento transportada en suspensión está compuesta por (1) limo y arcilla y (2) arenas finas y medias en proporciones variadas, con predominio de la primera (con valores generalmente entre 60 y 90 % de material por debajo de los 62 micrones).

3. Datos del régimen hidrológico de los ríos.

Los datos hidrológicos necesarios para el presente estudio son los caudales en distintas secciones de la red fluvial y en la sección de desemboque de los principales afluentes. Para los estudios de transporte sólido y evolución morfológica a larga escala temporal, es suficiente contar con la curva de duración anual característica de caudales medios diarios en distintas secciones de la red de drenaje.

Con los datos de caudales recopilados de las distintas estaciones de EVARSA, se han elaborado curvas de duración para las estaciones más relevantes, en función de la implementación del modelo. A continuación se presentan las estaciones analizadas en los períodos considerados correspondientes a los ríos Bermejo y Grande de Tarija: Balapuca (1978-94, Figura N° 98), Arrazayal (1978-84, Figura N° 102), Aguas Blancas (1980-94, Figura N° 104), Pozo Sarmiento (1978-94, Figura N° 120), Astilleros (1978-85, Figura N° 113) y San Telmo (1975-94, Figura N° 116). La totalidad de las estaciones de la Alta Cuenca fueron elaboradas en el INA y se presentaron en la tarea b.3) 1. ii..

4. Datos de transporte de sólidos y cambios morfológicos en los ríos.

a). Datos de transporte de sólidos.

En base al análisis de los datos recolectados sobre la Alta Cuenca, los especialistas del Laboratorio de Hidráulica del INA han desarrollado un balance de sedimentos en el río Bermejo, que se presenta en el ítem b.2) vi., y que fue utilizado para el presente análisis.

b). Cambios morfológicos.

Para analizar el cambio morfológico del cauce de los ríos se dispuso de relevamientos efectuados en las secciones donde se realizaron aforos por Agua y Energía (posteriormente EVARSA), como muestran las Figuras N° 36 y 37, y 39 a 44. El análisis de tales datos demuestran la clara variación del lecho durante los distintos períodos del ciclo hidrológico (crecidas y estiajes), con la alternancia de procesos de erosión y de deposición. Sin embargo, de tal información no se vislumbra una tendencia clara a largo período de la evolución del cauce.

5. Implementación del modelo en los ríos Grande de Tarija y Bermejo.

5.1. Esquema de representación de los ríos.

El río Bermejo ha sido esquematizado en el modelo ALPS-2 con 53 puntos de cálculo, cada uno de los cuales representa un tramo de 4000 m. de cauce del río. La Figura N° 136 muestra la localización de los principales afluentes y secciones de referencia.

Análogamente, el río Grande de Tarija ha sido esquematizado en el modelo ALPS-2 con 23 puntos de cálculo, cada uno de los cuales representa un tramo de 4000 m del cauce del río. La Figura N° 137 muestra la localización de los principales afluentes y secciones de referencia.

El esquema de las Figuras N° 136 y 137 hacen referencia a la red fluvial digitalizada en el INA, presentada en la Figura N° 135.

El ingreso de agua y sedimento, de la parte alta de la cuenca y de los afluentes vienen considerados en los elementos Source Point. Los ríos considerados en la simulación son los siguientes:

Secciones N°	Distancia (Km)	Nombre	Tipo
1 a 23	0 - 92	Grande de Tarija	Cauce principal
10	40	San Telmo	Afluente
1 a 21	84	Bermejo Superior Tr.I	Cauce principal
22 a 53	85 - 212	Bermejo Superior Tr.II	Cauce principal
25	100	Iruya y Pescado	Afluentes
28	112	Blanco	Afluente
42	168	S. María y Colorado	Afluentes
46	184	San Francisco	Afluente

5.2. Características morfológicas de los cauces.

Las características morfológicas de los cauces necesarias para la simulación con el modelo ALPS-2, es decir, pendiente longitudinal, ancho hidráulico y ancho morfológico, fueron identificadas a partir de la elaboración de los datos precedentemente descriptos en el ítem i.1.

Las Tablas N° 26 a y 26 b presentan los valores de los parámetros morfológicos correspondientes al río Bermejo, mientras la Tabla N° 27, aquéllos correspondientes al río Grande de Tarija. La Tabla N° 28 presenta los datos relativos a los afluentes principales.

5.3. Clases granulométricas del material del lecho de los ríos y del transporte sólido fluvial.

La característica multigranular del sedimento presente en los ríos de la Alta Cuenca del Bermejo requiere una modelación del transporte sólido por clases granulométricas. El análisis de las curvas granulométricas obtenidas de las muestras de material del lecho de los ríos han permitido seleccionar las clases de sedimentos que se utilizan en el presente estudio. En particular, se consideran las siguientes clases:

Clase Granu- lométrica	Dmín. (mm)	Dmáx. (mm)	Dmed. (mm)
0	< 0.062	0.062	-
1	0.062	0.5	0.180
2	0.5	8	2
3	8	90	24
4	90	300	170

La clase granulométrica «0» corresponde a las partículas que constituyen fundamentalmente la carga de lavado del río (wash load) y por lo tanto, no viene considerada en la simulación numérica del transporte sólido, pero sí será parte del análisis, debido a su importancia en el sistema Paraguay - Paraná - Río de la Plata.

En base a los datos disponibles, descriptos en el punto i.2., se han definido curvas granulométricas características representativas del lecho de los cauces de los ríos objeto de estudio, que se han utilizado como condiciones iniciales para las simulaciones con el modelo ALPS-2.

Tales curvas granulométricas presentan una característica bimodal, típica de ríos de moderada pendiente que reciben la emisión de sedimentos de ríos de montaña. En la Figura N° 138 se presentan las tres curvas representativas del río Bermejo Superior Tramo I (entre Balapuca y Junta de San Antonio), y, Bermejo Superior Tramo II (entre la Junta de San Antonio y la Junta de San Francisco) y aguas abajo de la Junta de San Francisco.

Se debe destacar que a través de la simulación de varios años hidrológicos, se llega a obtener la granulometría del material del lecho en cada tramo del río, que está en equilibrio con las características morfológicas e hidráulicas del mismo.

Para el río Grande de Tarija, por falta de datos específicos, se han utilizado en una primera aproximación las mismas curvas representativas del río Bermejo Superior Tramo I y II hasta Junta de San Francisco.

5.4. Régimen hidrológico y caudales equivalentes en los distintos tramos de los ríos.

Para el análisis de la evolución morfológica de los ríos a larga escala temporal, es decir, varios años (y/o decenios) de régimen hidrológico relativamente constante en la cuenca, se puede utilizar el concepto de caudal formativo o equivalente.

Dicho caudal, para un cierto tramo del río, se define como el valor de caudal líquido que produce el mismo transporte sólido anual que el hidrograma anual de caudales medios diarios en esa sección.

Para el caso del modelo del río Bermejo, considerando una función exponencial para representar la curva de duración anual característica de caudales, y adoptando la ecuación de transporte

sólido de Di Silvio (1983) para relacionar caudales líquidos y sólidos, se llega a la siguiente expresión del caudal equivalente:

$$Q_{\text{equ}} = (Q_0^{0.8} \times Q_{\text{med}})^{0.55} / 1.38$$

Donde Q_0 es el caudal máximo (m³/s) y Q_{med} es el caudal medio (m³/s) de la curva de duración anual característica de caudales medios diarios del tramo en consideración.

En particular, para los estudios de los ríos Grande de Tarija y Bermejo se han considerado los siguientes valores de caudales equivalentes:

Río	Sección	Nombre	Q_{equ} (m ³ /s)
Gde. de Tarija	1	Astilleros	282
Gde. de Tarija	23	Junta San Antonio	350
Bermejo	1	Balapuca	168
Bermejo	21	Junta San Antonio	300
Bermejo	26	Aguas abajo Iruya	728
Bermejo	34	Pozo Sarmiento	780
Bermejo	47	Aguas abajo San Francisco	1151

ii. Calibración y validación del modelo numérico ALPS-2.

Calibración del modelo

Los parámetros de calibración del modelo numérico ALPS-2 son básicamente los coeficientes de la ecuación de movimiento del sedimento, es decir, la ecuación de transporte sólido.

La fórmula de transporte sólido propuesta por Di Silvio (1983) que se utiliza en el modelo, consta de dos parámetros de calibración: el coeficiente γ relacionado con la intensidad del transporte sólido y el exponente s relacionado con la granulometría del material transportado.

La calibración de tales parámetros se ha realizado en fases sucesivas, tomando como valores iniciales aquellos obtenidos en simulaciones precedentes para los ríos Nazareno e Iruya, en el marco de los estudios para el programa de manejo integrado de la cuenca del Iruya (Rafaelli, S.; Peviani, M.A.; Pérez Ayala, F.; 1998; Rafaelli, S.; Pérez Ayala, F.; 1999).

En la fase de recolección y análisis de datos, el equipo de trabajo del LHA del INA, ha elaborado los datos correspondientes a aforos sólidos en las estaciones de Balapuca, Arrazayal, Aguas Blancas, Pozo Sarmiento, Astilleros, San Telmo y Cuatro Cedros, obteniendo, para cada una de ellas, relaciones de transporte sólido en suspensión (total y gruesos) en función de los caudales líquidos en los ríos (ítems b.2)ii.; b.3)1.ii.).

Para la calibración del modelo se ha elegido la serie de aforos sólidos en Pozo Sarmiento - Zanja

del Tigre, debido a que, en las proximidades de tal estación de medición, existen también datos de la composición granulométrica del material del lecho del río, que hace posible la calibración de la ecuación de transporte. La Figura N° 118 presenta la concentración del material sólido en suspensión en función del caudal líquido, así como el porcentaje de material fino y grueso del mismo. La Figura N° 121 muestra la curva de duración anual característica del transporte de material en suspensión, siempre para la estación de Pozo Sarmiento.

Según las evaluaciones realizadas, el transporte en suspensión medio anual es de alrededor de 70.500.000 toneladas. Considerando que, en valor medio, el 25 % del transporte en suspensión es de material grueso, con diámetros entre 62 micrones y 0.5 mm., se concluye que, los volúmenes anuales de transporte en suspensión son en primera aproximación:

material fino (diámetros < 62 μ): 22.000.000 m³ / año

material grueso (62 μ < diámetros < 0.5 mm.): 7.400.000 m³ / año

Mayores precisiones sobre el tema se presentan en el informe de referencia (Peviani, M.; 1999).

Verificación del modelo.

La verificación de la buena calibración de los parámetros del modelo ALPS-2 se ha evidenciado a través de una satisfactoria reproducción del cuadro de balance anual de sedimentos en toda la red de estudio, según la descripción presentada en el punto i.4.

Parámetros de estabilidad numérica del modelo.

Para la simulación de los ríos Grande de Tarija y Bermejo se han optado por distancias entre los puntos de cálculo (Δx) de 4000 m. Los tiempos de cálculo (Δt) que garantizan la estabilidad numérica, son calculados internamente en el modelo cumpliendo con las condiciones de estabilidad de Levi - Courant.

iii. Corridos de producción.

1. Estudio de la situación actual de los ríos Grande de Tarija y Bermejo.

La primera simulación efectuada corresponde a la situación actual, sin ningún tipo de intervención antrópica, sea en la cuenca como en los cauces de los ríos Grande de Tarija y Bermejo. Las condiciones de ingreso de agua y sedimento corresponden a aquéllas de la calibración del modelo, ya presentadas en los párrafos precedentes.

La Figura N° 139 presenta la tendencia evolutiva del cauce del río Grande de Tarija. Se observa una situación de equilibrio general probablemente influenciada por las características bastante uniformes del cauce y del material del lecho (según las hipótesis que se han asumido para suplir la escasa información disponible).

Las Figuras N° 140 a y 140 b presentan en detalle la tendencia evolutiva del cauce del río Bermejo Superior en el Tramo I (Balapuca - Junta de San Antonio) y en el Tramo II (Junta de San Antonio - hasta aguas abajo de la Junta San Francisco), respectivamente.

En el río Bermejo Superior Tramo I, se observa una situación del cauce bastante estable con ligera tendencia a la erosión. Se notan tramos con mayor tendencia erosiva en correspondencia con las secciones más angostas donde la velocidad de la corriente aumenta y la capacidad de transporte sólido es mayor, como por ejemplo, en el tramo inicial (progresivas 0 km. - 8 km.) y en el tramo central (progresivas 36 km. - 52 km.). Se observa también una zona con tendencia al depósito en correspondencia con la sección de progresiva 60 km. donde se verifica una disminución de la pendiente longitudinal del río acompañada por un ensanchamiento del cauce, ambos factores contribuyen a la disminución de la capacidad de transporte sólido.

En el río Bermejo Superior Tramo II, se observa una situación del cauce opuesta a aquélla del tramo I, con tendencia al depósito de material, condicionada por el fuerte aporte de sólidos de sus afluentes. En particular, se observan zonas con tendencia al depósito en el tramo inicial (progresivas 92 km. - 100 km.) y en el tramo central (progresivas 112 km. - 136 km.), donde recibe los aportes de los ríos Grande de Tarija, Iruya - Pescado y Blanco. Prosiguiendo hacia aguas abajo, se observa una zona con tendencia a la erosión entre las progresivas 156 km - 164 km., que corresponden a un tramo del río Bermejo donde la pendiente longitudinal aumenta con el consecuente incremento de la capacidad de transporte sólido. A continuación se tiene nuevamente una zona con tendencia al depósito (progresivas 168 km. - 208 km.) donde recibe los aportes de los afluentes Santa María - Colorado y San Francisco, acompañada por una disminución de la pendiente longitudinal del río que favorece la deposición de los sedimentos.

La Figura N° 141 presenta el transporte sólido total medio anual a lo largo del cauce del río Grande de Tarija. Mientras las Figuras N° 142 a y 142 b presentan en detalle la evolución del transporte sólido total medio anual del cauce del río Bermejo Superior Tramo I (Balapuca - Junta de San Antonio) y en el Tramo II (Junta de San Antonio hasta aguas abajo de Junta de San Francisco), respectivamente. Se

observa el marcado aumento del transporte sólido en el Tramo II del río Bermejo, como consecuencia principalmente del aporte de sólidos de los afluentes andinos de margen derecha.

Los gráficos del transporte sólido reflejan el comportamiento morfológico precedentemente descrito. Es así como en el río Grande de Tarija se observan características muy constantes de transporte sólido.

En el Tramo I del río Bermejo, la capacidad de transporte sólido acompaña las características morfológicas de pendiente y ancho del cauce, mientras el Tramo II se encuentra fuertemente influenciado por el aporte de sus afluentes.

A continuación se presentan los valores de volúmenes anuales de sedimentos transportados, y sus respectivos porcentajes por clase granulométrica, para secciones de interés a lo largo del cauce del Bermejo (ver cuadro en pie de página):

Estimación de la carga de lavado - wash load.

Considerando el análisis de los registros de transporte sólido en suspensión, fracción fina y gruesa en Pozo Sarmiento presentado en el punto b.3) 1. ii., se puede asumir que el transporte sólido en suspensión responda aproximadamente a los siguientes porcentajes:

material fino ($d < 0.062 \text{ mm}$)

T suspensión finos = 75 %

material grueso ($0.062 \text{ mm} < d < 0.5 \text{ mm}$)

T suspensión gruesos = 25 %

Por lo tanto, para estimar la carga de lavado en una primera instancia, se puede utilizar el valor del transporte de la Clase 1 (material grueso en suspensión), multiplicando por tres el correspondiente volumen transportado. Si bien esto no es estrictamente correcto, ya que la carga de lavado es generalmente el resultado de fenómenos en la cuenca (splash erosion) distintos a los que generan el transporte de sedimento más grueso (gully and channel erosion), asumir esta proporción resulta aceptable para los fines del estudio.

Asumiendo que la relación obtenida para Pozo Sarmiento sea válida en los tramos aguas arriba y aguas abajo de la misma, se presenta el siguiente cuadro del transporte de sólidos en suspensión (ver en página siguiente):

2. Estudios con escenarios de intervención en la cuenca del río Bermejo.

Una vez analizada la situación actual de los ríos Grande de Tarija y Bermejo, se han simulado tres condiciones futuras de los mismos considerando algunas intervenciones antrópicas en la cuenca. Los escenarios analizados son los siguientes:

† construcción de los aprovechamientos de Las Pavas y Arrazayal, sobre el río Bermejo, y Cambarí sobre el río Tarija;

† reducción del aporte sólido del sistema Iruya - Pescado: al 75 % del aporte actual, como resultado de una acción de protección a la erosión difusa en el territorio; y, al 50 % y 25 % del aporte actual, como resultado de la construcción de obras de retención de sedimentos en la red fluvial de la cuenca.

2.1. Construcción de los aprovechamientos de Arrazayal, las Pavas y Cambarí.

Este escenario considera la construcción de las represas denominadas:

† Las Pavas y Arrazayal sobre el río Bermejo, en progresiva 0 km. (condición de contorno del modelo) y, en progresiva 40 km. (sección de cálculo 10) respectivamente;

† Cambarí sobre el río Tarija, en progresiva 0 km. (condición de contorno del modelo).

Se asume que, por efecto de la sedimentación en el embalse, las represas atrapan la totalidad de los sedimentos provenientes desde aguas arriba de la cuenca.

A continuación se presentan los valores de volúmenes anuales de sedimentos transportados, y sus respectivos porcentajes por clase granulométrica, para secciones de interés a lo largo del cauce del Bermejo:

Sección N°	Distancia (km.)	Localización	T total 10 ⁶ m ³ /año	Clase 1 (%)	Clase 2 (%)	Clase 3 (%)	Clase 4 (%)
21	84	Aguas arriba del Grande de Tarija	5.1	2	4	48	46
22	88	Aguas abajo del Grande de Tarija	11.3	4	4	30	62
25	100	Aguas abajo del Iruya - Pescado	17.5	18	21	32	29
28	112	Aguas abajo del Blanco	19.5	28	36	16	20
34	136	Pozo Sarmiento	16.5	47	20	9	24
42	184	Aguas abajo del Santa María - Colorado	17.5	38	15	27	20
46	184	Aguas abajo del San Francisco	21.5	66	21	10	3
50	200	Hacia la Cuenca Media	17.6	70	21	6	3

Sección N°	Distancia (km.)	Localización	Ts finos 106 m3/año	Ts gruesos 106 m3/año
22	88	Aguas abajo Grande de Tarija	1.5	0.5
25	100	Aguas abajo del Iruya - Pescado	9.6	3.2
28	112	Aguas abajo del Blanco	16.5	5.5
34	136	Pozo Sarmiento	22.5	7.5
42	184	Aguas abajo del Santa María - Colorado	19.8	6.6
46	184	Aguas abajo del San Francisco	42.6	14.2
50	200	Hacia la Cuenca Media	37	12.3

Sección N°	Distancia (km.)	Localización	T total 106 m3/año	Clase 1 (%)	Clase 2 (%)	Clase 3 (%)	Clase 4 (%)
21	84	Aguas arriba del Grande de Tarija	4.4	2	4	50	44
22	88	Aguas abajo del Grande de Tarija	10.8	4	4	32	60
25	100	Aguas abajo del Iruya - Pescado	17.4	18	22	32	28
28	112	Aguas abajo del Blanco	19.5	28	36	16	20
34	136	Pozo Sarmiento	16.5	47	20	9	24
42	184	Aguas abajo del Santa María - Colorado	17.5	38	15	27	20
46	184	Aguas abajo del San Francisco	21.5	66	21	10	3
50	200	Hacia la Cuenca Media	17.6	70	21	6	3

El proceso de sedimentación en los embalses genera una mayor tendencia a la erosión del cauce en los tramos aguas abajo de las mismas. El aumento del proceso erosivo genera una incorporación mayor de sedimento en el flujo líquido, en modo de equilibrar la menor alimentación de sedimento desde la zona aguas arriba de la cuenca. En síntesis, el resultado final obtenido es de una ligera disminución de los volúmenes transportados, siendo que tal efecto desaparece por completo después de recibir los aportes de los afluentes Iruya y Pescado.

Las Figuras N° 14.3 y 14.4 evidencian, para los ríos Grande de Tarija y Bermejo Superior Tramo I, respectivamente, la mayor tendencia erosiva del cauce comparada con la situación actual sin las presas.

El proceso erosivo que se desplaza hacia aguas abajo tiende a una situación de equilibrio a largo plazo con una menor pendiente longitudinal del cauce, que se traducirá en una disminución de la capacidad de transporte sólido.

2.2. Obras de mitigación en la cuenca de los ríos Iruya y Pescado.

Este escenario considera la reducción del aporte sólido del sistema Iruya - Pescado, por efecto de la intervención en el territorio, sea con acciones difusas, (prácticas agropecuarias especiales de reforestación, etc.), o con la construcción de obras de retención de sedimentos en la red fluvial (protecciones de márgenes, obras transversales de interceptación, cuencas de depósito, etc.).

Se consideran tres escenarios de intervención que se asume podrían llevar a reducir el aporte sólido hacia el río Bermejo a un 75 %, 50 % y 25 % del volumen de aporte total anual actual.

Sección N°	Distancia (km.)	Localización	T total 106 m3/año	Clase 1 (%)	Clase 2 (%)	Clase 3 (%)	Clase 4 (%)
25	100	Aguas abajo del Iruya - Pescado	15.2	16	24	33	27
28	112	Aguas abajo del Blanco	17.6	26	34	18	22
34	136	Pozo Sarmiento	15.5	50	13	10	27
42	184	Aguas abajo del Santa María - Colorado	17	33	17	29	21
46	184	Aguas abajo del San Francisco	21.2	64	25	10	1
50	200	Hacia la Cuenca Media	17.1	66	25	6	3

Reducción del aporte sólido a un 75 % del valor actual. Este escenario corresponde a una hipótesis de intervención difusa en el territorio con prácticas especiales de protección contra la erosión del suelo, que podría eventualmente reducir el aporte sólido a un 75 % del valor actual.

El cuadro siguiente presenta los valores de volúmenes anuales de sedimentos transportados, y sus respectivos porcentajes por clase granulométrica, para distintas secciones de interés a lo largo del cauce del Bermejo (ver cuadro en pie de página anterior):

Se observa que una eventual reducción del 25 % en el aporte sólido del sistema Iruya - Pescado, produciría una reducción de cerca un millón de m³/año (6 %) en Pozo Sarmiento y de medio millón (3 %) hacia la Cuenca Media.

Reducción del aporte sólido a un 50 % del valor actual.

Este escenario corresponde, además de a una intervención difusa en el territorio, a la construcción de obras de retención de sedimentos en la red fluvial secundaria, como protecciones de márgenes, serie de obras transversales de retención de sedimento, etc., que podrían eventualmente reducir el aporte sólido a un 50 % del valor actual.

La síntesis de los resultados obtenidos en la simulación se presentan en el cuadro siguiente (ver cuadro en pie de página):

Una eventual reducción del 50 % en el aporte sólido del sistema Iruya - Pescado produciría una reducción de casi un millón y medio de m³ /año (9 %) en Pozo Sarmiento y cerca de setecientos mil m³ /año (4 %) hacia la Cuenca Media.

Reducción del aporte sólido a un 25 % del valor actual.

Este escenario supone, además de una intervención difusa en el territorio y la construcción de obras de retención de sedimentos en la red fluvial

secundaria, la construcción de obras importantes en el cauce principal del río Iruya, como protecciones de márgenes, grandes obras transversales de retención de sedimento, deflectores de sedimento y/o generación de cuencas de sedimentación, etc., que podrían eventualmente reducir el aporte sólido a un máximo del 25 % del valor actual.

Una eventual reducción del 75 % en el aporte sólido del sistema Iruya - Pescado produciría una reducción de un millón ochocientos mil m³/año (11 %) en Pozo Sarmiento y de más de un millón de m³/año (6 %) hacia la Cuenca Media.

La síntesis de los resultados obtenidos en la simulación se presentan en el cuadro siguiente: (ver último cuadro en pie de página)

Efecto sobre la fracción del transporte sólido en suspensión.

Resulta de particular interés analizar la reducción efectiva de la fracción de sedimento que la corriente del río puede transportar en suspensión y que eventualmente ingresa en el sistema de los ríos Paraguay - Paraná y de La Plata. Cabe destacar que, en todos los casos analizados precedentemente, la reducción de volumen interesa, en modo particular, a la clase de los sedimentos transportados en suspensión (clase 1), reduciéndose consecuentemente también, el volumen de sedimento de carga de lavado (wash load).

El volumen de finos (limos y arcillas) que efectivamente se podrían retener en el sistema Iruya/Pescado (siguiendo con el ejemplo), así como el volumen que luego sería transportado a través del río Bermejo hacia su salida a la Baja Cuenca, no es de fácil predicción dependiendo fundamentalmente de la reacción de la cuenca a las obras de mitigación y del río Bermejo a la disminución del aporte sólido.

Sección N°	Distancia (km.)	Localización	T total 10 ⁶ m ³ /año	Clase 1 (%)	Clase 2 (%)	Clase 3 (%)	Clase 4 (%)
25	100	Aguas abajo del Iruya - Pescado	13.3	16	24	33	27
28	112	Aguas abajo del Blanco	16.1	24	36	19	21
34	136	Pozo Sarmiento	15.1	44	9	13	34
42	184	Aguas abajo del Santa María -Colorado	16.8	30	18	31	21
46	184	Aguas abajo del San Francisco	21	61	28	10	1
50	200	Hacia la Cuenca Media	16.9	62	29	6	3

Sección N°	Distancia (km.)	Localización	T total 10 ⁶ m ³ /año	Clase 1 (%)	Clase 2 (%)	Clase 3 (%)	Clase 4 (%)
25	100	Aguas abajo del Iruya - Pescado	10.9	17	28	32	23
28	112	Aguas abajo del Blanco	14.6	22	35	20	23
34	136	Pozo Sarmiento	14.7	43	8	13	36
42	184	Aguas abajo del Santa María -Colorado	16.7	29	18	31	22
46	184	Aguas abajo del San Francisco	19.5	59	28	10	2
50	200	Hacia la Cuenca Media	16.5	58	28	9	5

En principio, y considerando la escala del análisis que se está efectuando, se puede asumir que aproximadamente el mismo volumen de finos (limos y arcillas) que se logren retener en la cuenca del Iruya-Pescado disminuirá a la salida de la Alta Cuenca, aguas abajo de la Junta de San Francisco. Esto se sustenta en que, en general, los limos y arcillas se comportan como carga de lavado en todo el Bermejo Superior. Siempre en la escala de análisis del estudio, puede decirse con certeza que los finos aportados por la cuenca del Iruya-Pescado (o por cualquier otra) son transportados como carga de lavado en los ríos del sistema hasta la Junta de San Francisco. En estas condiciones, el río Bermejo no acusa la menor cantidad de finos aportados, cumpliéndose de este modo la definición de carga de lavado, quedando determinada la concentración de finos por la cantidad aportada a la corriente y no por la capacidad de ésta para transportarla.

Con respecto a la hipótesis precedente, persiste la incertidumbre de cual podrá ser el efecto, probablemente reducido, que los cambios morfológicos y granulométricos del río (después de varias décadas de evolución como resultado de la hipotética disminución del aporte del sistema Iruya/Pescado) podrían tener sobre el transporte de finos en suspensión.

En el informe de referencia se presenta, a título de ejemplo, un ejercicio de evaluación del aporte de sedimentos hacia la Baja Cuenca (Peviani, M.; 1999).

En el capítulo siguiente, al analizar la influencia de la variación de la carga sedimentaria del río Bermejo en el sistema Paraguay - Paraná - Río de la Plata, se hacen mayores precisiones sobre el tema, que avalan la adopción de la hipótesis citada si se analiza el sistema en su conjunto.

SÍNTESIS.

A continuación se sintetizan las principales resultados obtenidos de la modelación morfológica del río Bermejo Superior:

† En el río Bermejo Superior Tramo I, se observa una situación actual del cauce bastante estable con probable tendencia a la erosión.

† En el río Bermejo Superior Tramo II, se observa una situación actual del cauce opuesta a aquella del tramo superior, con tendencia al depósito de material condicionada por el fuerte aporte de sólidos de sus afluentes, los ríos Grande de Tarija, Iruya - Pescado y Blanco, en el tramo inicial y central, y los ríos Santa María - Colorado y San Francisco, en el tramo final.

† En el río Grande de Tarija se observa una situación general de equilibrio actual del cauce, pero probablemente tal resultado está fuertemente influenciado por las hipótesis que se han asumido para suplir la escasa información disponible sobre las características morfosedimentológicas de su cauce.

† En el río Bermejo Superior Tramo II, se observa un marcado aumento del transporte sólido en comparación con el Tramo I, principalmente como consecuencia del aporte de sólidos de los afluentes andinos de margen derecha.

† El proceso de sedimentación en los embalses de los aprovechamientos de Las Pavas, Arrazayal y Cambarí genera una mayor tendencia a la erosión del cauce en los tramos aguas abajo de las mismas. El aumento del proceso erosivo genera una incorporación mayor de sedimento en el flujo líquido, de modo de equilibrar la menor alimentación de sedimento desde la zona aguas arriba. En síntesis, el resultado final obtenido es de una ligera disminución de los volúmenes transportados, siendo que tal efecto desaparece por completo después de recibir los aportes de los afluentes Iruya y Pescado.

† Se han analizado distintos escenarios de reducción del aporte sólido hacia el río Bermejo, proveniente de la cuenca de los ríos Iruya y Pescado. Estos escenarios fueron hipotéticamente asociados a distintos niveles de intervención en la cuenca para mitigar los procesos erosivos y el desplazamiento de los sedimentos en la red fluvial.

FIGURAS Y TABLAS

Figura N° 1 a 8:	Ubicación en planta perfiles transversales (DPRHJ) (*).
Figura N° 9:	Resultado análisis granulométrico por fotografías. Muestra N° 1.
Figura N° 10:	Resultado análisis granulométrico por fotografías. Muestra N° 2.
Figura N° 11:	Resultado análisis granulométrico por fotografías. Muestra N° 3.
Figura N° 12:	Resultado análisis granulométrico por fotografías. Muestra N° 4.
Figura N° 13:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Zanja del Tigre.
Figura N° 14:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Balapuca.
Figura N° 15:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Arrazayal.
Figura N° 16:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Alarache.
Figura N° 17:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Aguas Blancas.
Figura N° 18:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Astilleros.
Figura N° 19:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. San Telmo.
Figura N° 20:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. El Angosto.
Figura N° 21:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. El Angosto.
Figura N° 22:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. San José.
Figura N° 23:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. San José.
Figura N° 24:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Puesto Romero.
Figura N° 25:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Cuatro Cedros.
Figura N° 26:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Colonia Colpana.
Figura N° 27:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Puente Carretero.
Figura N° 28:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Peña Alta.
Figura N° 29:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. El Angosto.
Figura N° 30:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Bajada de Pinto.
Figura N° 31:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. San Juancito.
Figura N° 32:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Arrayanal.
Figura N° 33:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. San Antonio.
Figura N° 34:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. Las Bateas.
Figura N° 35:	Composición granométrica. Sedimento en suspensión. El Angosto.
Figura N° 36:	Comparación de secciones transversales. Pozo Sarmiento.
Figura N° 37:	Perfil transversal. Zanja del Tigre.
Figura N° 38:	Perfil transversal. Caimancito.
Figura N° 39:	Comparación de secciones transversales. Aguas Blancas.
Figura N° 40:	Comparación de secciones transversales. Aguas Blancas.
Figura N° 41:	Comparación de secciones transversales. Alarache.

- Figura N° 42: Comparación de secciones transversales. Balapuca.
 Figura N° 43: Comparación de secciones transversales. Aguas Blancas.
 Figura N° 44: Comparación de secciones transversales. Pozo Sarmiento.
 Figura N° 45: Comparación de secciones transversales. Caimancito.
 Figura N° 46: Líneas de nivelación de alta precisión.
 Figura N° 47: Composición granulométrica del material en suspensión y en el lecho. Alarache.
 Figura N° 48: Composición granulométrica del material en suspensión y en el lecho. Balapuca.
 Figura N° 49: Composición granulométrica del material en suspensión y en el lecho. Aguas Blancas.
 Figura N° 50: Aforo de material en suspensión. Balapuca (93-95).
 Figura N° 51: Aforo de material en suspensión. Balapuca (71-95).
 Figura N° 52: Aforo de material en suspensión. Arrazayal (81-84).
 Figura N° 53: Aforo de material en suspensión. Aguas Blancas (93-95).
 Figura N° 54: Aforo de material en suspensión. Pozo Sarmiento (93-95).
 Figura N° 55: Aforo de material en suspensión. San José (93-95).
 Figura N° 56: Aforo de material en suspensión. Cuatro Cedros (93-95).
 Figura N° 57: Aforo de material en suspensión. Caimancito.
 Figura N° 58: Aforo de material en suspensión. Astilleros (81-85).
 Figura N° 59: Aforo de material en suspensión. San Telmo (93-95).
 Figura N° 60: Curva de duración de caudales. Balapuca.
 Figura N° 61: Curva de duración de caudales. Arrazayal.
 Figura N° 62: Curva de duración de caudales. Aguas Blancas.
 Figura N° 63: Curva de duración de caudales. Pozo Sarmiento.
 Figura N° 64: Curva de duración de caudales. San José.
 Figura N° 65: Curva de duración de caudales. Cuatro Cedros.
 Figura N° 66: Curva de duración de caudales. Caimancito.
 Figura N° 67: Curva de duración de caudales. Astilleros.
 Figura N° 68: Curva de duración de caudales. San Telmo.
 Figura N° 69: Lecturas de escalas - Caudal. Aguas Blancas.
 Figura N° 70: Lecturas de escalas - Caudal. Astilleros.
 Figura N° 71: Lecturas de escalas - Caudal. Caimancito.
 Figura N° 72: Lecturas de escalas - Caudal. Aguas Blancas.
 Figura N° 73: Lecturas de escalas - Caudal. Aguas Blancas.
 Figura N° 74: Curva de duración anual característica de caudales medios diarios. Pozo Sarmiento.
 Figura N° 75: Curva de duración anual característica de transporte sólido en suspensión. Pozo Sarmiento.
 Figura N° 76 a: Esquema del modelo en estratos de transporte y almacenamiento.
 Figura N° 76 b: Esquema numérico de resolución de las ecuaciones diferenciales de avance en el tiempo y en el espacio, y corrección por cuatro puntos.
 Figura N° 77: Comparación de resultados en modelo físico y en modelo matemático. Aplicación Río Medina.
 Figura N° 78: Río Grande - San Juancito. Curva de duración anual característica de caudales líquidos medios mensuales.
 Figura N° 79: Río Lavayén - Bajada de Pinto. Curva de duración anual característica de caudales líquidos medios mensuales.
 Figura N° 80: Río San Francisco - Caimancito. Curva de duración anual característica de caudales líquidos medios mensuales.
 Figura N° 81: Composición granulométrica - Río Grande - San Juancito. Sedimento en suspensión.
 Figura N° 82: Composición granulométrica - Río Lavayén - Bajada de Pinto. Sedimento en suspensión.
 Figura N° 83: Composición granulométrica - Río San Francisco - Puente Carretero. Sedimento en suspensión.
 Figura N° 84: Curvas granulométricas - Sistema Grande - San Francisco. Sedimento del lecho.
 Figura N° 85: Secciones transversales - Río Grande - San Juancito (1) y San Pedro (7).
 Figura N° 86: Secciones transversales - Río Lavayén - Bajada de Pinto (1) y El Piquete (11).
 Figura N° 87: Sección transversal - Río San Francisco - Caimancito (34).
 Figura N° 88: San Juancito. Comparación entre caudal sólido grueso en suspensión, de arrastre en el fondo y total en función del caudal líquido. Ecuación de Di Silvio y tendencias.
 Figura N° 89: Bajada de Pinto. Comparación entre caudal sólido grueso en suspensión, de arrastre en el fondo y total en función del caudal líquido. Ecuación de Di Silvio y tendencias.
 Figura N° 90: Caimancito. Comparación entre caudal sólido grueso en suspensión, de arrastre en el

- fondo y total en función del caudal líquido. Ecuación de Di Silvio y tendencias.
- Figura N° 91: San Juancito. Curva de duración anual característica de transporte sólido total.
- Figura N° 92: Bajada de Pinto. Curva de duración anual característica de transporte sólido total.
- Figura N° 93: Caimancito. Curva de duración anual característica de transporte sólido total.
- Figura N° 94: Caimancito. Curva de duración anual característica de caudales medios diarios.
- Figura N° 95: Caimancito. Comparación entre los porcentajes de la fracción gruesa y fina de los sedimentos suspendidos aforados en función del caudal líquido.
- Figura N° 96: Caimancito. Comparación entre los sólidos gruesos aforados suspendidos y los porcentajes calculados.
- Figura N° 97: Balapuca – Río Bermejo. Concentración de sedimentos totales en suspensión. Comparación entre los porcentajes de gruesos y finos en suspensión en función del caudal líquido.
- Figura N° 98: Balapuca – Río Bermejo. Curva de duración anual característica de caudales medios diarios (período 78/94).
- Fig. N° 99 a y b: Balapuca – Río Bermejo. Comparación de gruesos aforados en suspensión y porcentajes calculados. Comparación de transporte sólido en suspensión adoptado y el calculado con ecuación de Di Silvio.
- Figura N° 100: Balapuca – Río Bermejo. Curva de duración anual característica de transporte sólido en suspensión.
- Figura N° 101: Arrazayal – Río Bermejo. Concentración de sedimentos totales en suspensión (período 81/84). Comparación entre porcentaje adoptado del total de los sólidos en suspensión y la tendencia en función de los caudales líquidos.
- Figura N° 102: Arrazayal – Río Bermejo. Curva de duración de caudales líquidos aforados (período 78/84). Curva de duración de transporte sólido en suspensión.
- Figura N° 103: Aguas Blancas – Río Bermejo. Concentración de sedimentos totales en suspensión (período 93/95). Comparación entre los porcentajes de la fracción fina y gruesa en suspensión en función de los caudales líquidos.
- Figura N° 104: Aguas Blancas – Río Bermejo. Curva de duración anual característica de caudales líquidos medios diarios (período 80/94).
- Figura N° 105: Aguas Blancas – Río Bermejo. Comparación entre gruesos suspendidos y el porcentaje adoptado del total de los sólidos en suspensión en función de los caudales líquidos. Curvas de tendencias.
- Figura N° 106: Aguas Blancas – Río Bermejo. Comparación entre el porcentaje adoptado del total de los sólidos en suspensión y el cálculo del transporte de material según ecuación de Di Silvio, sólo de la fracción en suspensión, en función de los caudales líquidos.
- Figura N° 107: Aguas Blancas – Río Bermejo. Curva de duración anual característica de transporte sólido en suspensión.
- Figura N° 108: Cuatro Cedros (Puesto Romero) – Río Pescado. Concentración de sedimentos totales en suspensión. Comparación entre los porcentajes de la fracción fina y gruesa en suspensión en función de los caudales líquidos.
- Figura N° 109: Cuatro Cedros (Puesto Romero) – Río Pescado. Comparación entre el porcentaje adoptado del total de los sólidos en suspensión y el porcentaje de la fracción gruesa en función de los caudales líquidos.
- Figura N° 110: Cuatro Cedros (Puesto Romero) – Río Pescado. Curva de duración anual característica de caudales medios diarios. Curva de duración anual característica de transporte sólido en suspensión.
- Figura N° 111: Astilleros – Río Grande de Tarija. Concentración de sedimentos totales en suspensión. Comparación entre el porcentaje adoptado de gruesos en suspensión y la curva de tendencia, en función de los caudales líquidos.
- Figura N° 112: Astilleros – Río Grande de Tarija. Comparación del transporte en suspensión entre el porcentaje adoptado de gruesos en suspensión y el cálculo según ecuación de Di Silvio considerando sólo suspensión.
- Figura N° 113: Astilleros – Río Grande de Tarija. Curva de duración de caudales líquidos aforados (período 78/85). Curva de duración de transporte sólido en suspensión.
- Figura N° 114: San Telmo – Río Grande de Tarija. Concentración de sedimentos totales en suspensión (período 93/95). Porcentajes de la fracción fina y gruesa en suspensión respecto del total del sedimento en suspensión, en función de los caudales líquidos.
- Figura N° 115: San Telmo – Río Grande de Tarija. Material grueso en suspensión y comparación con el

	porcentaje respectivo adoptado y las curvas de tendencia, en función de los caudales líquidos.
Figura N° 116:	San Telmo – Río Grande de Tarija. Curva de duración anual característica de caudales medios diarios.
Figura N° 117:	San Telmo – Río Grande de Tarija. Curva de duración anual característica de transporte sólido en suspensión.
Figura N° 118:	Pozo Sarmiento – Río Bermejo. Concentración de material sólido en suspensión (período 93/95). Porcentajes de la fracción fina y gruesa del material suspendido total en función del caudal líquido.
Figura N° 119:	Pozo Sarmiento – Río Bermejo. Material grueso en suspensión y comparación con el porcentaje respectivo adoptado y con las curvas de tendencia, en función de los caudales líquidos.
Figura N° 120:	Pozo Sarmiento – Río Bermejo. Curva de duración anual característica de caudales medios diarios.
Figura N° 121:	Pozo Sarmiento – Río Bermejo. Curva de duración anual característica de transporte sólido en suspensión.
Figura N° 122:	Río Grande – Variación de la cota del fondo. Perfil longitudinal.
Figura N° 123:	Río Grande – Variación del tirante y del ancho superficial.
Figura N° 124:	Río Lavayén – Variación de la cota del fondo. Perfil longitudinal.
Figura N° 125:	Río Lavayén – Variación del ancho superficial y del tirante.
Figura N° 126:	Río San Francisco – Variación de la cota de fondo (?Z). Caudales líquidos formativos por tramos (ingreso de tributarios).
Figura N° 127:	Sistema ríos Grande y San Francisco – Variación de la cota de fondo (?Z).
Figura N° 128:	Sistema ríos Grande y San Francisco – Caudales según tramos – Variación del ancho superficial y del tirante.
Figura N° 129:	Ríos Grande y San Francisco – Reducción del transporte de sólidos al inicio del sistema en un 30%. Perfil longitudinal. Variación del ancho superficial.
Figura N° 130:	Composición granulométrica en las secciones 7, 11 y 13 (ingreso Lavayén) y su variación media al cabo de 5 años.
Figura N° 131:	Composición granulométrica en las secciones 34 (Caimancito) y 52 (Pichanal). Variación media al cabo de 5 años.
Figura N° 132:	Sistema ríos Grande y San Francisco – Perfil longitudinal.
Figura N° 133:	Variación de las secciones transversales (1, 8 y 13).
Figura N° 134:	Variación de las secciones transversales (27, 34, 46 y 53).
Figura N° 135:	Ubicación de las secciones de los ríos Grande de Tarija y Bermejo. a implementar en el modelo ALPS-2.
Figura N° 136:	Esquema de representación del río Bermejo en el modelo ALPS-2.
Figura N° 137:	Esquema de representación del río Grande de Tarija, en el modelo ALPS-2.
Figura N° 138:	Curvas granulométricas características del río Bermejo.
Figura N° 139:	Tendencia evolutiva del cauce del río Grande de Tarija en el tramo Astilleros – Junta de San Antonio (simulación modelo ALPS-2).
Figura N° 140 a:	Tendencia evolutiva del cauce del río Bermejo Superior Tramo I, entre Balapuca y Junta de San Antonio (simulación modelo ALPS-2).
Figura N° 140 b:	Tendencia evolutiva del cauce del río Bermejo Superior Tramo II, aguas abajo de Junta de San Antonio (simulación modelo ALPS-2).
Figura N° 141:	Transporte sólido total medio anual a lo largo del cauce del río Grande de Tarija (simulación modelo ALPS-2).
Figura N° 142 a:	Transporte sólido total medio anual a lo largo del cauce del río Bermejo Superior Tramo I, entre Balapuca y Junta de San Antonio (simulación modelo ALPS-2).
Figura N° 142 b:	Transporte sólido total medio anual a lo largo del cauce del río Bermejo Superior Tramo II, aguas abajo de Junta de San Antonio (simulación modelo ALPS-2).
Figura N° 143:	Tendencia evolutiva del cauce del río Grande de Tarija en el tramo Astilleros – Junta de San Antonio, considerando Cambarí (simulación modelo ALPS-2).
Figura N° 144:	Tendencia evolutiva del cauce del río Bermejo Superior Tramo I, entre Balapuca y Junta de San Antonio, considerando Las Pavas y Arrazayal (simulación modelo ALPS-2).
Tabla N° 1:	Río Grande en los Molinos. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 2:	Río Grande en San Juancito. Planilla de coordenadas.

Tabla N° 3:	Río Grande en San Pedro. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 4:	Río Lavayén en Bajada de Pinto. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 5:	Río Lavayén en Puente Acceso a El Piquete. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 6:	Río San Francisco en Caimancito. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 7:	Río Bermejo en Carmelo Rodríguez. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 8:	Río Bermejo en Pozo Verde. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 9:	Río Bermejo en Chancho Frito. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 10:	Río Bermejo en Pozo Sarmiento. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 11:	Río Bermejo en Zanja del Tigre. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 12:	Río Bermejo en La Quena. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 13:	Río Bermejo aguas arriba de Junta de San Francisco. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 14:	Río Bermejo aguas abajo de Junta de San Francisco. Planilla de coordenadas.
Tabla N° 15:	Resumen de coordenadas.
Tabla N° 16:	Estaciones de aforo sólido en suspensión. Alta Cuenca y ríos Seco, Dorado y Del Valle.
Tabla N° 17:	Datos de precipitación mensual en estaciones argentinas.
Tabla N° 18:	Datos de precipitación mensual en estaciones bolivianas.
Tabla N° 19:	Río Grande - San Juancito. Caudales medios mensuales (período 67/81) (*).
Tabla N° 20:	Río Lavayén - Bajada de Pinto. Caudales medios mensuales (período 42/80) (*).
Tabla N° 21:	Río San Francisco - Caimancito. Caudales medios mensuales (período 46/90) (*).
Tabla N° 22:	Río Grande - San Juancito. Material sólido en suspensión (período 62/81) (*).
Tabla N° 23:	Río Lavayén - Bajada de Pinto. Material sólido en suspensión (período 42/81) (*).
Tabla N° 24:	Río San Francisco - Caimancito. Material sólido en suspensión (período 48/89) (*).
Tabla N° 25:	Imágenes satelitales - Ancho del valle y del río en las correspondientes secciones.
Tabla N° 26 a:	Características morfológicas del río Bermejo Superior Tramo I.
Tabla N° 26 b:	Características morfológicas del río Bermejo Superior Tramo II.
Tabla N° 27:	Características morfológicas del río Grande de Tarija.
Tabla N° 28:	Características morfológicas de los principales afluentes.

(*) No se dispone de esta información en formato digital. En soporte papel esta disponible en las oficinas del PEA Bermejo en Buenos Aires.

**Resultado del análisis granulométrico por fotografías.
Muestra N° 1: Río Grande (Los Molinos).**

Fracción (mm)	Frec. ac. en peso
128	100
90.2	57.63
64	27.12
45.1	13.24
32	7.53
22.5	1.96
16	0.58
11.28	0.05
8	0.00

Muestra N° 1: Río Grande (Los Molinos)

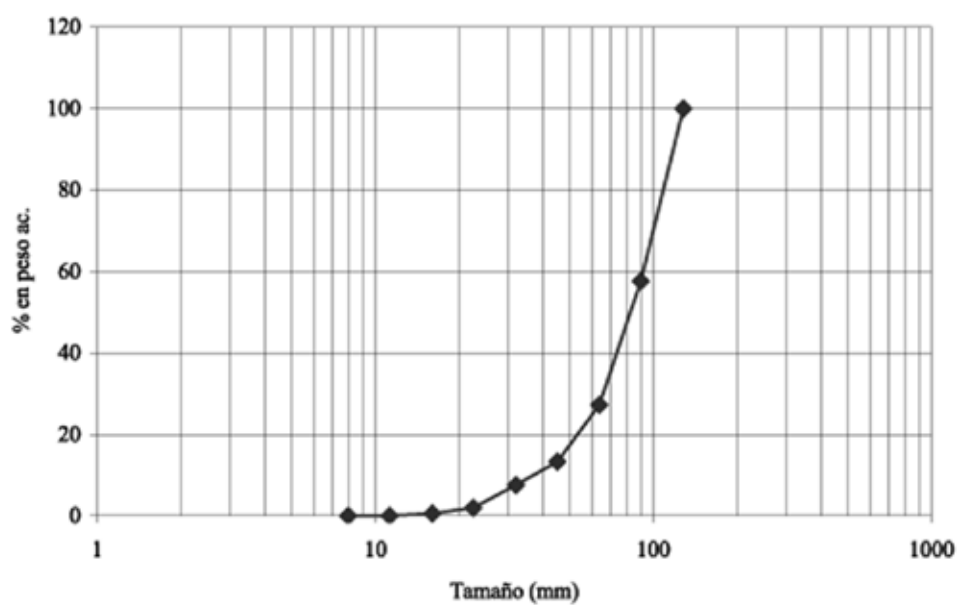
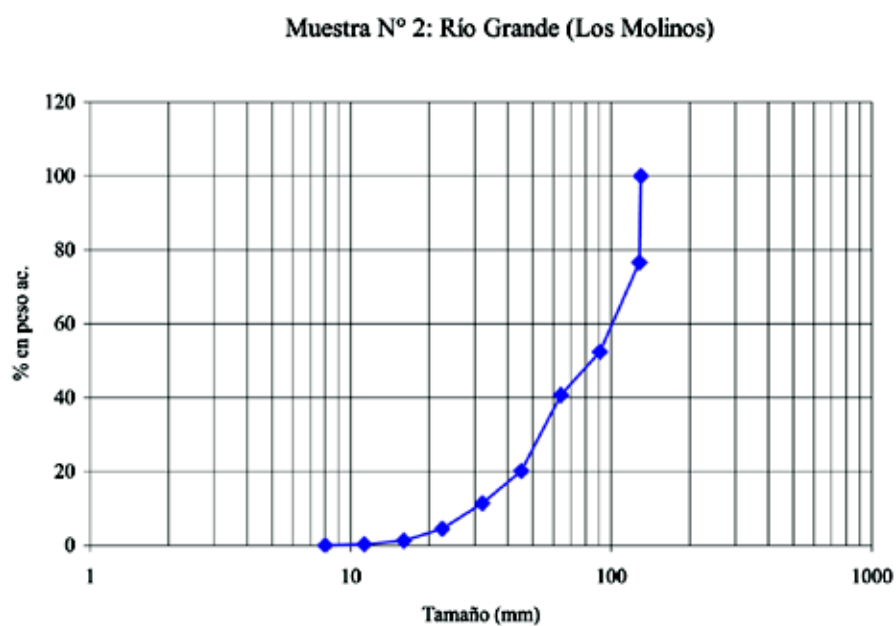


Figura n° 9

**Resultado del análisis granulométrico por fotografías.
Muestra N° 2: Río Grande (Los Molinos).**

Fracción (mm)	Frec. ac. en peso
130.1	100
128	76.66
90.2	52.33
64	40.65
45.1	20.21
32	11.46
22.5	4.48
16	1.25
11.28	0.25
8	0.00



Generación y transporte de sedimentos

Figura n° 10

**Resultado del análisis granulométrico por fotografías.
Muestra N° 3: Río Lavayén (El Piquete).**

Fracción (mm)	Frec. ac. en peso
128	100
90.2	100
64	48.87
45.1	21.56
32	8.12
22.5	2.15
16	0.18
11.28	0.01
8	0.00

Muestra N° 3: Río Lavayén (El Piquete)

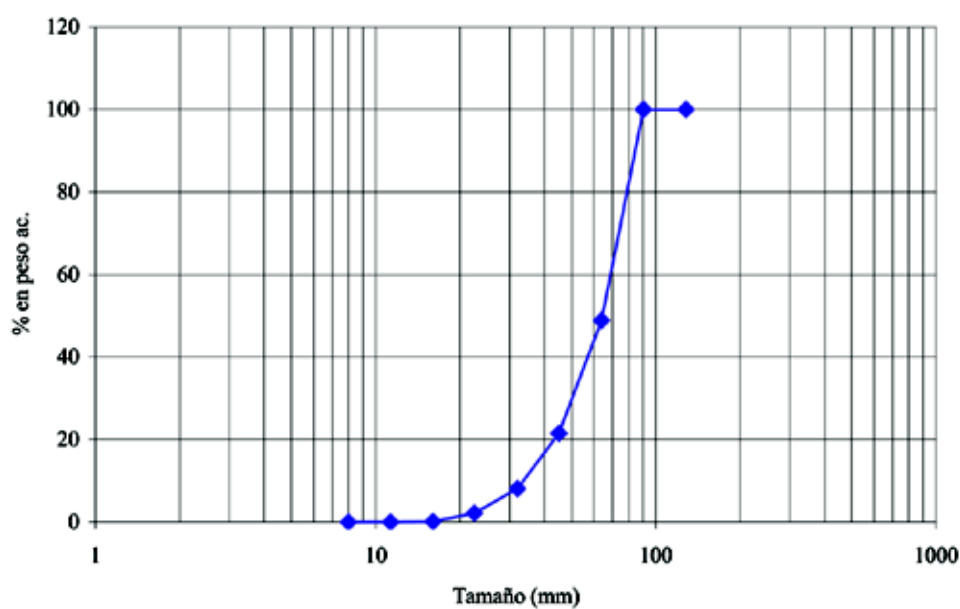


Figura n° 11

**Resultado del análisis granulométrico por fotografías.
Muestra N° 4: Río Bermejo (Embarcación).**

Fracción (mm)	Frec. ac. en peso
311.4	100
128	64.94
90.2	40.58
64	27.42
45.1	22.82
32	13.51
22.5	5.88
16	2.12
11.28	0.37
8	0.00

Muestra N° 4: Río Bermejo (Embarcación)

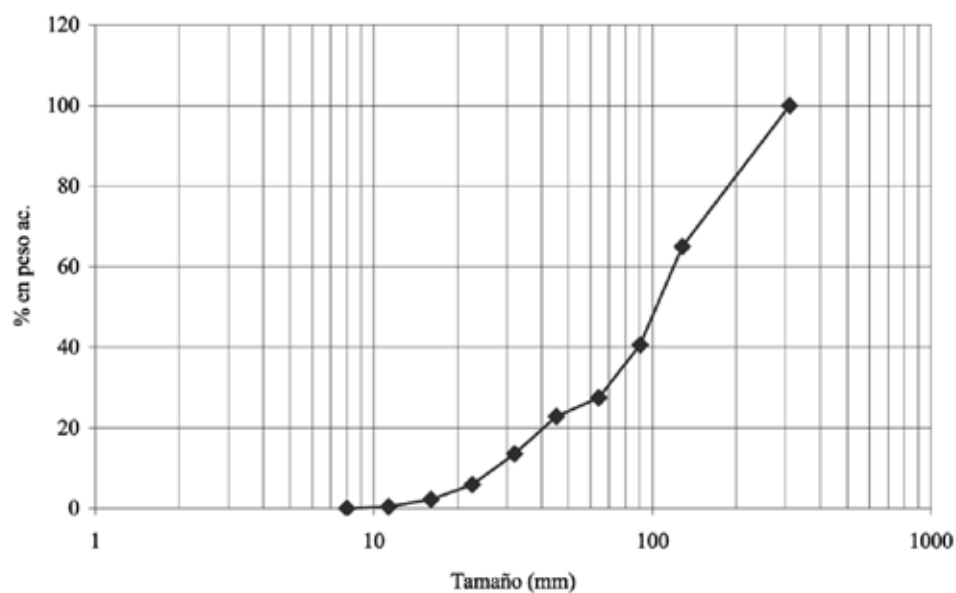


Figura n° 12

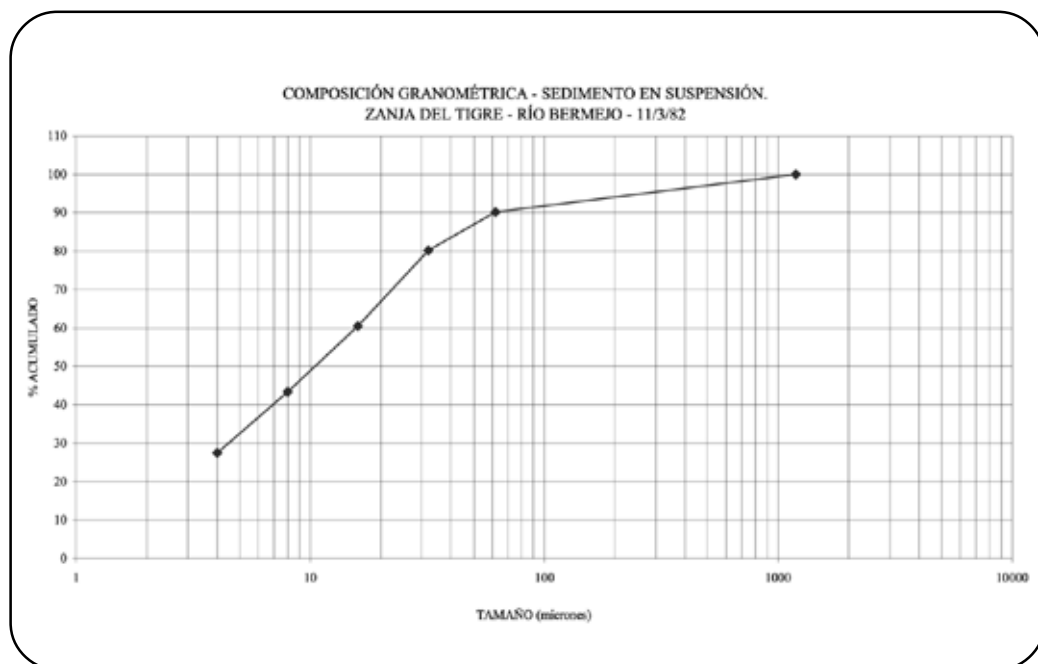
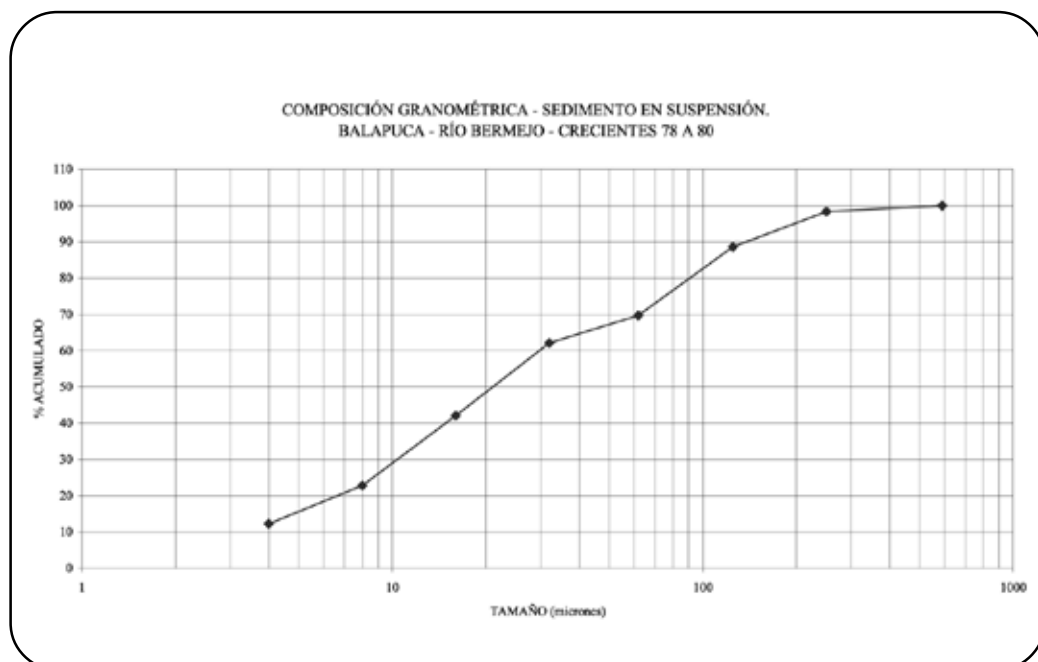


Figura n° 13

/ Figura n° 14



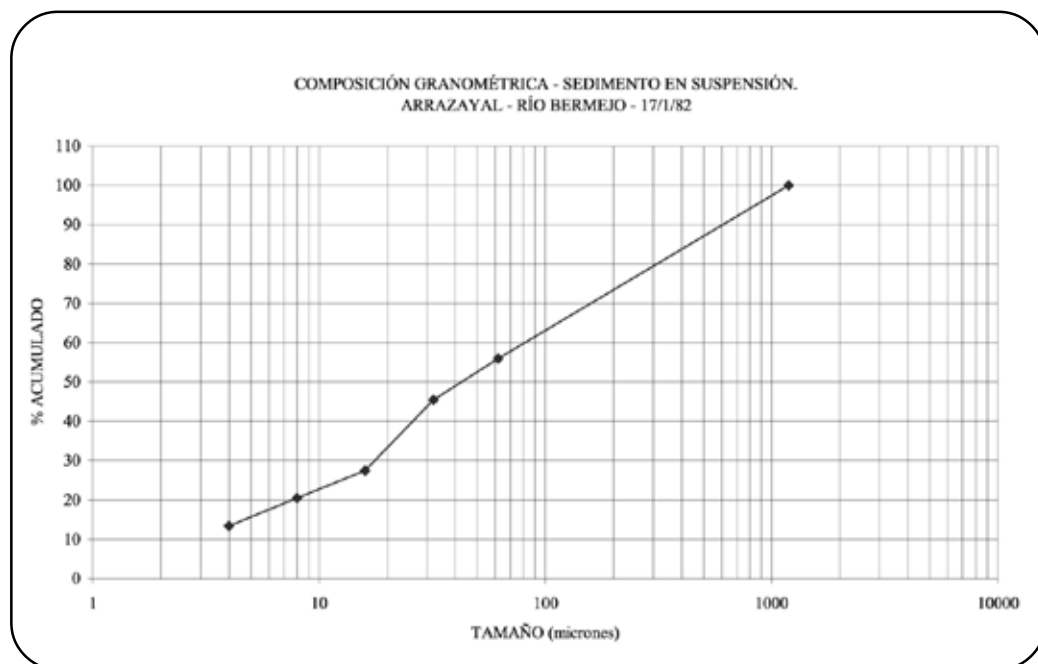
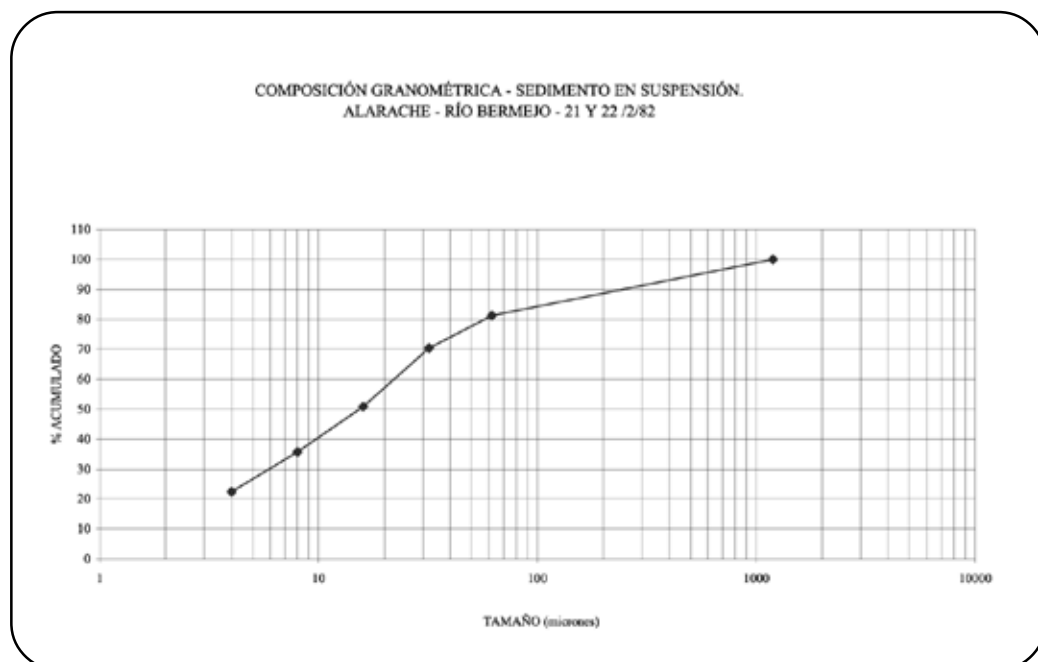


Figura n° 15

/ Figura n° 16



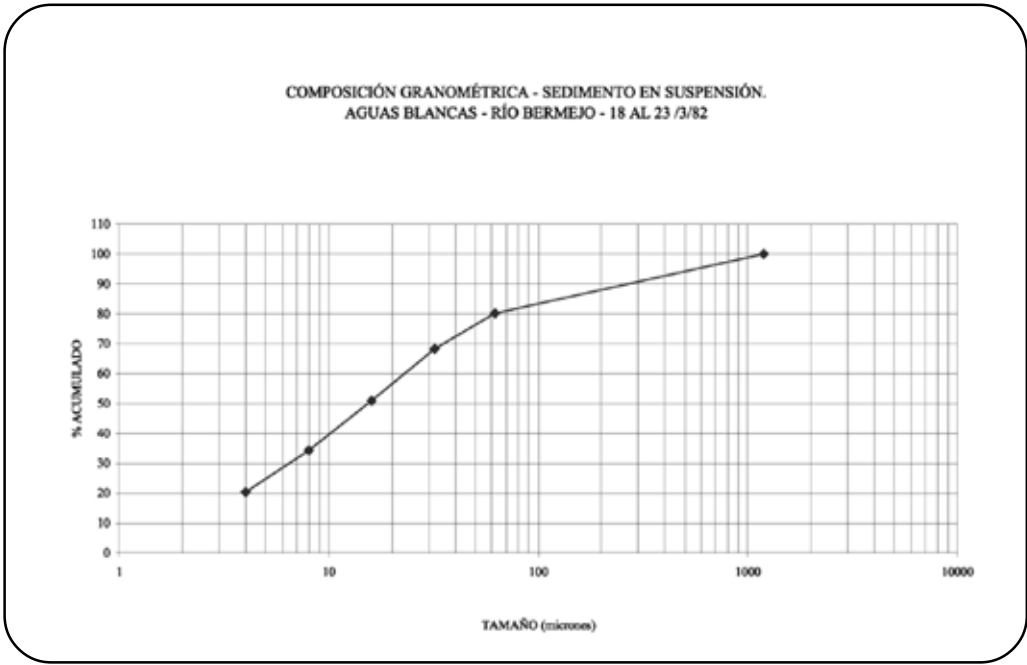
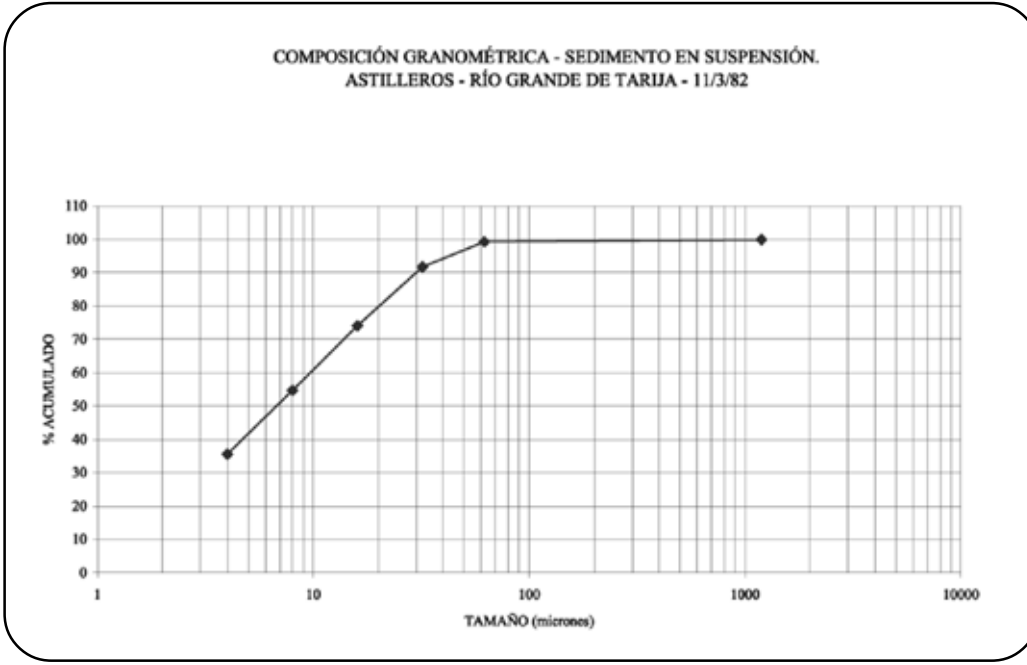


Figura nº 17

/ Figura nº 18



COMPOSICIÓN GRANOMÉTRICA - SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN.
SAN TELMO - RÍO GRANDE DE TARIJA - 3, 4 Y 5 /1/81

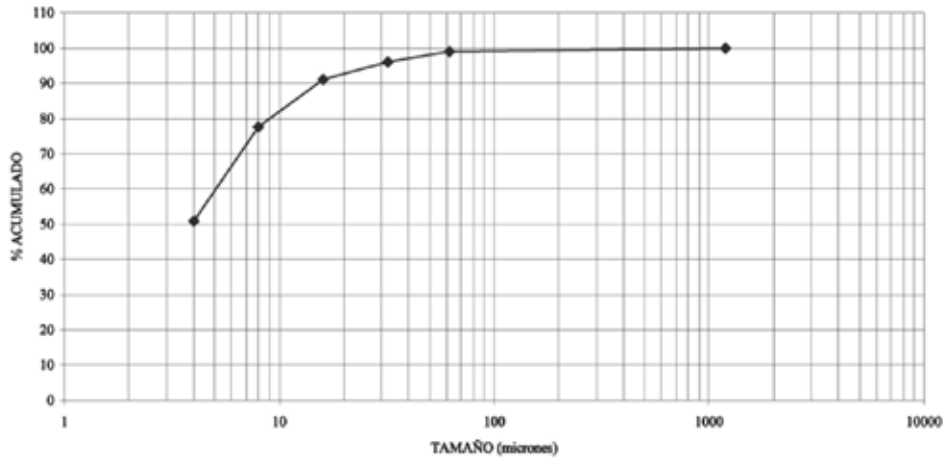
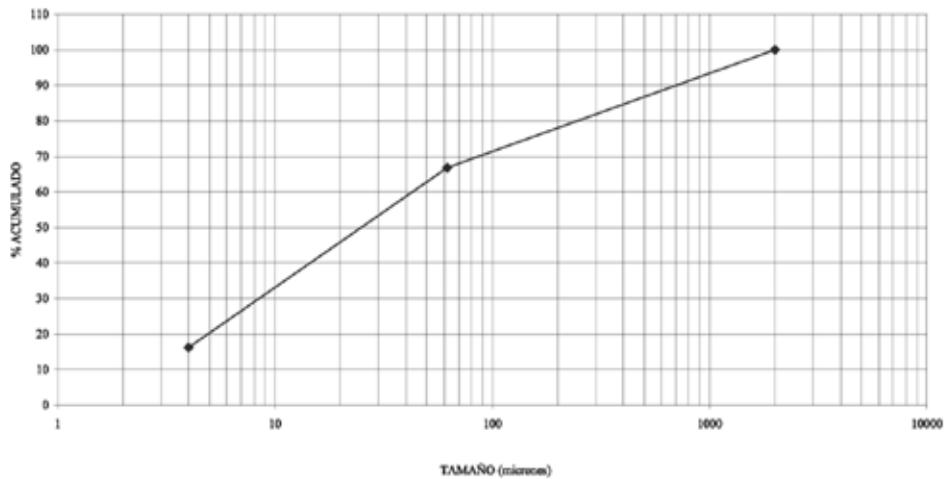


Figura n° 19

/ Figura n° 20

COMPOSICIÓN GRANOMÉTRICA - SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN.
EL ANGOSTO - EL PORTILLO - RÍO IRUYA - JULIO 76 A JULIO 82



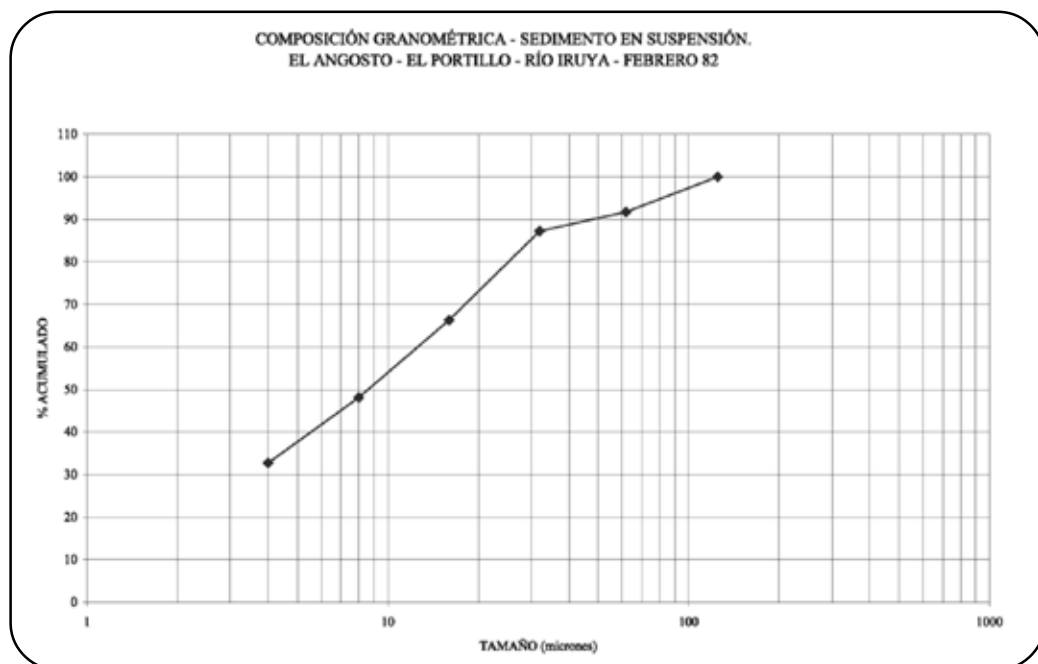
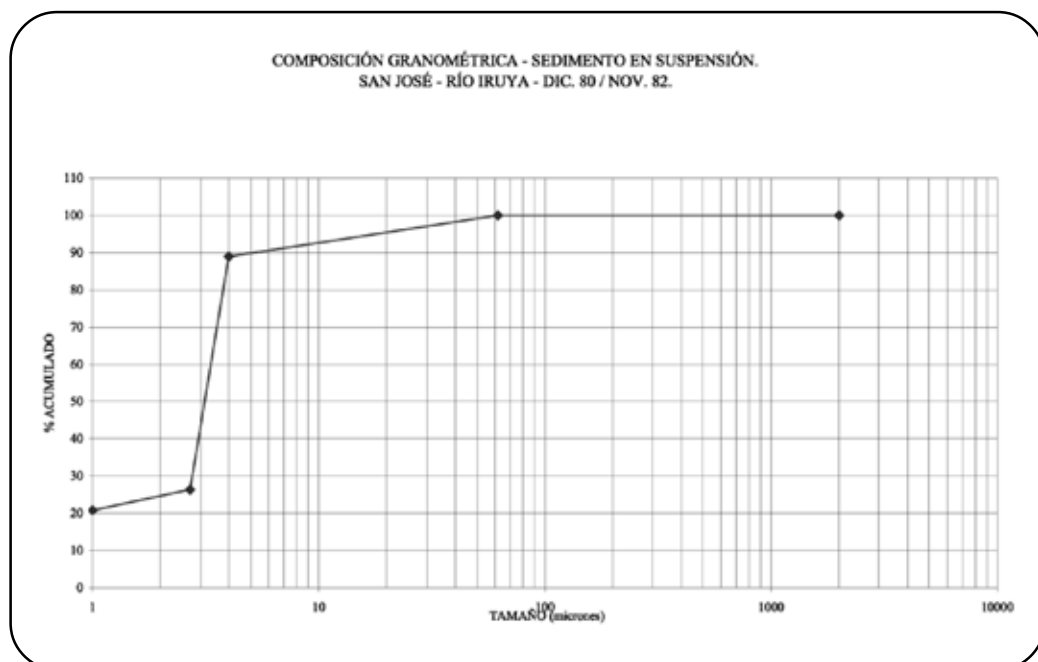


Figura n° 21

/ Figura n° 22



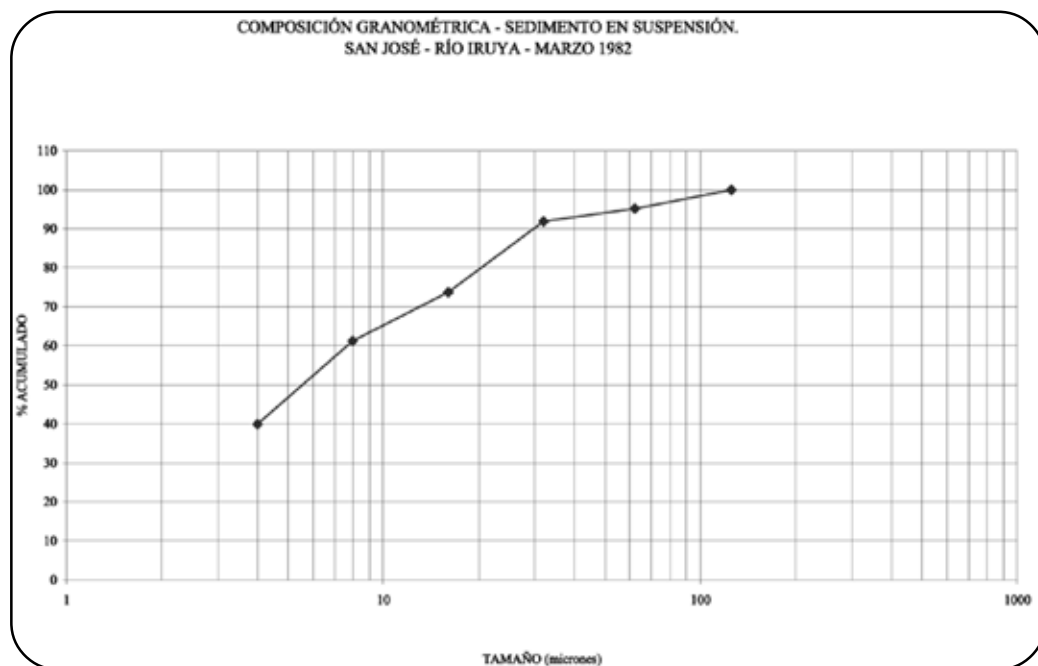
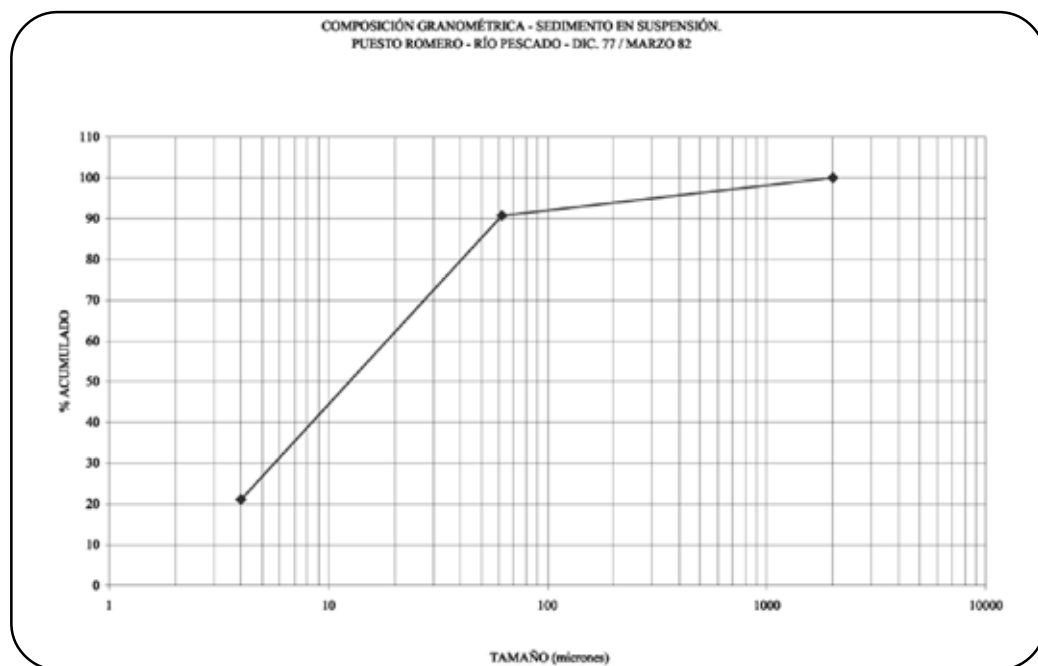


Figura n° 23

/ Figura n° 24



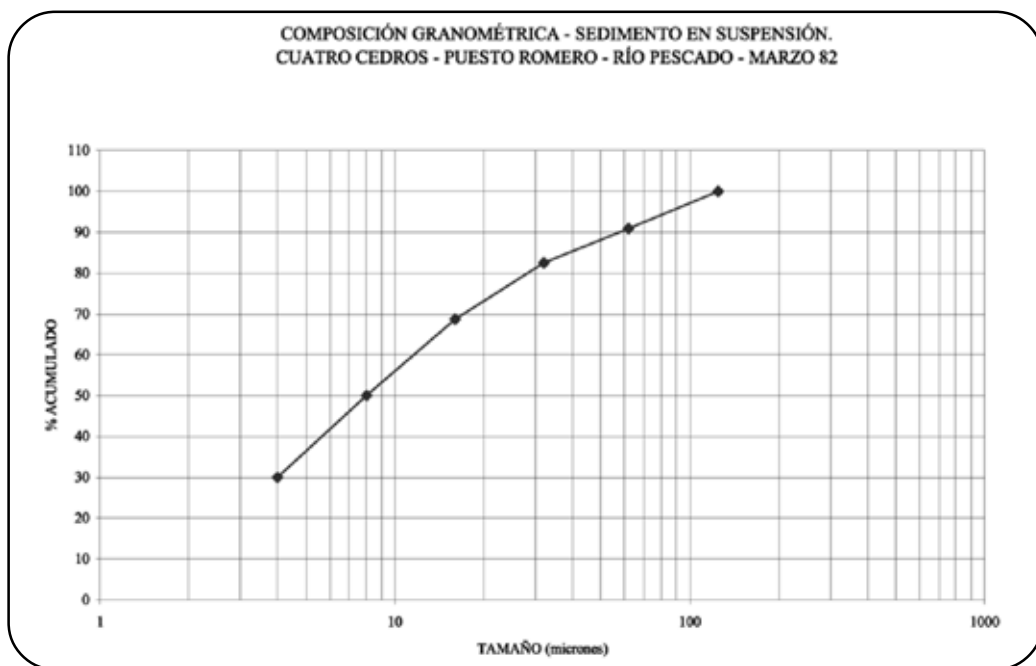
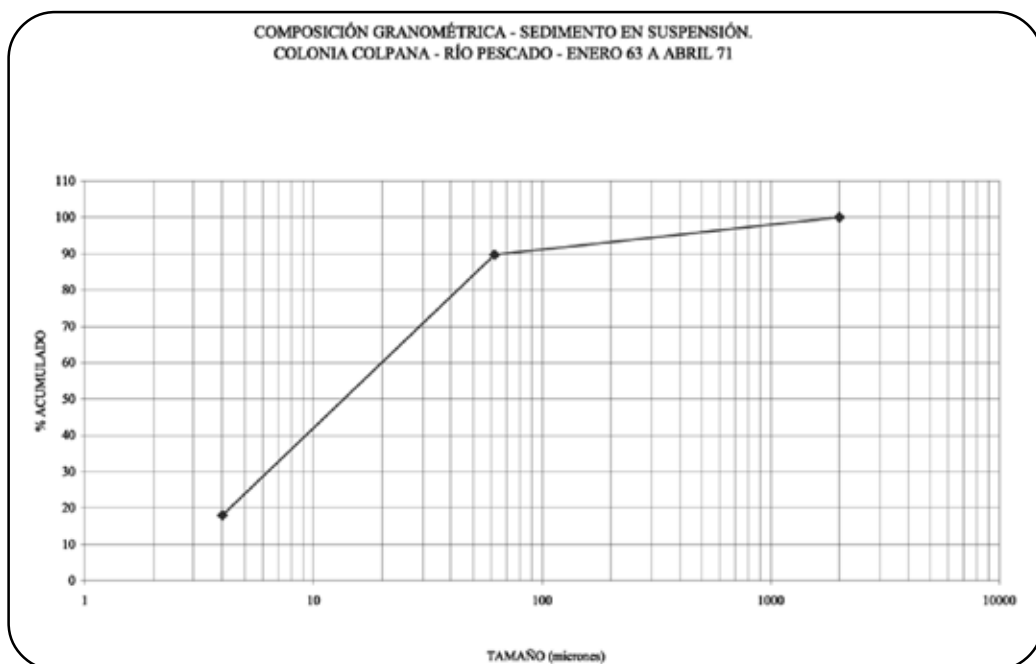


Figura nº 25

/ Figura nº 26



COMPOSICIÓN GRANOMÉTRICA - SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN.
PUENTE CARRETERO - RÍO SAN FRANCISCO - 28 AL 31 /3/82

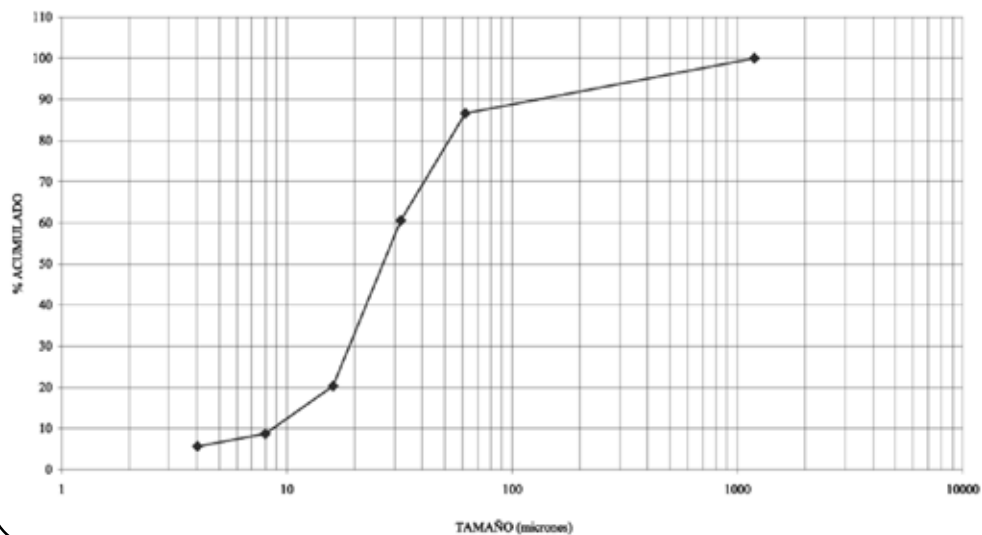
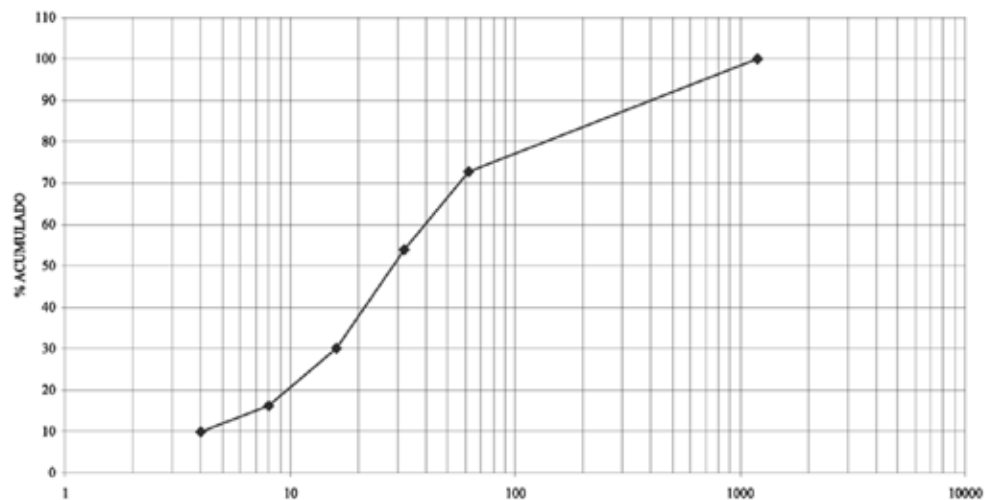


Figura n° 27

/ Figura n° 28

COMPOSICIÓN GRANOMÉTRICA - SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN.
PEÑA ALTA - RÍO VALLE GRANDE - 21/1/82



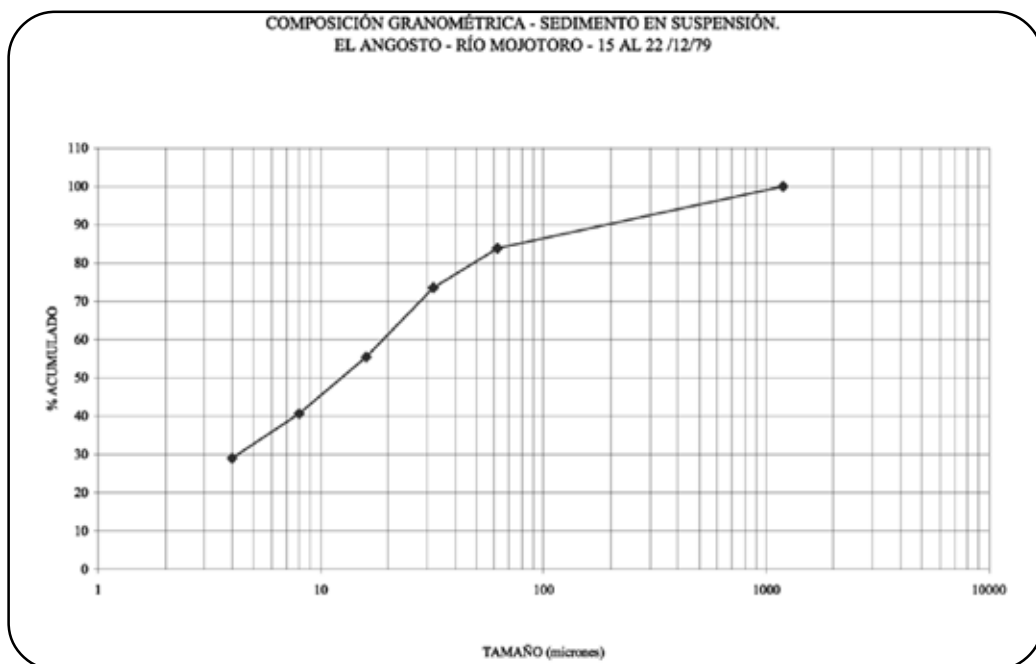
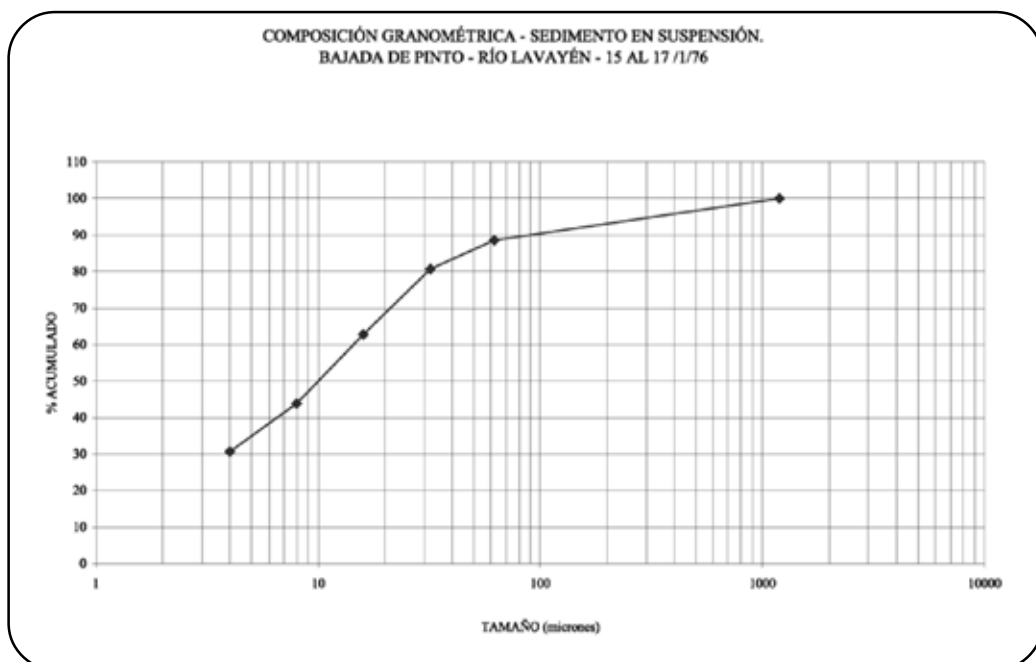


Figura n° 29

/ Figura n° 30



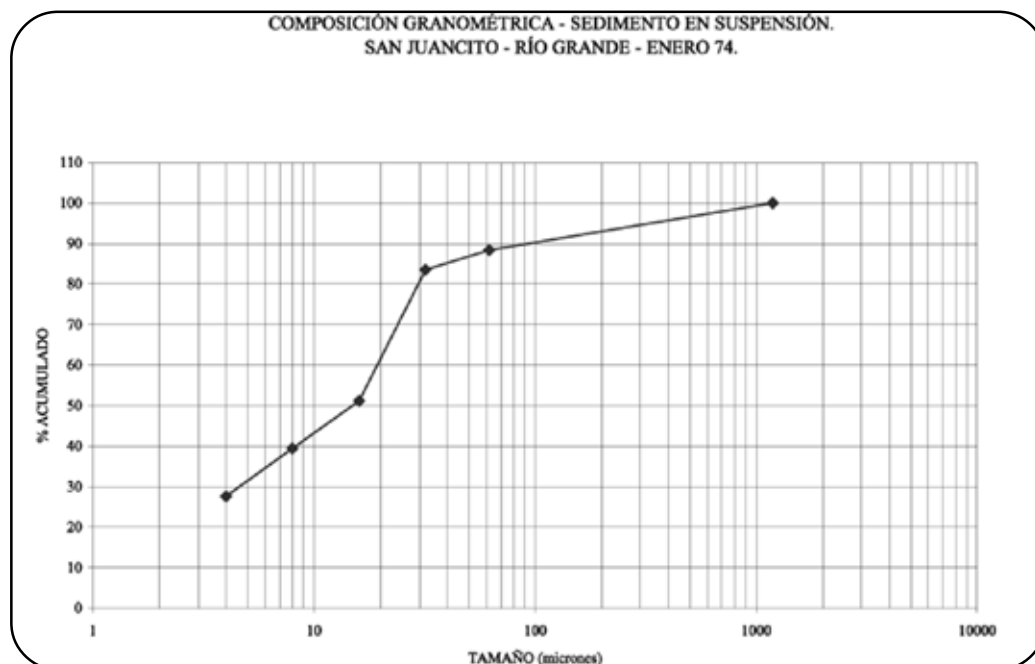
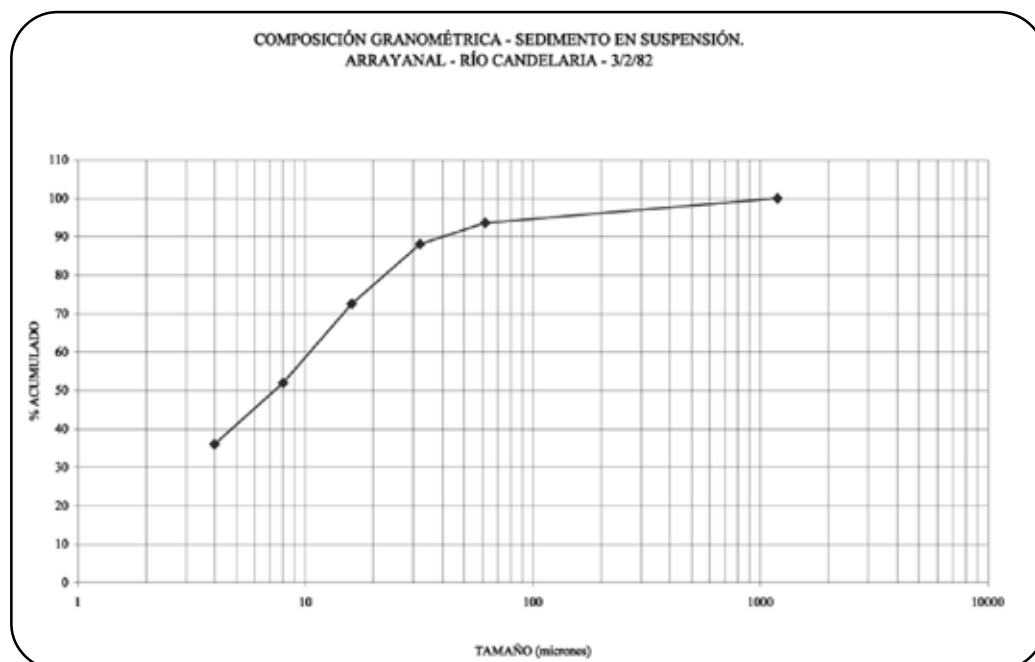


Figura n° 31

/ Figura n° 32



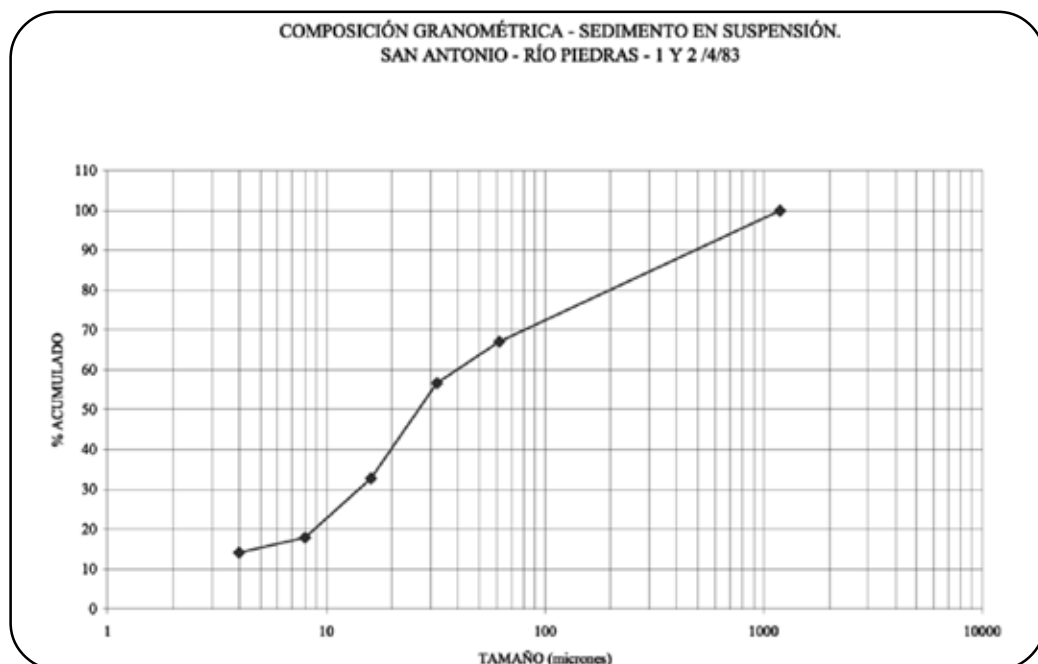
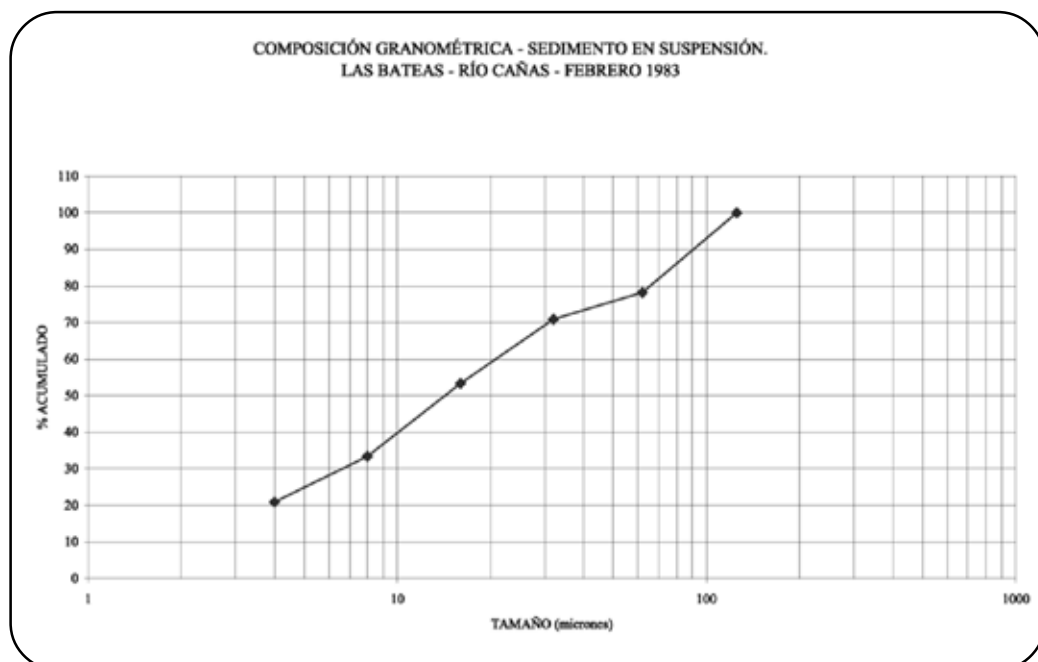


Figura n° 33

/ Figura n° 34



COMPOSICIÓN GRANOMÉTRICA - SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN.
EL ANGOSTO - RÍO ASTILLEROS - MARZO 1983

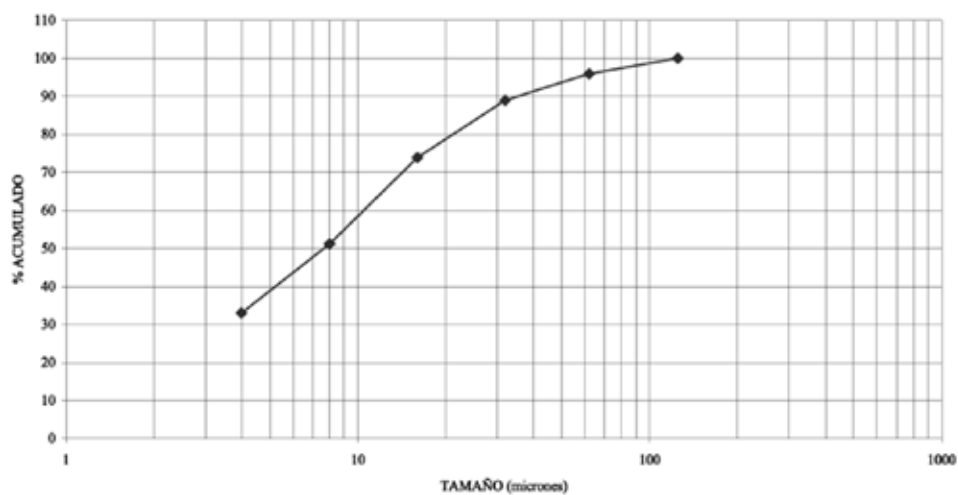
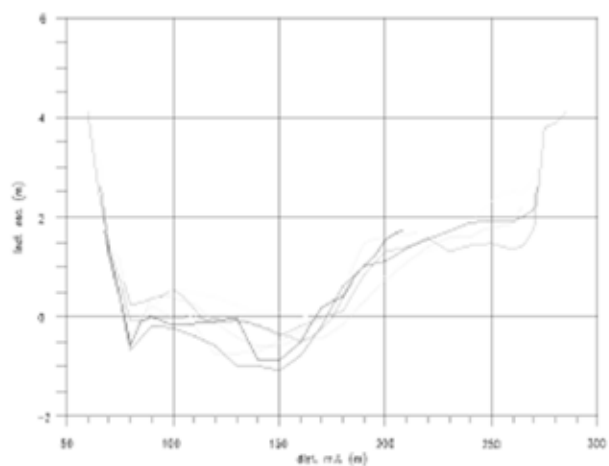


Figura n° 35

/ Figura n° 36

POZO SARMIENTO
Comparacion de la seccion con el paso de la crecida.



5/12/87 = Qm = 42 m³/s = h_{sed. elev.} = 0.78 m.
 12/02/88 = Qm = 378 m³/s = h_{sed. elev.} = 2.18 m.
 12/02/88 = Qm = 388 m³/s = h_{sed. elev.} = 2.25 m.
 12/03/88 = Qm = 1022 m³/s = h_{sed. elev.} = 2.42 m.
 24/03/88 = Qm = 2487 m³/s = h_{sed. elev.} = 4.11 m.
 11/04/88 = Qm = 228 m³/s = h_{sed. elev.} = 3.23 m.

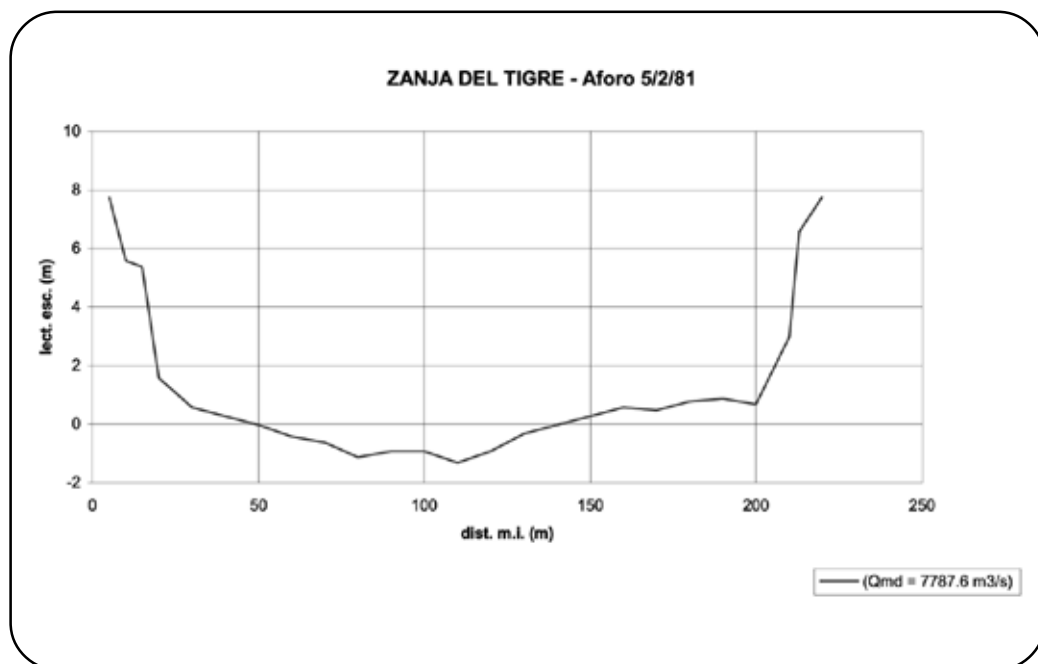
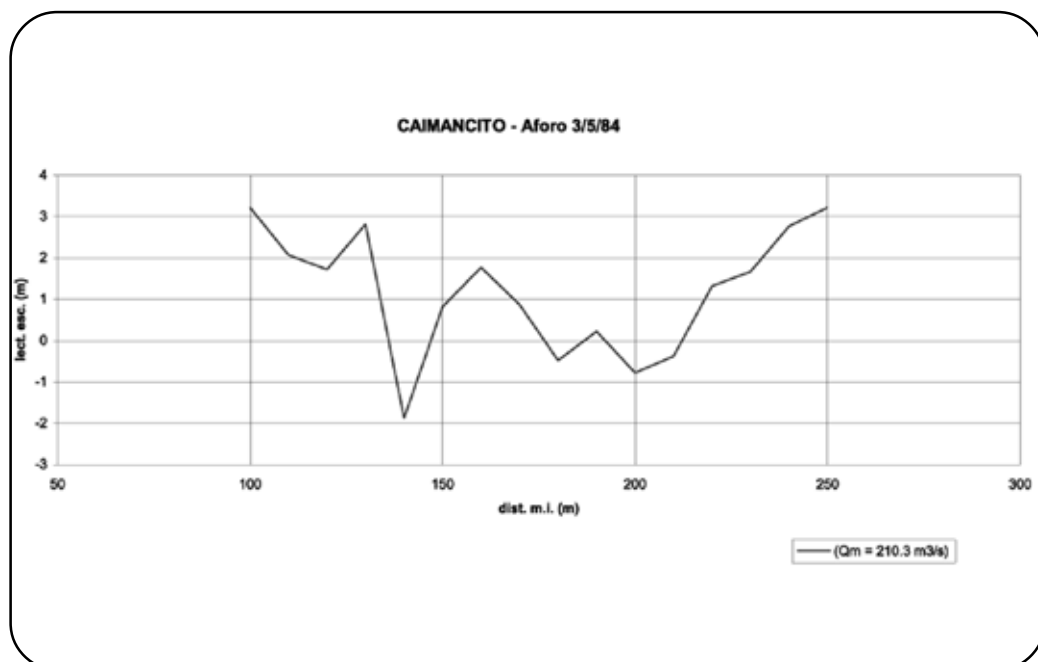
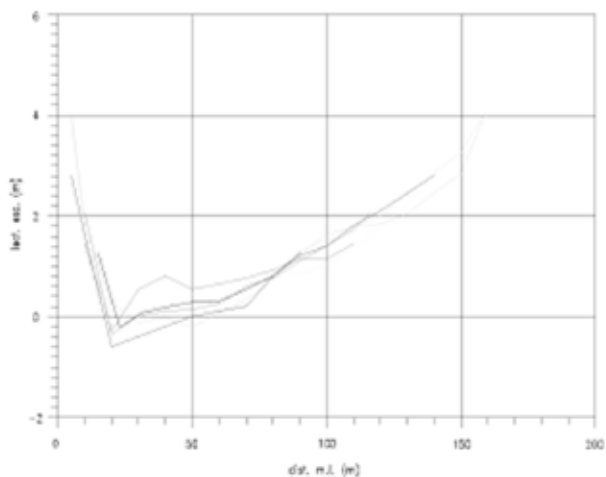


Figura n° 37

/ Figura n° 38



AGUAS BLANCAS Comparacion seccion crecida 80/81

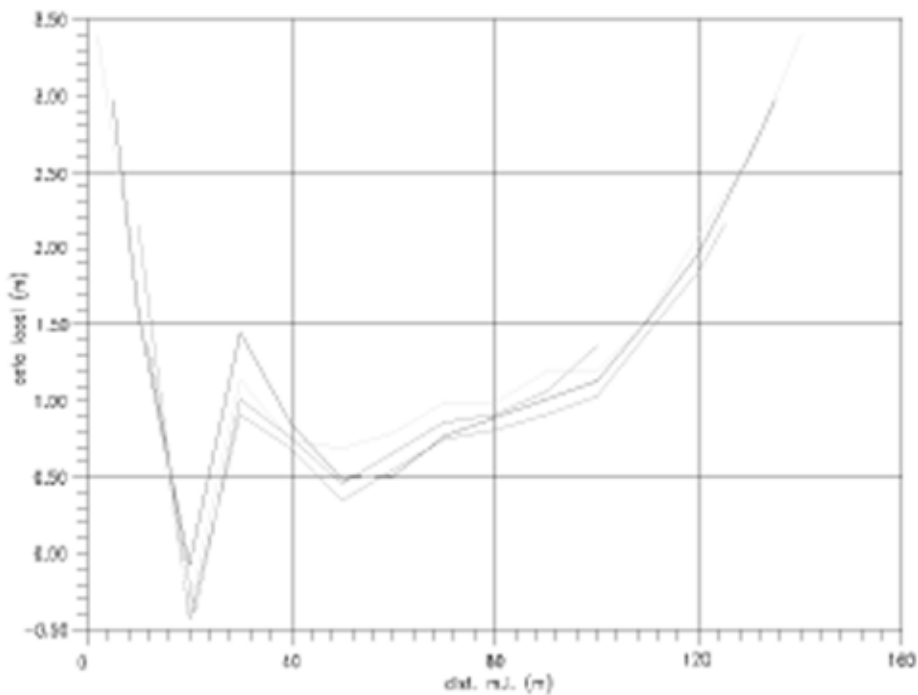


29/12/80 - Qm = 31 m³/s - Levl. asc. = 1.45 m.
24/01/81 - Qm = 1484 m³/s - Levl. asc. = 4.02 m.
15/02/81 - Qm = 1213 m³/s - Levl. asc. = 3.97 m.
24/03/81 - Qm = 579 m³/s - Levl. asc. = 2.81 m.
30/04/81 - Qm = 181 m³/s - Levl. asc. = 2.07 m.

Figura n° 39

/ Figura n° 40

AGUAS BLANCAS Comparacion de la seccion durante el paso de la crecida.



20/10/83 - Qm = 16.5 m³/s - Levl. asc. = 1.28 m.
5/12/83 - Qm = 168 m³/s - Levl. asc. = 2.15 m.
28/01/84 - Qm = 782 m³/s - Levl. asc. = 3.09 m.
1/03/84 - Qm = 438 m³/s - Levl. asc. = 2.97 m.

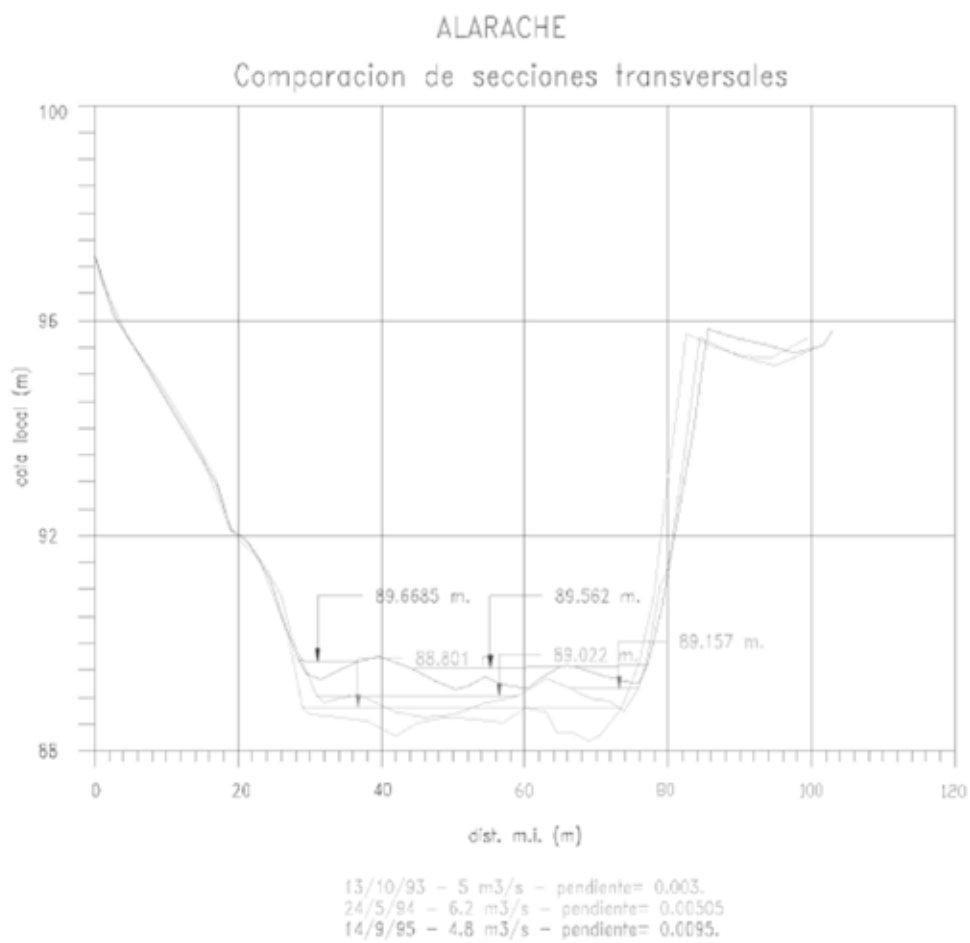


Figura n° 41

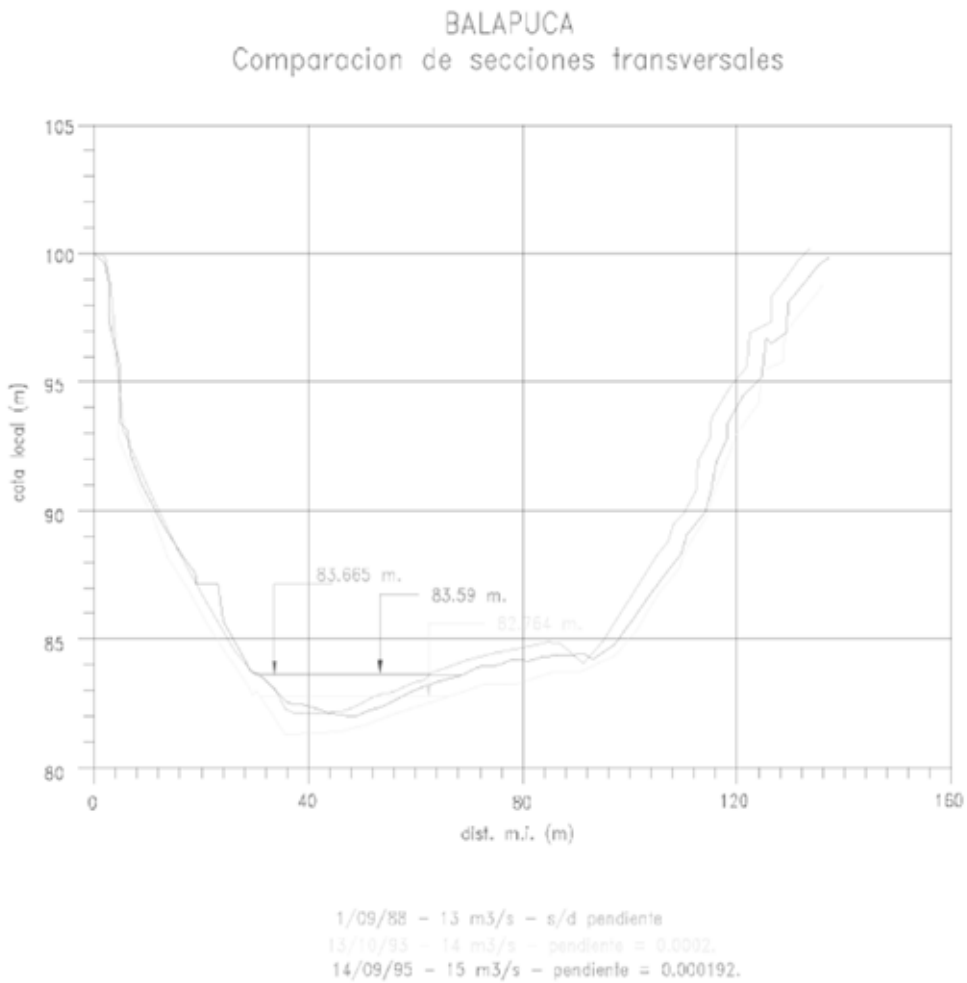
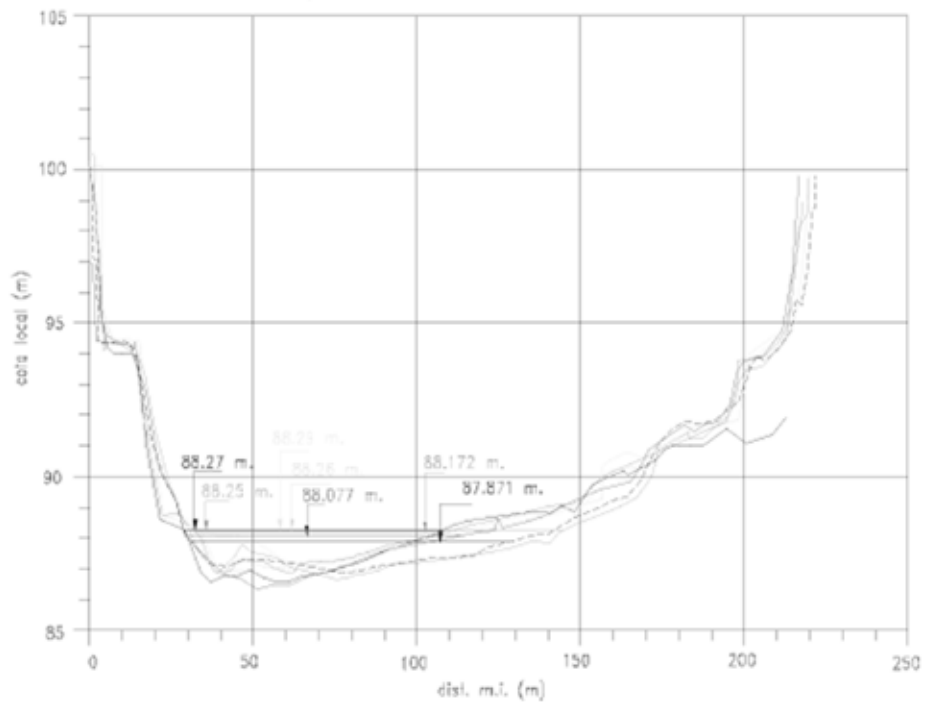


Figura n° 42

AGUAS BLANCAS Comparacion de secciones transversales



30/8/88 - 16 m³/s - s/d pendiente.
 29/5/90 - 34 m³/s - s/d pendiente
 15/6/92 - s/d caudal y pendiente
 26/7/93 - 19 m³/s - pendiente = 0.0002
 18/6/94 - 22 m³/s - pendiente = 0.000105
 13/9/95 - 20 m³/s - pendiente = 0.00024
 ----- 5/9/97 - pendiente = 0.000223

Figura n° 43

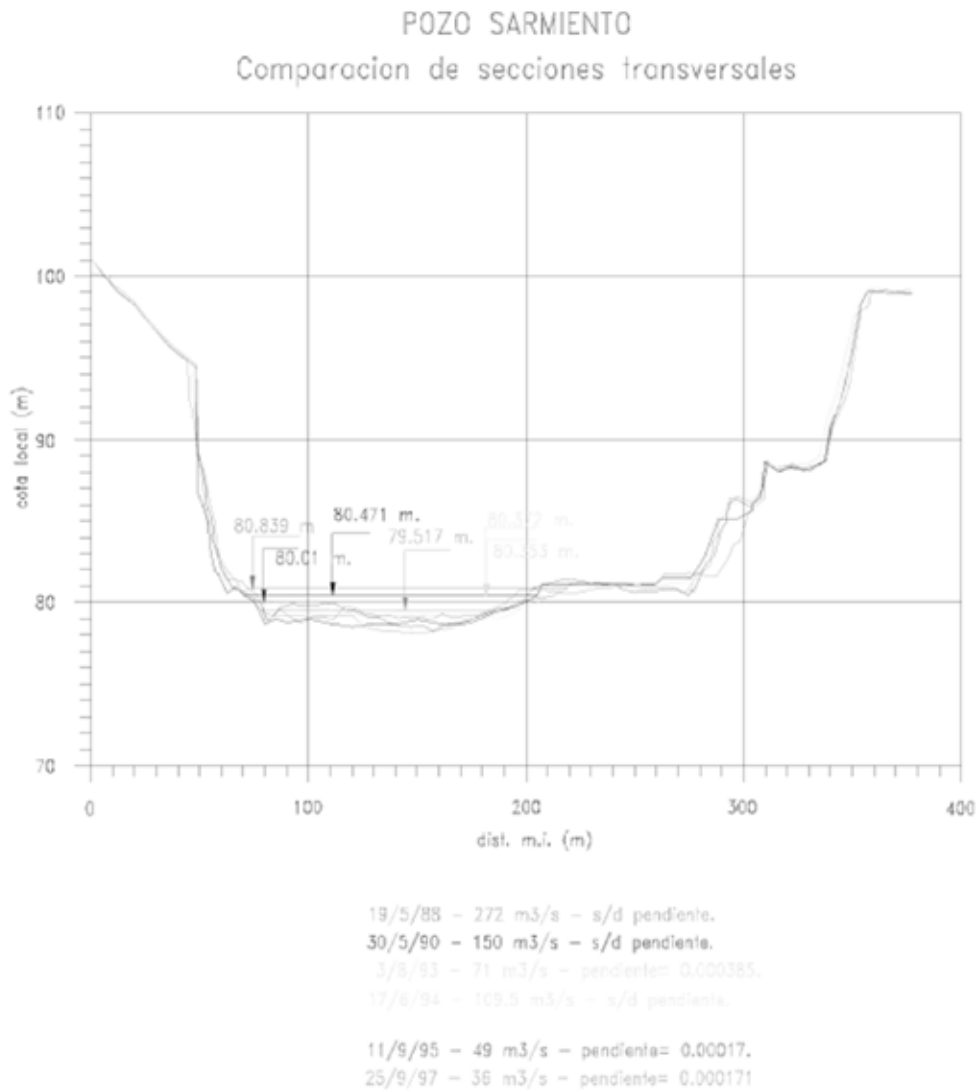
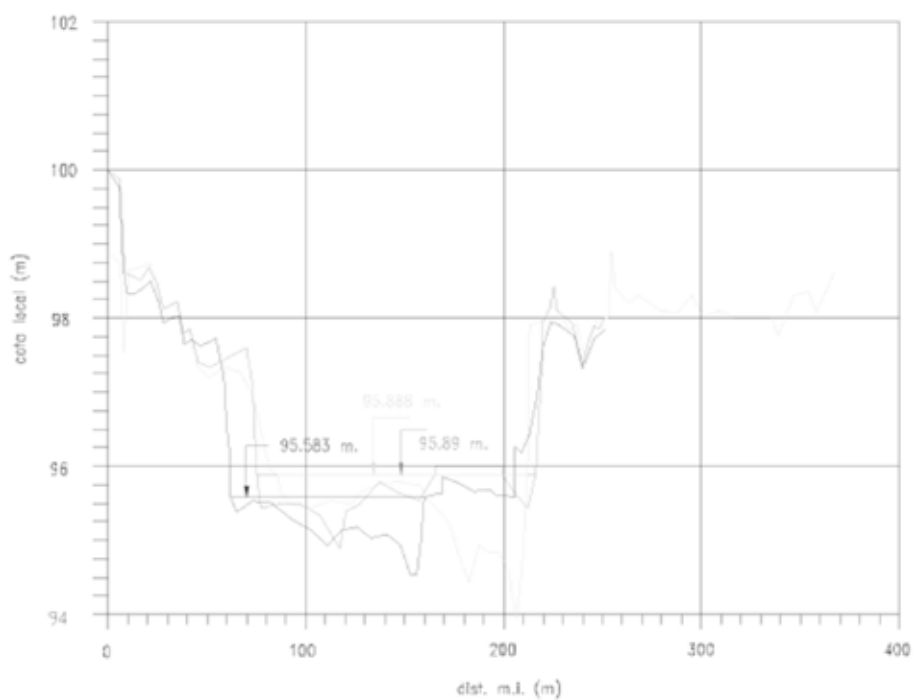


Figura n° 44

CAIMANCITO Comporacion de secciones transversales



4/8/95 - 32 m³/s - pendiente= 0.000631.
15/9/95 - 22 m³/s - pendiente= 0.000523.
28/8/97 - s/d caudal - pendiente= 0.00046.

Figura n° 45

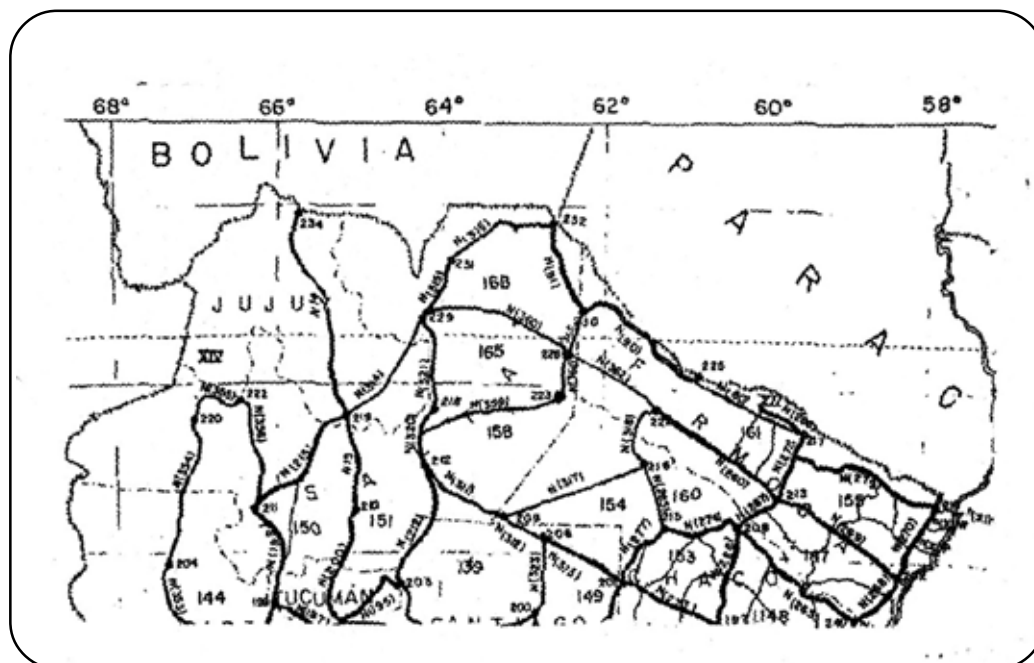
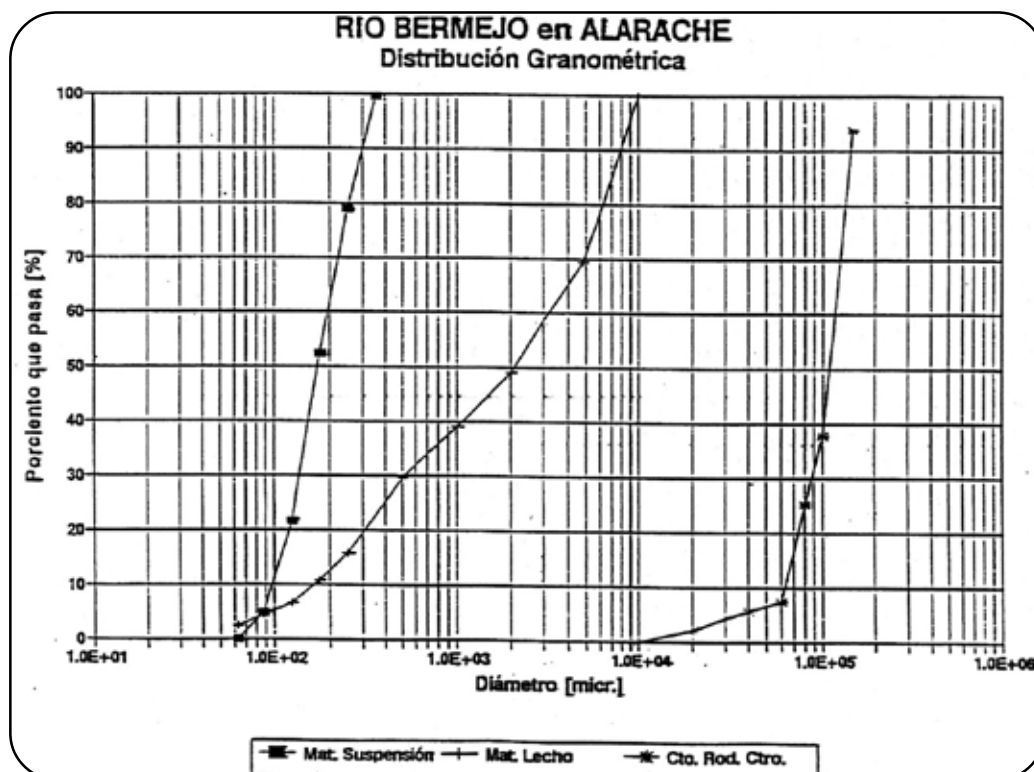


Figura n° 46

/ Figura n° 47



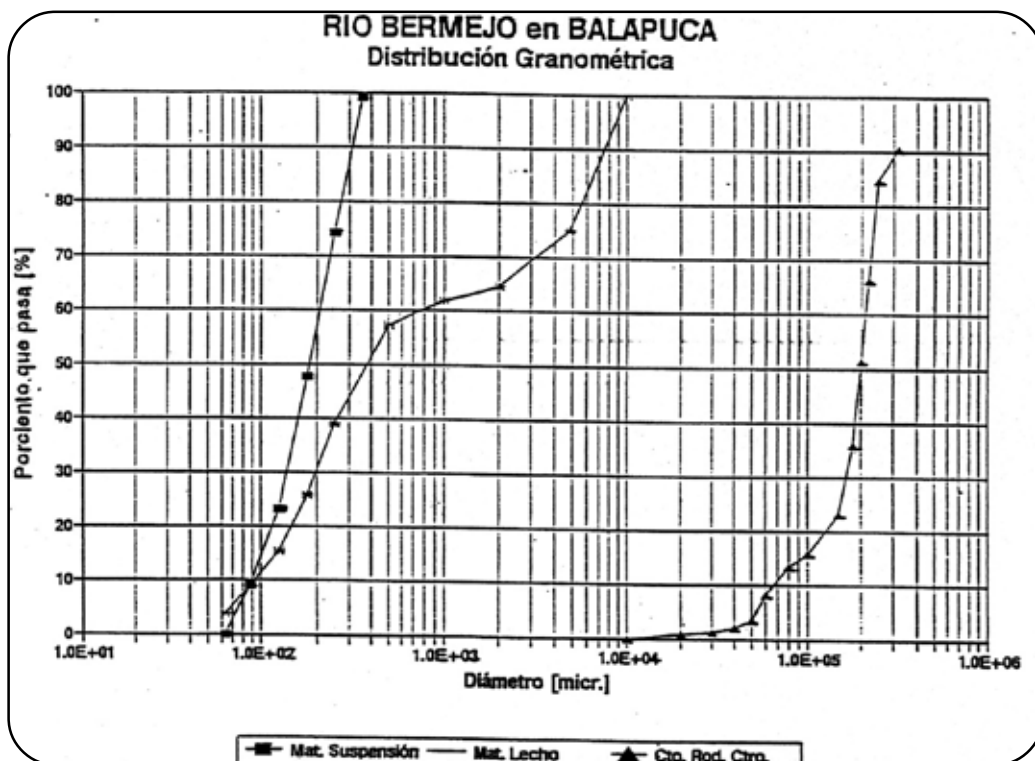
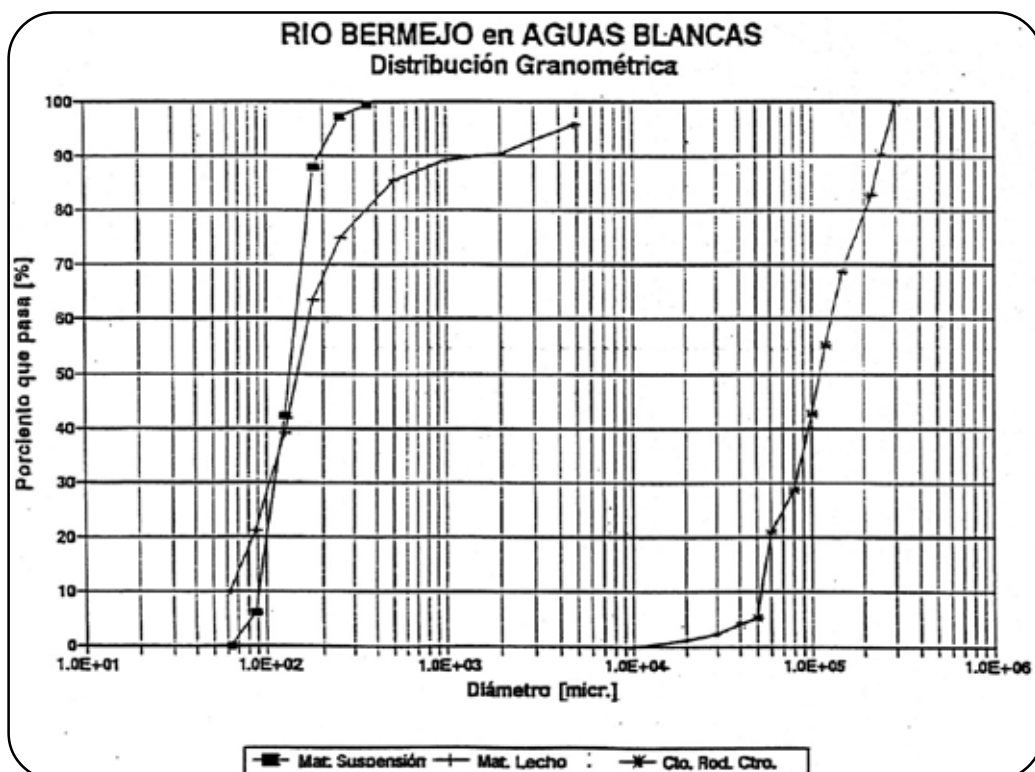


Figura n° 48

/ Figura n° 49



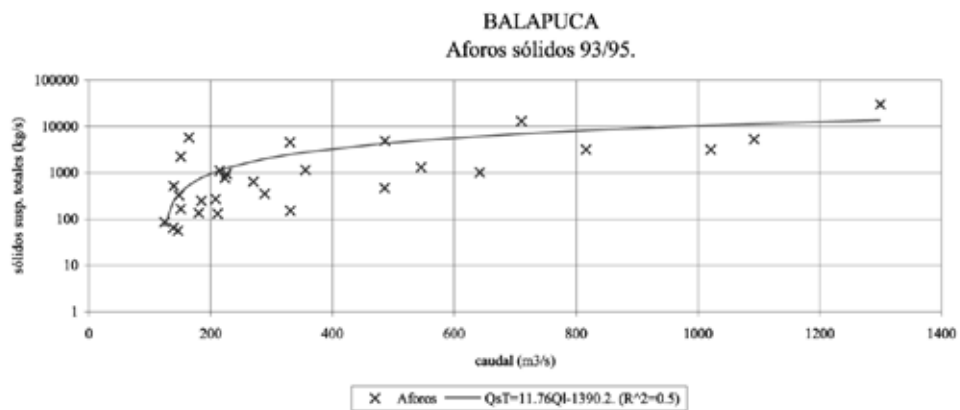
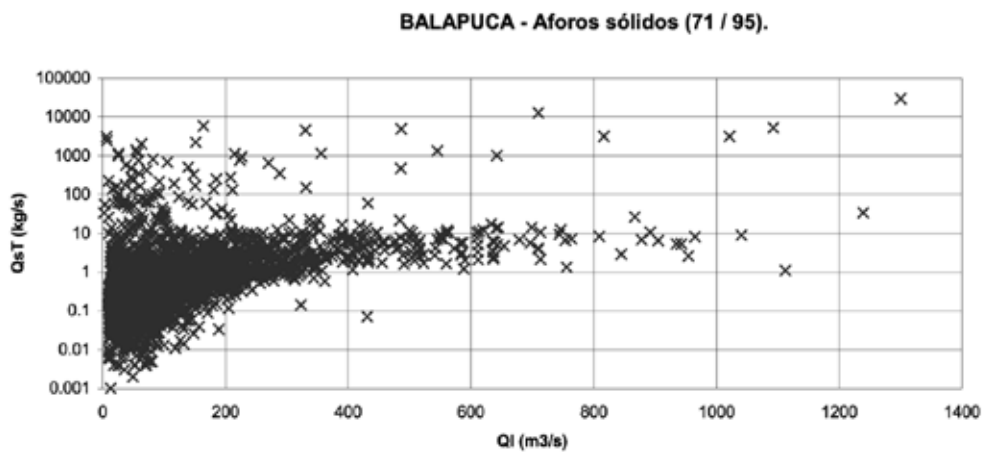


Figura n° 50

/ Figura n° 51



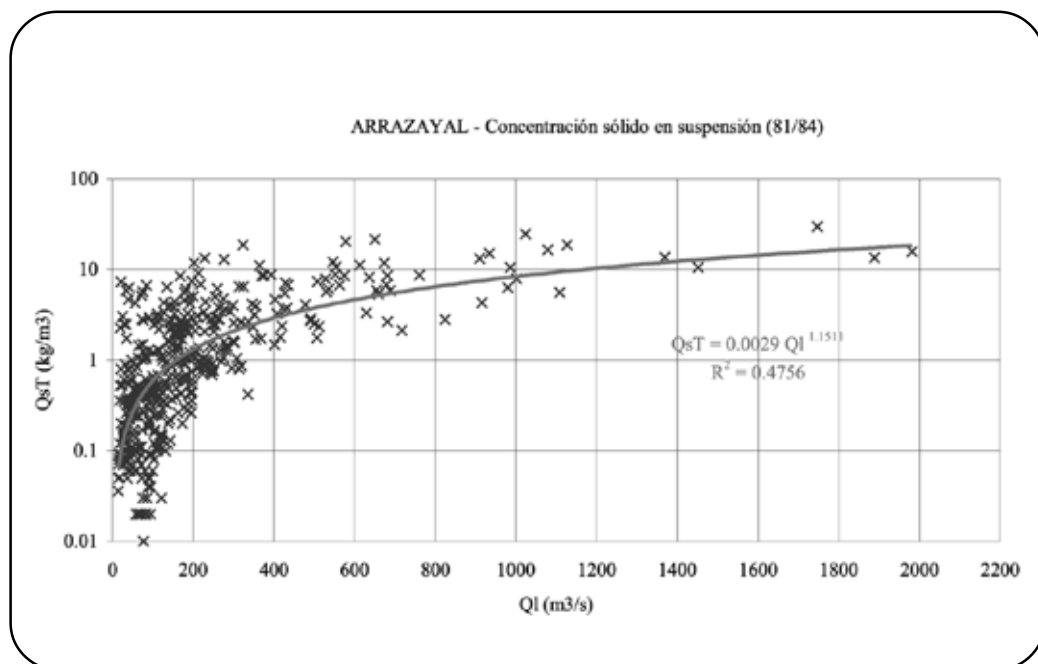
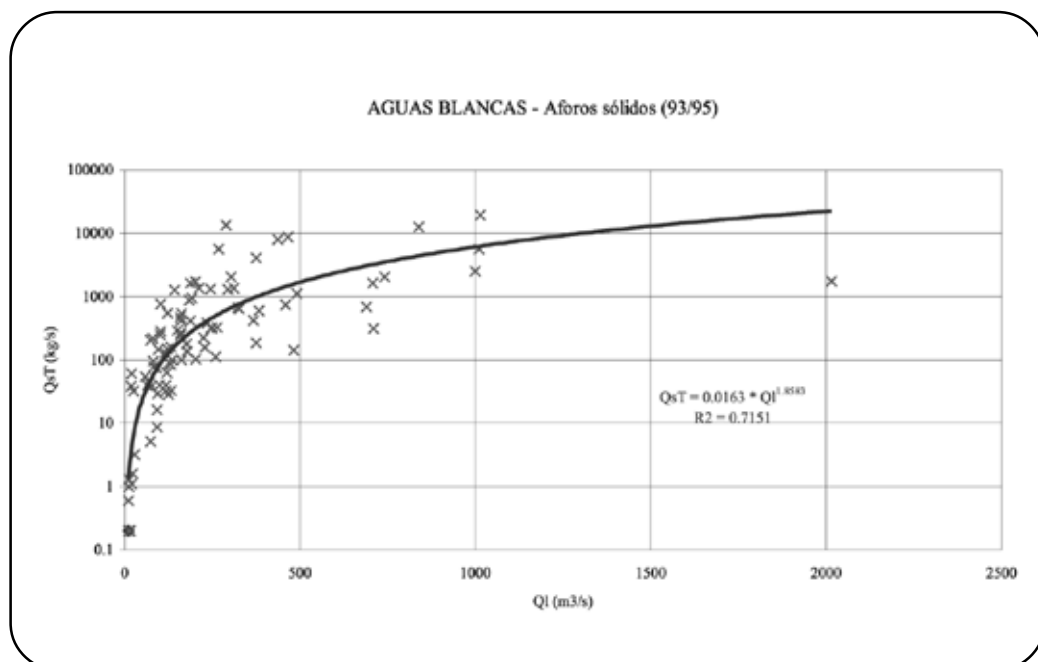


Figura n° 52

/ Figura n° 53



POZO SARMIENTO - Aforo sólido 93/95.

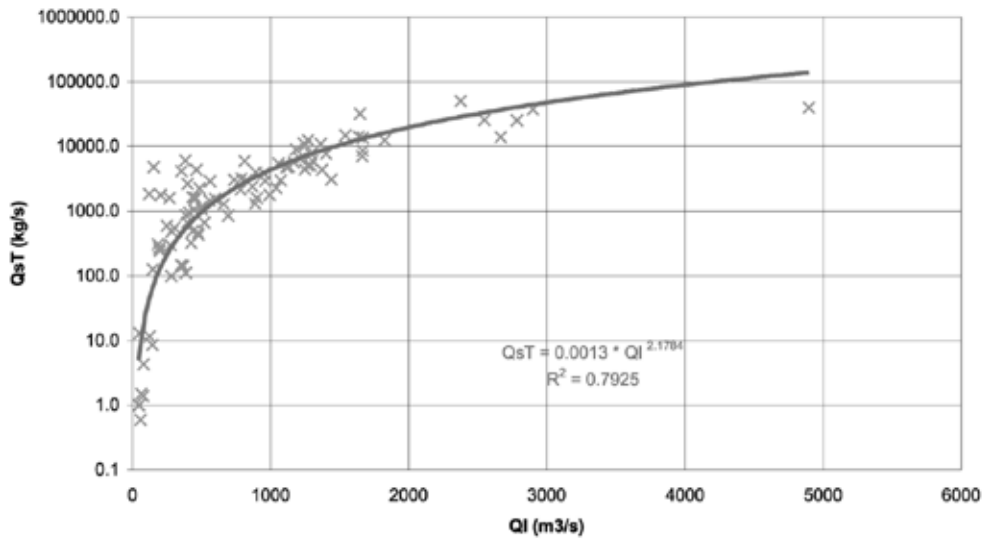
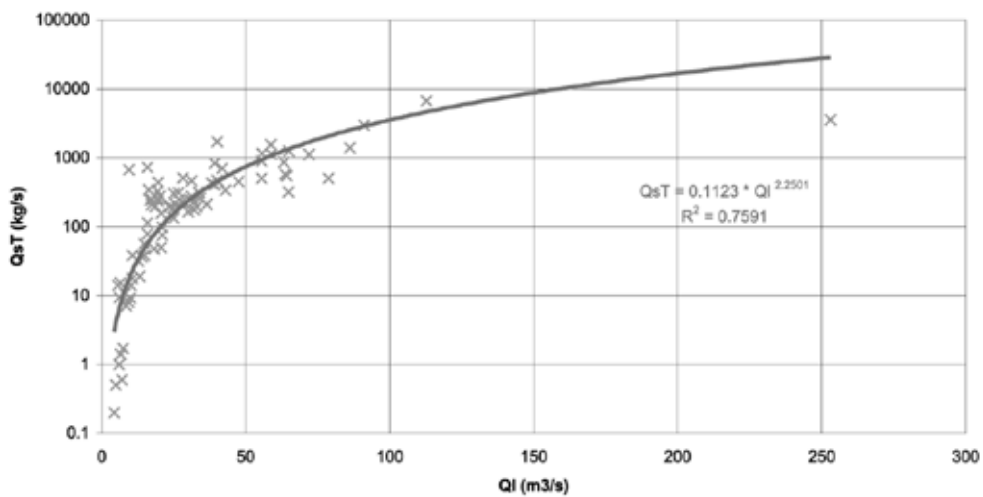


Figura n° 54

/ Figura n° 55

SAN JOSÉ - Aforo sólido 93/95.



CUATRO CEDROS - Aforo sólido 93/95.

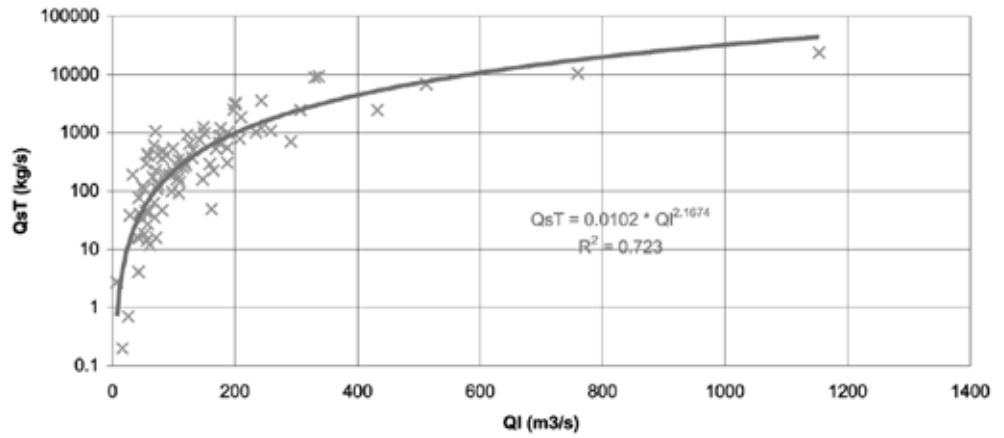
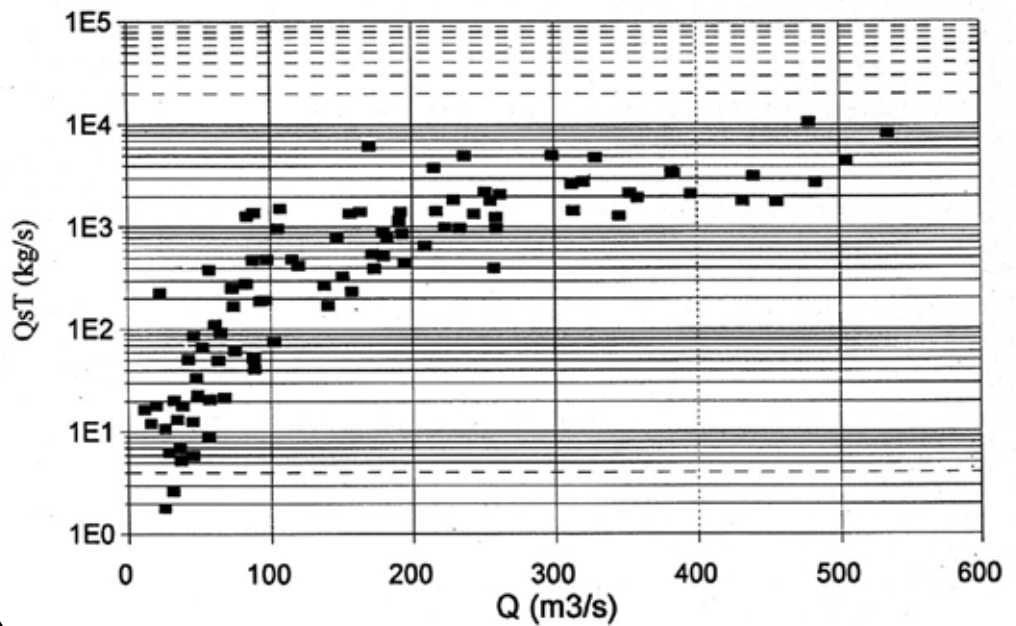


Figura n° 56

/ Figura n° 57

RIO SAN FRANCISCO EN CAIMANCITO
relación Q- Q_{sT}



ASTILLEROS - Aforos sólidos - 81/85

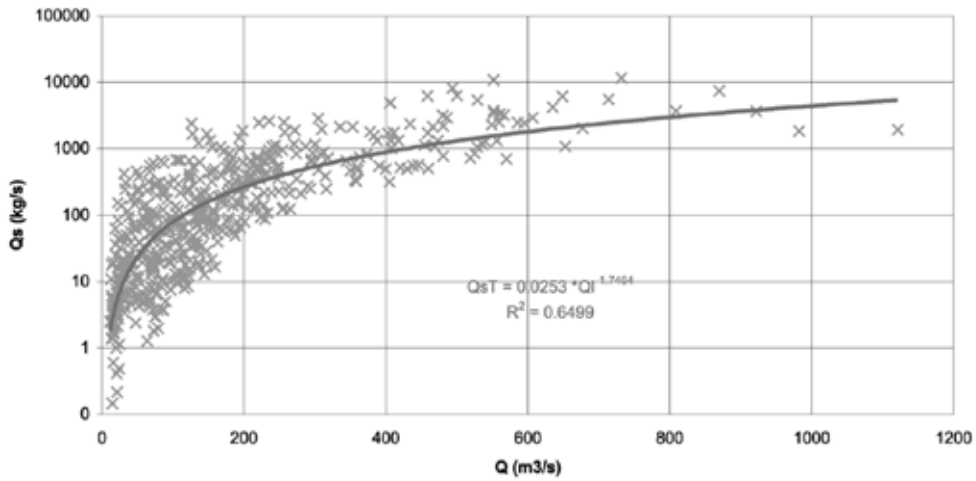
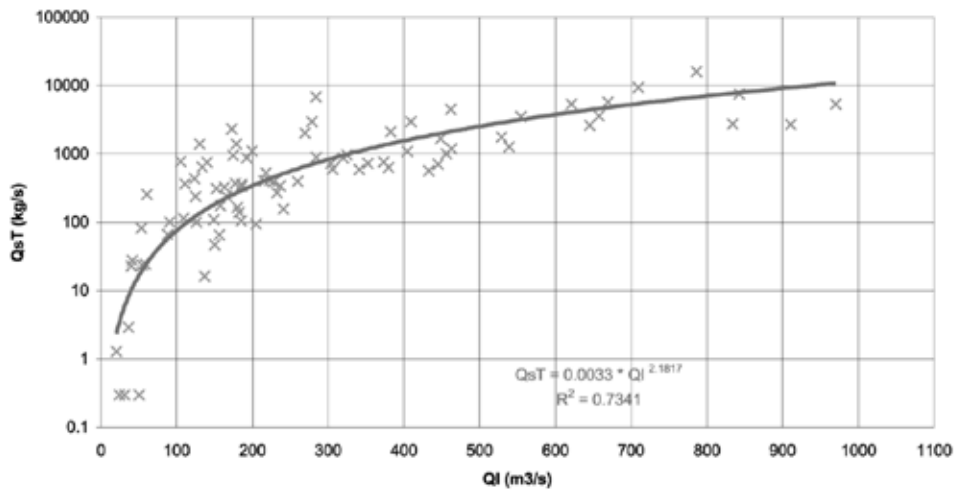


Figura n° 58

/ Figura n° 59

SAN TELMO - Aforo sólido 93/95.



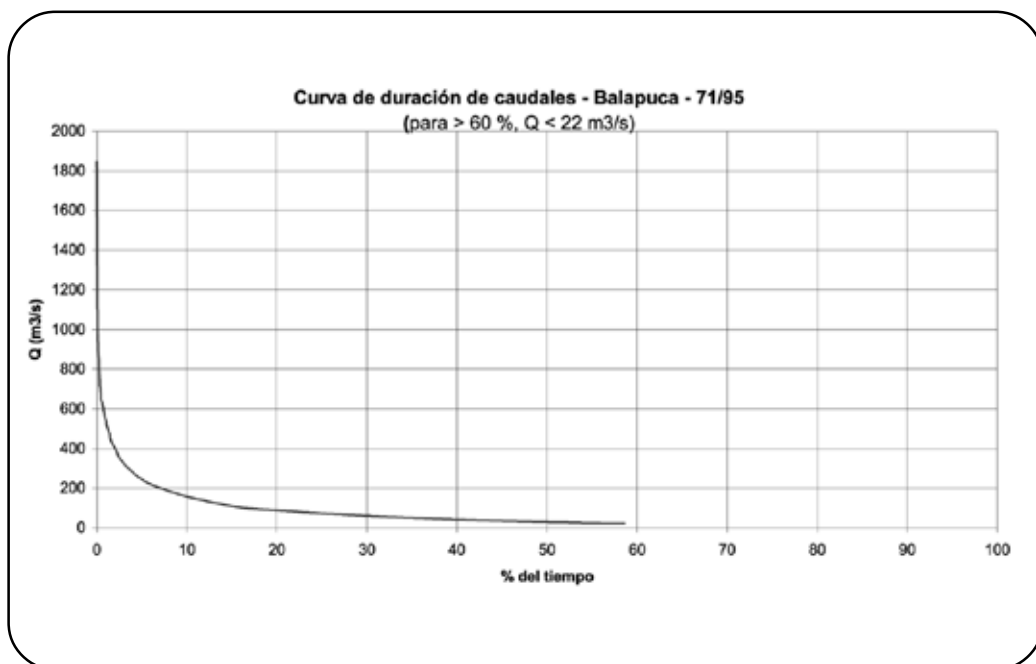
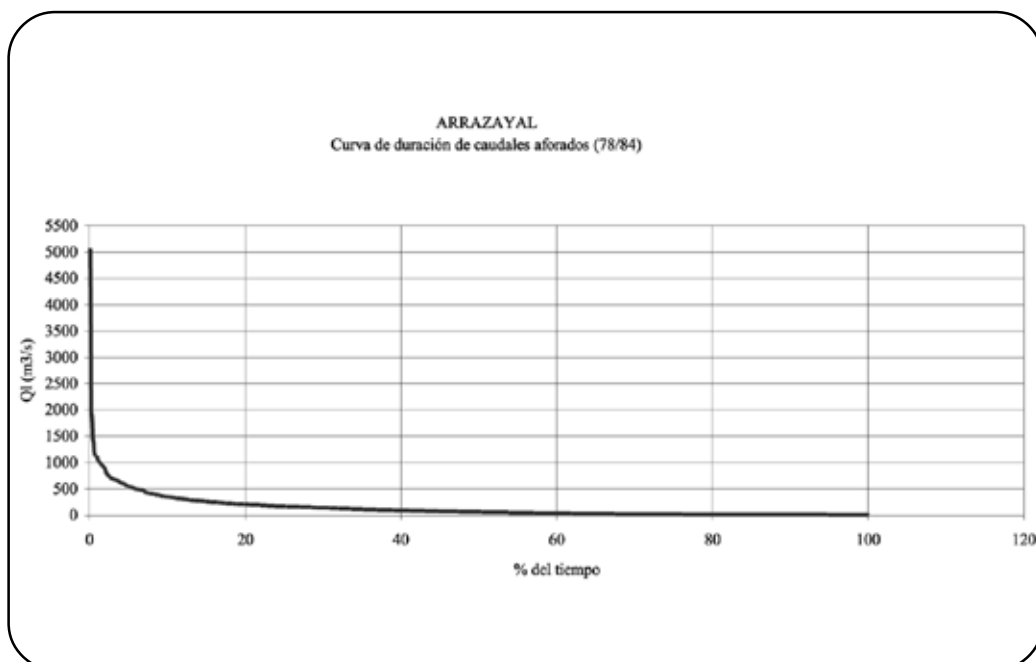


Figura n° 60

/ Figura n° 61



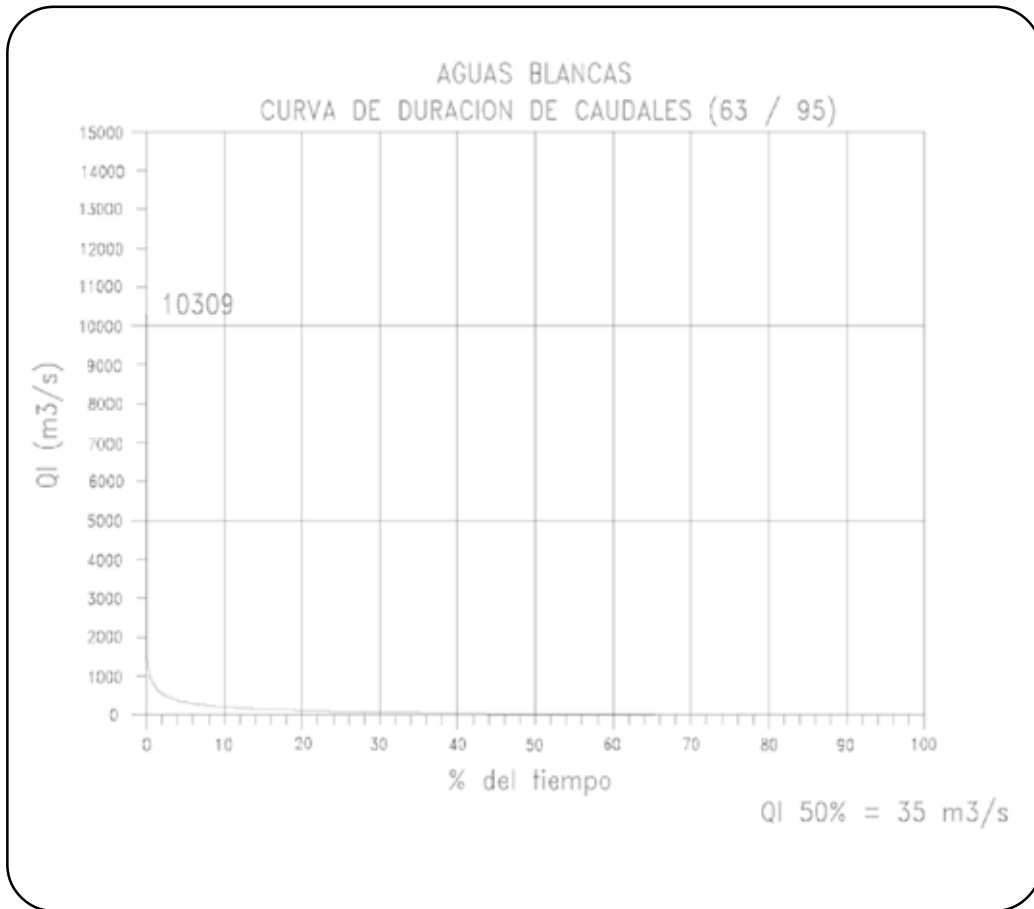
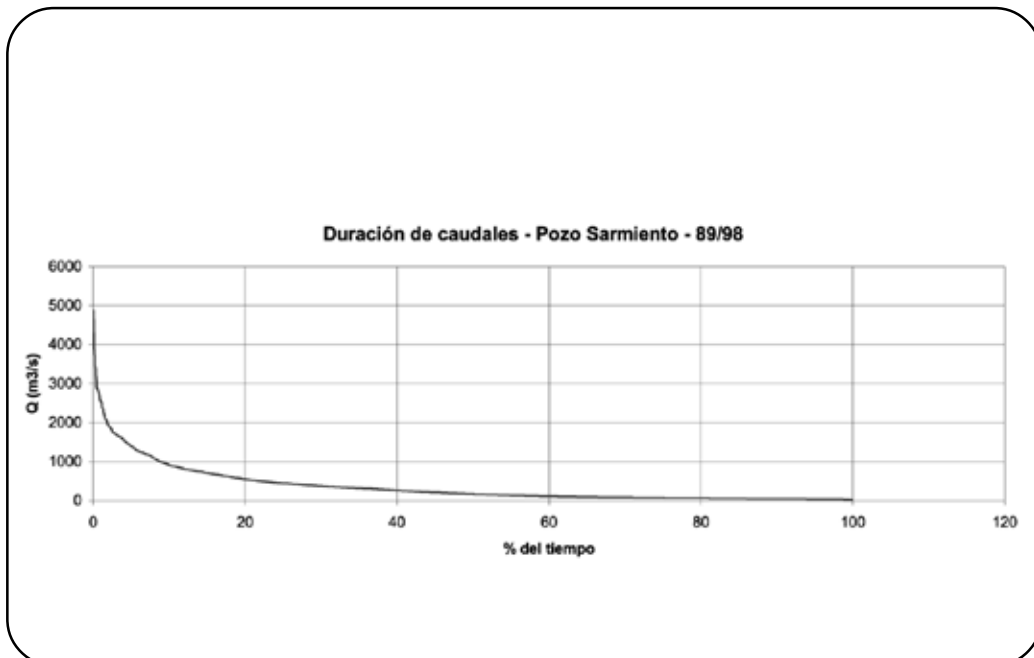


Figura n° 62

/ Figura n° 63



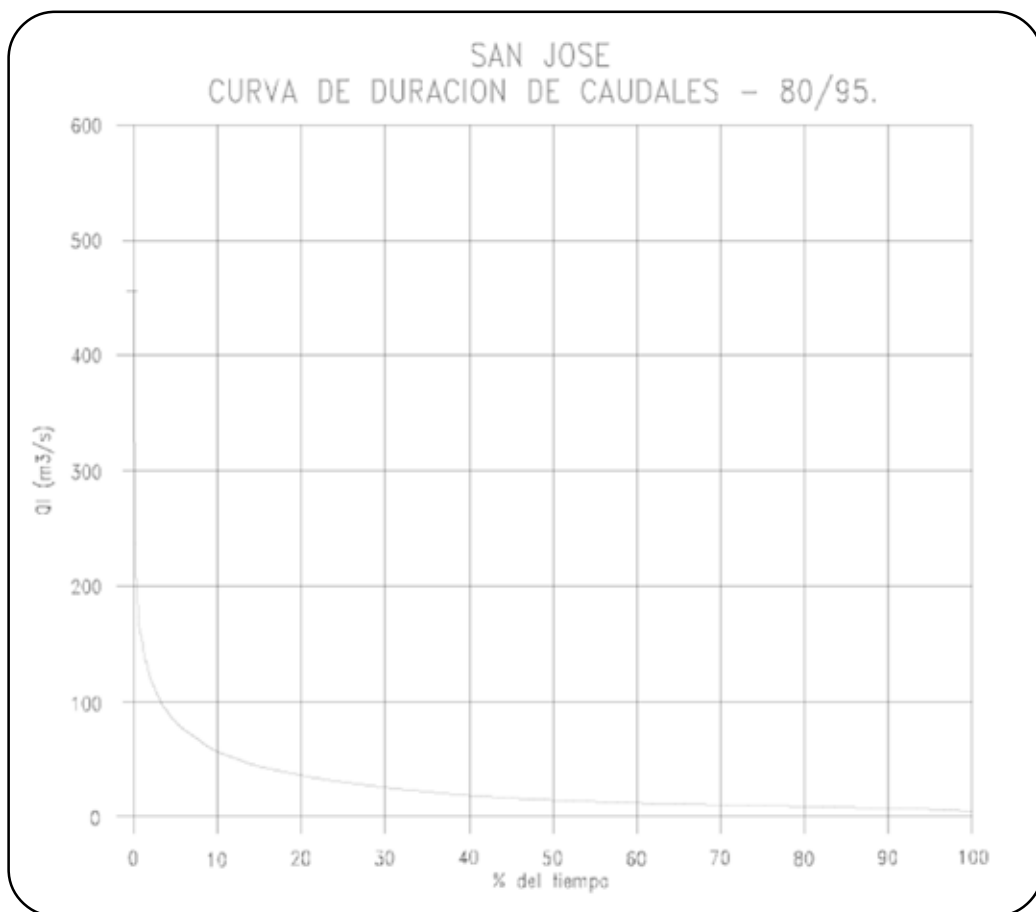
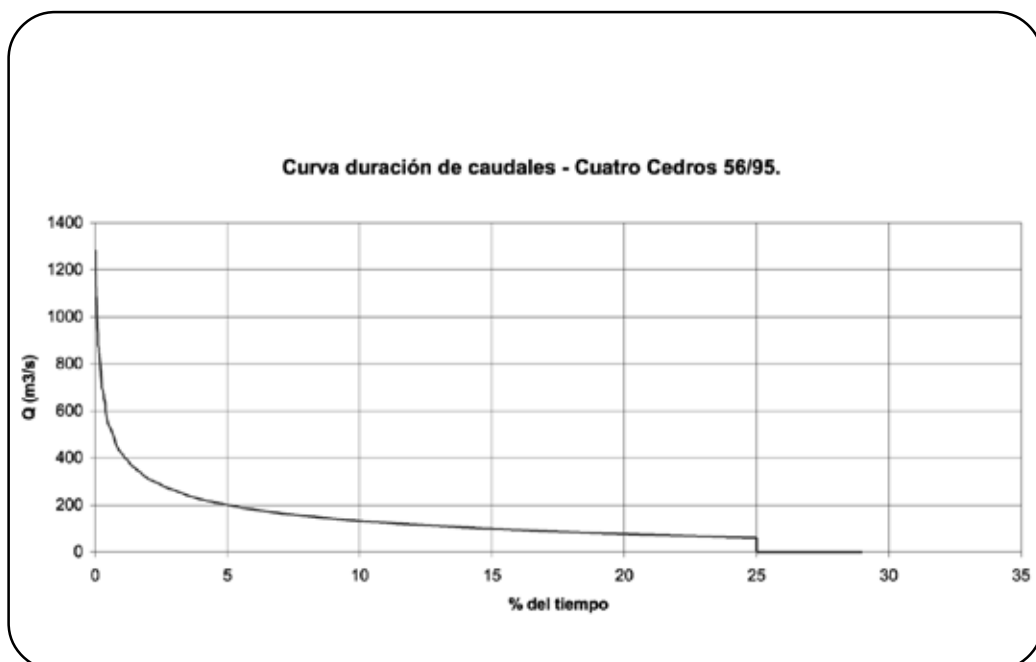


Figura n° 64

/ Figura n° 65



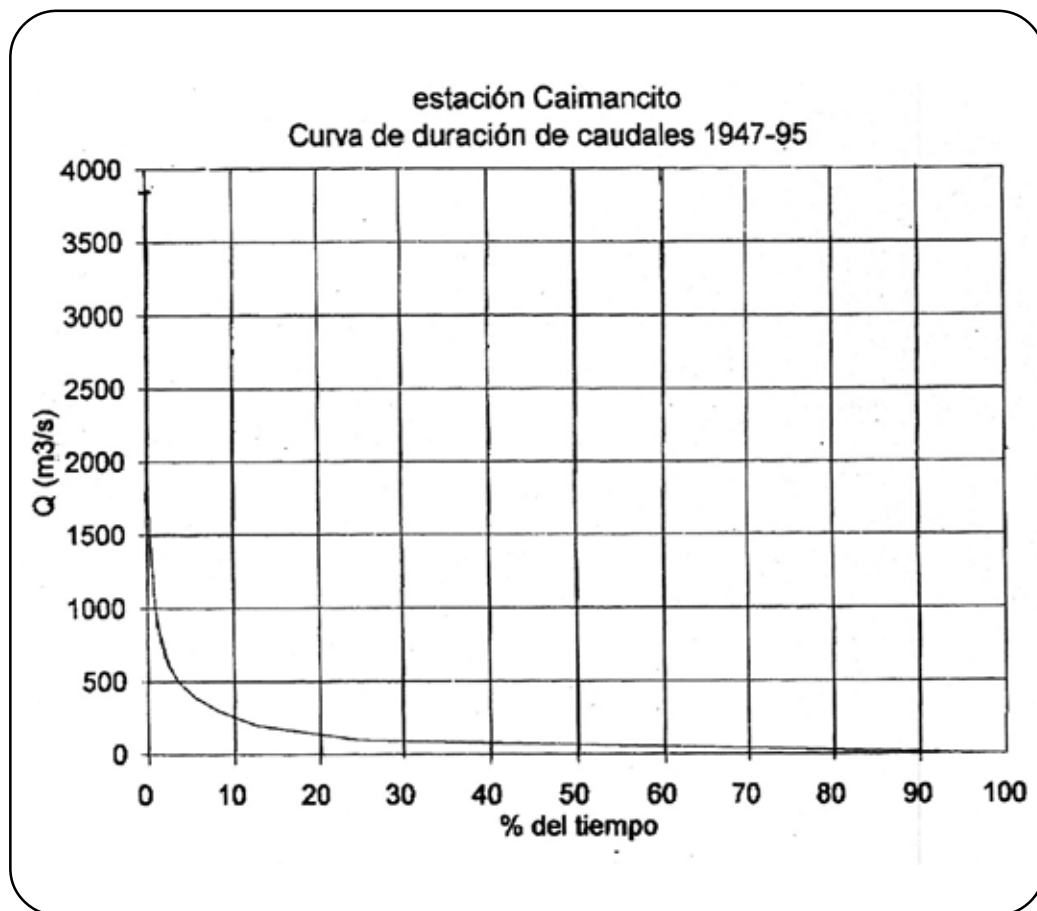
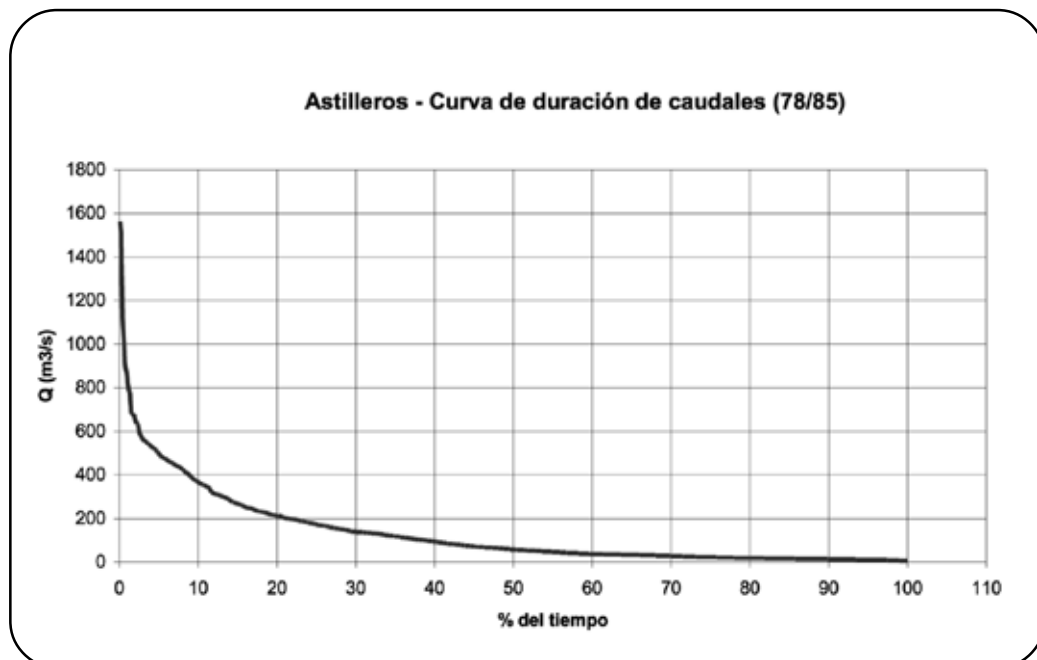


Figura n° 66

/ Figura n° 67



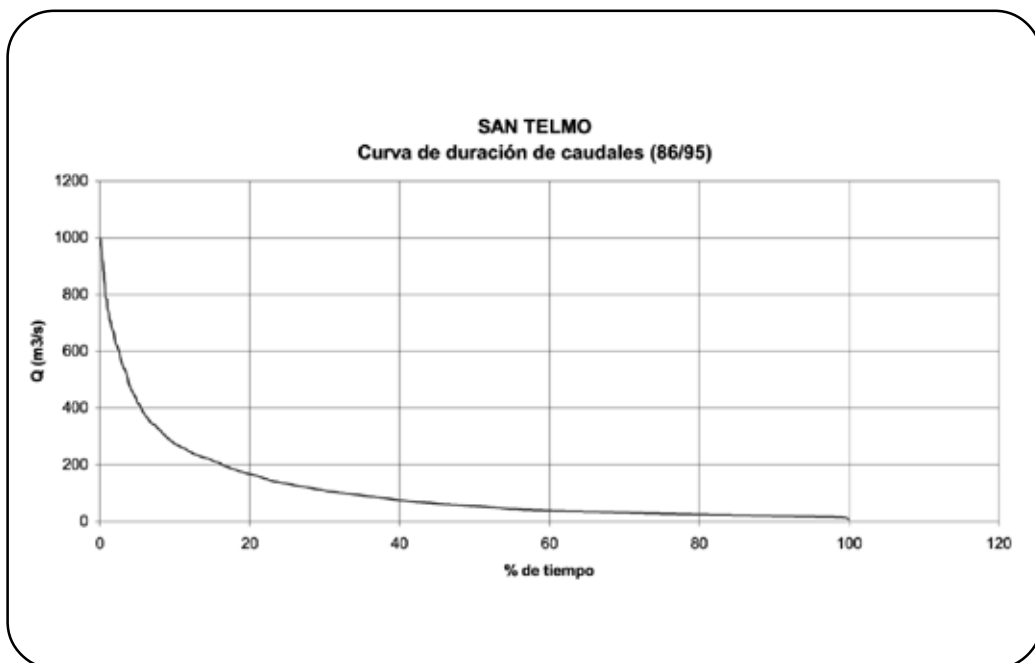
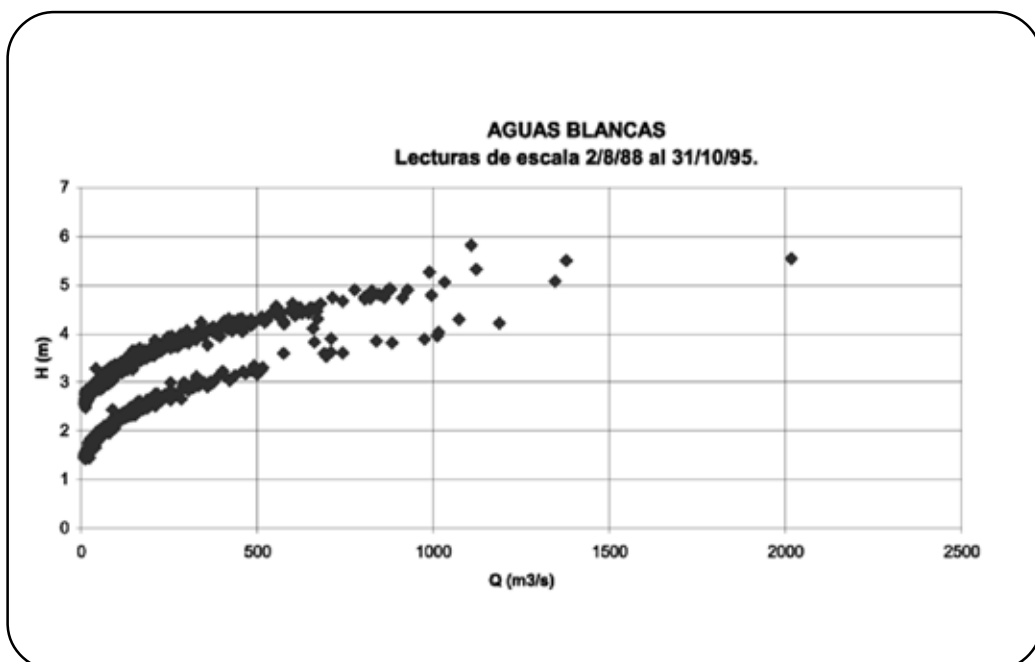


Figura n° 68

/ Figura n° 69



Astilleros - H-Q (78/85)

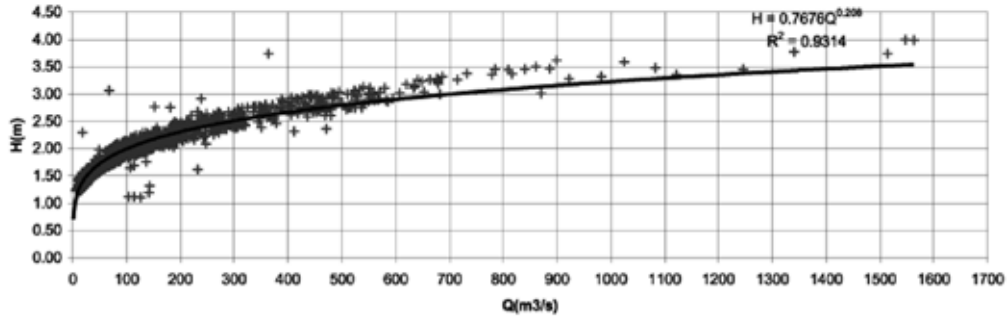
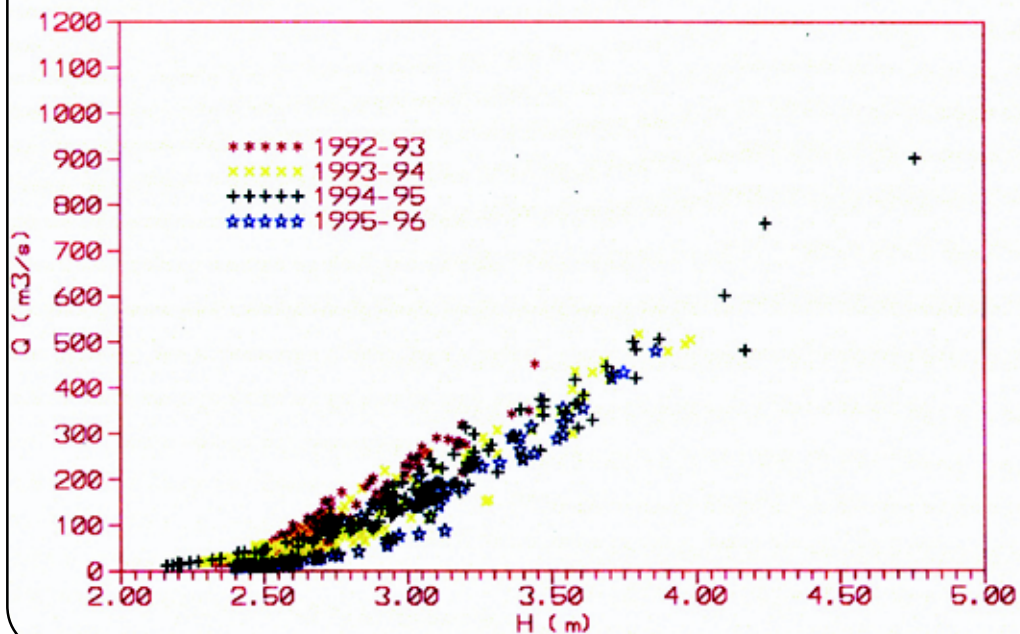


Figura n° 70

/ Figura n° 71

RIO SAN FRANCISCO EN CAIMANCITO
RELACIONES H-Q PARA DISTINTOS PERIODOS



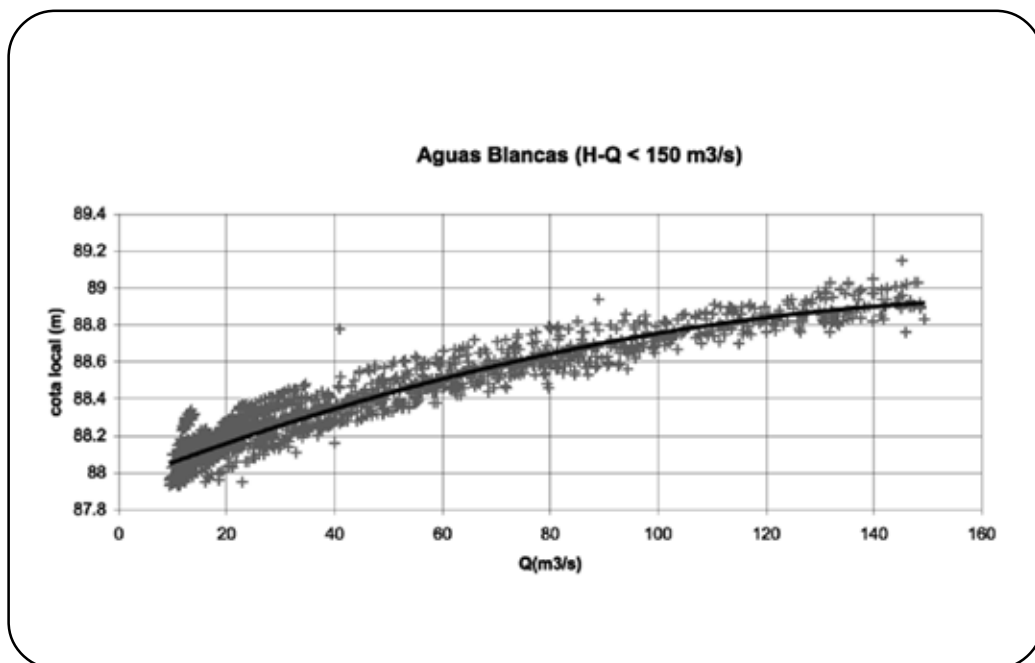
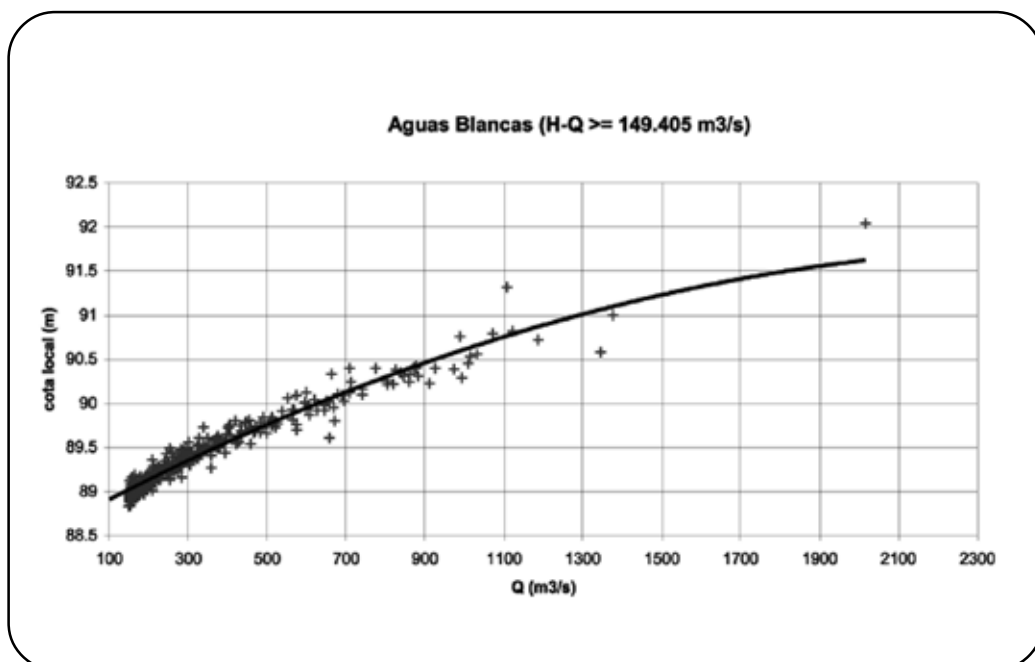


Figura n° 72

/ Figura n° 73



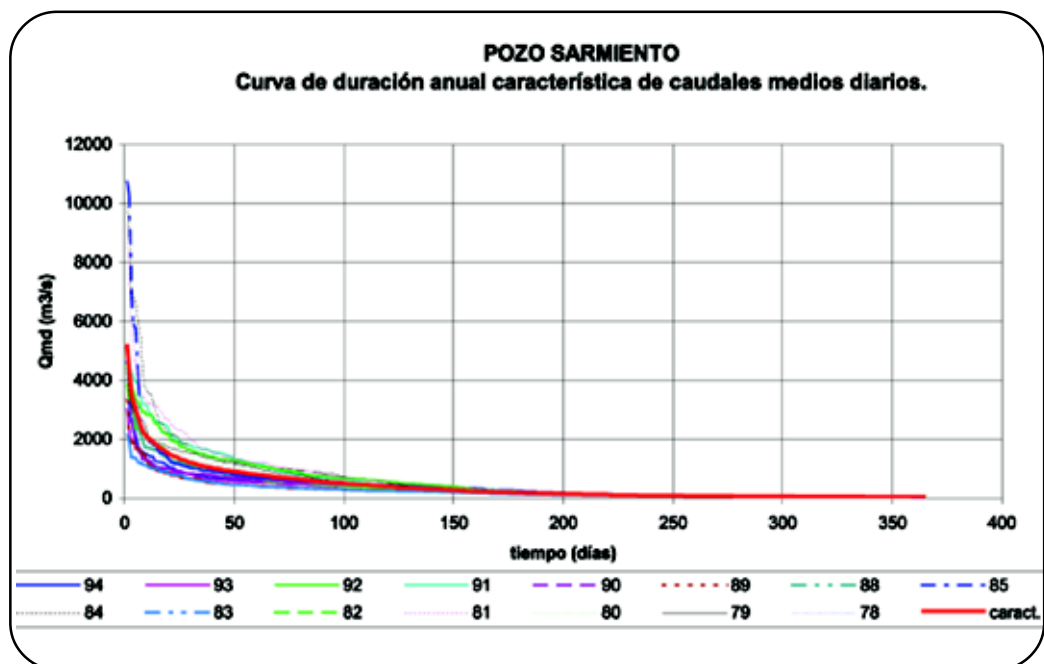
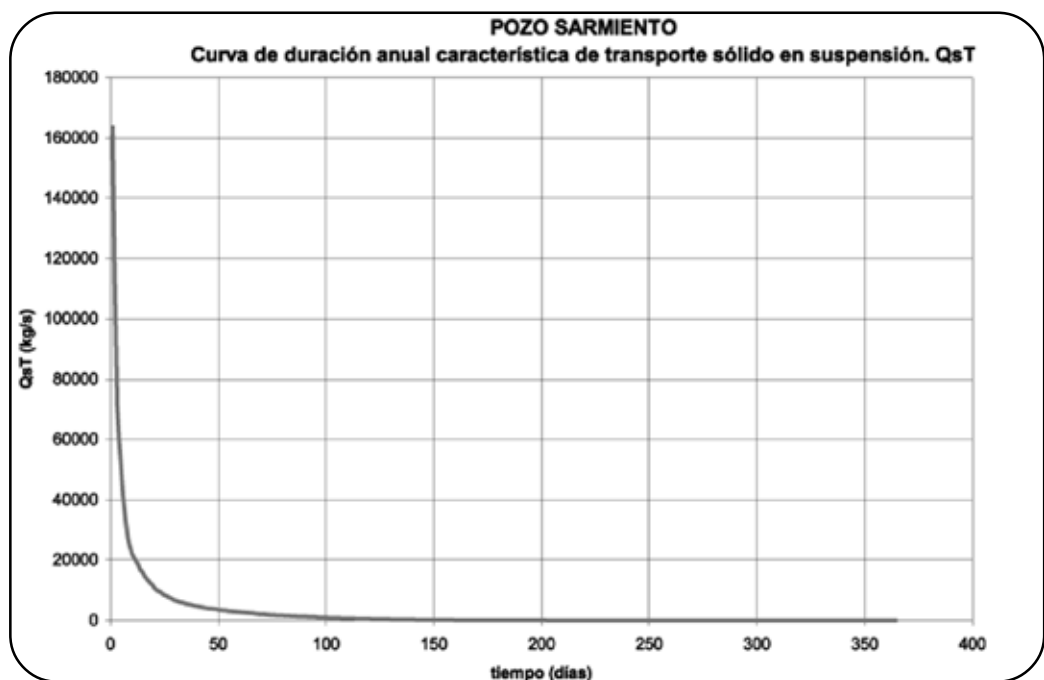


Figura n° 74

/ Figura n° 75



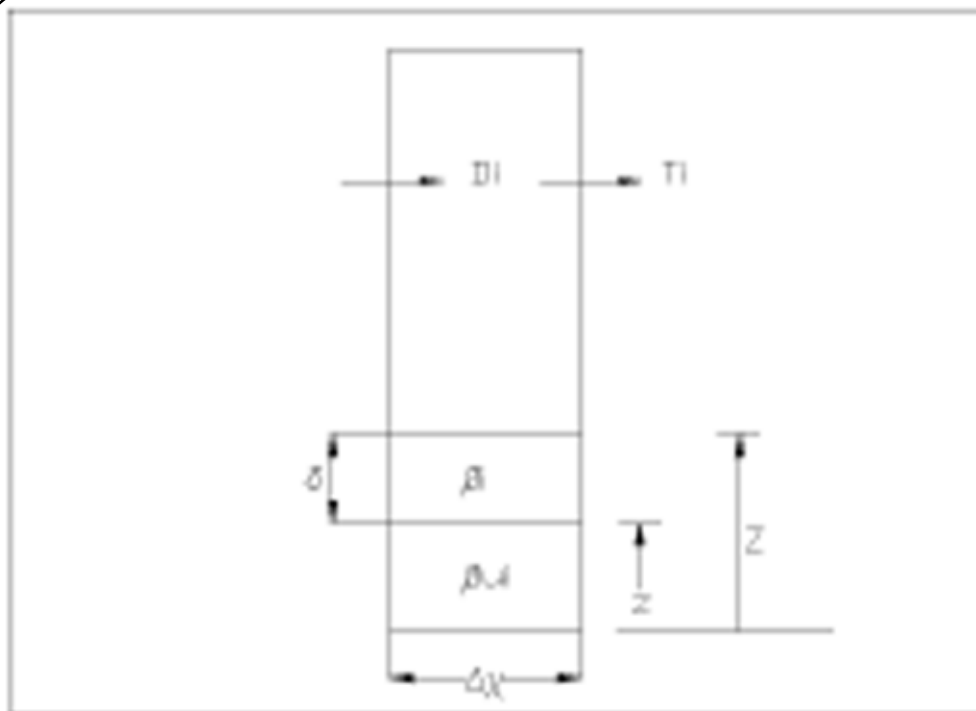


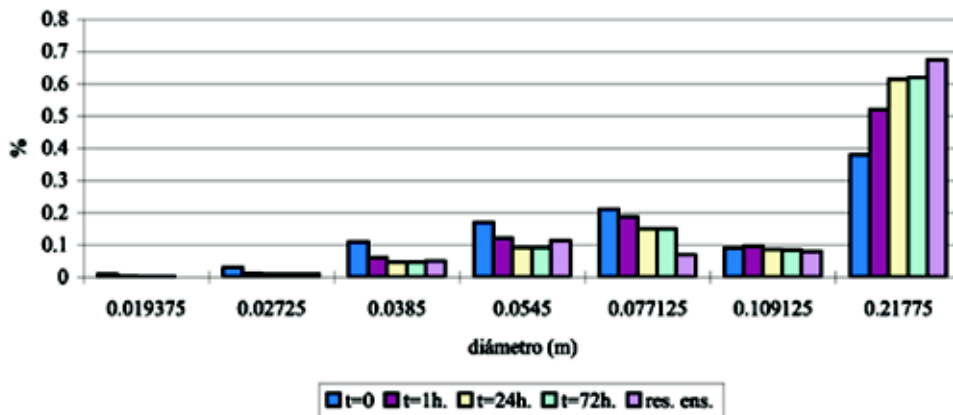
FIGURA N° 76a

Figura n° 76a

/ Figura n° 76b



**Río Medina - Variación de la composición granulométrica.
Sección inicial1.**



**Río Medina - Composición granulométrica.
Sección intermedia.**

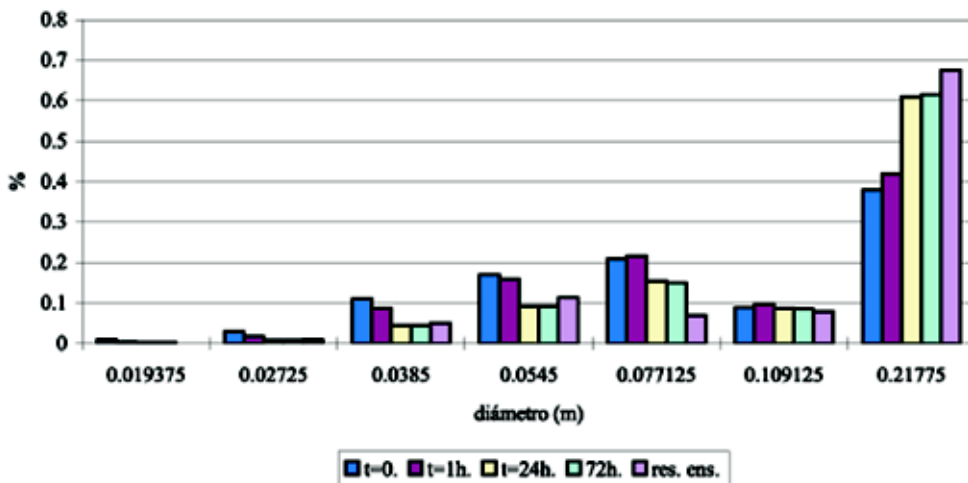


Figura n° 77

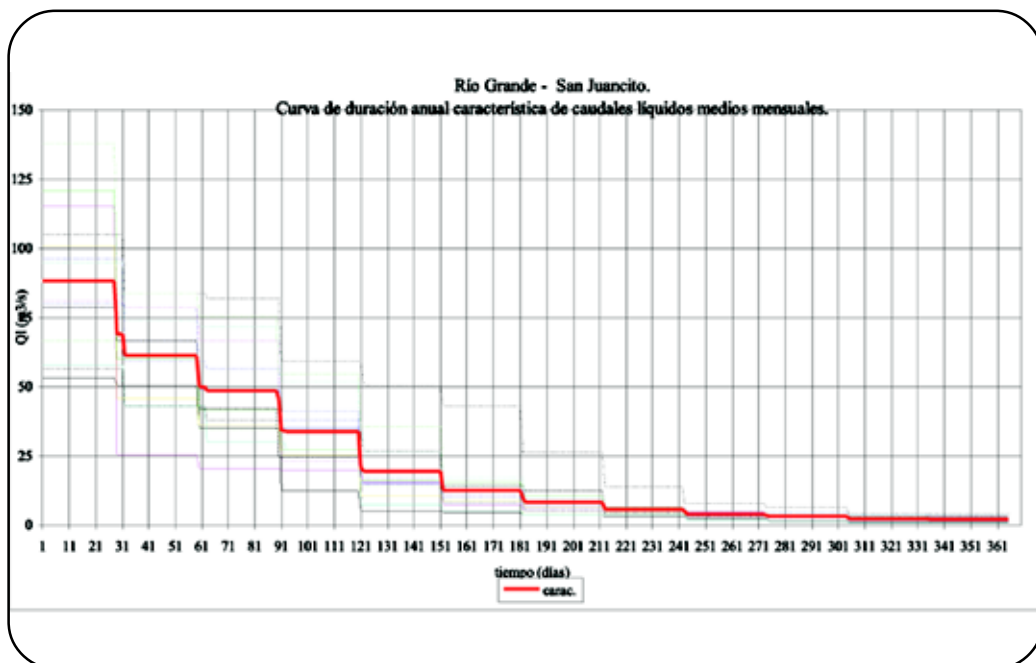
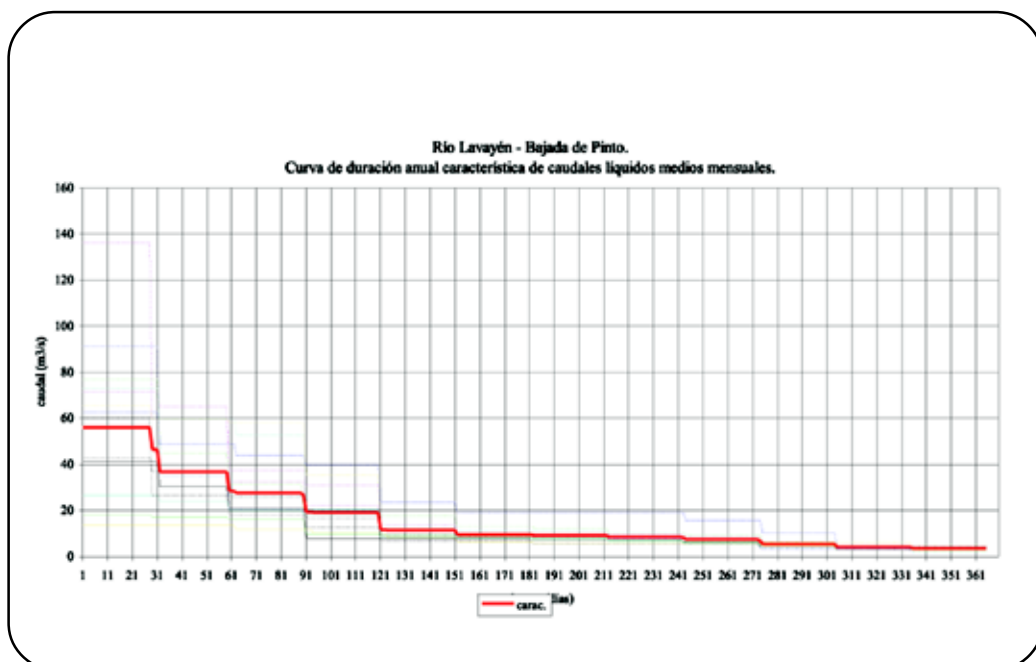


Figura n° 78

/ Figura n° 79



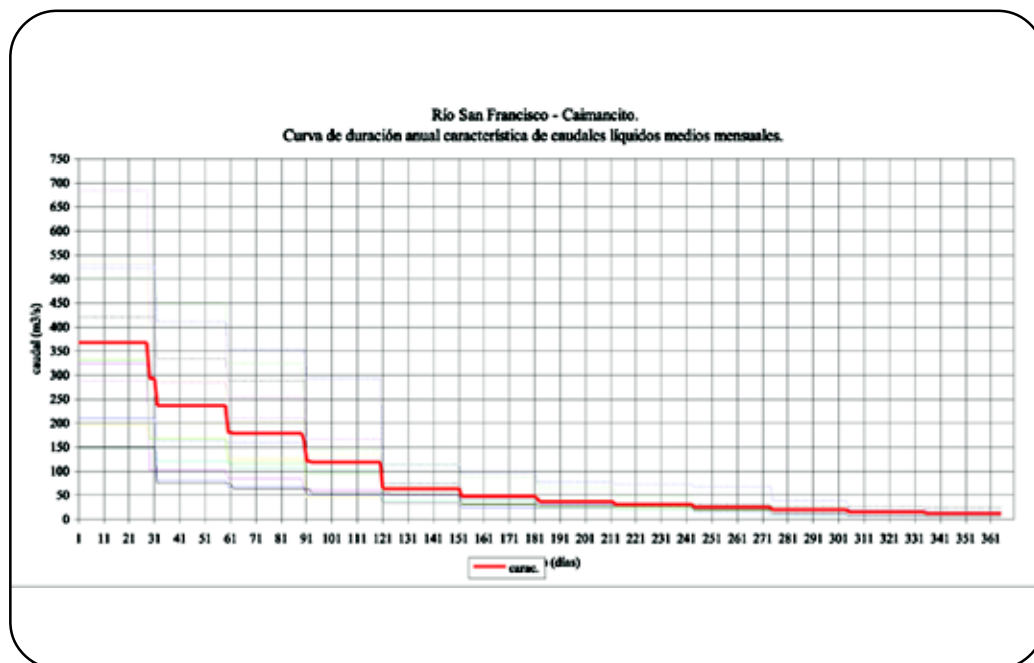
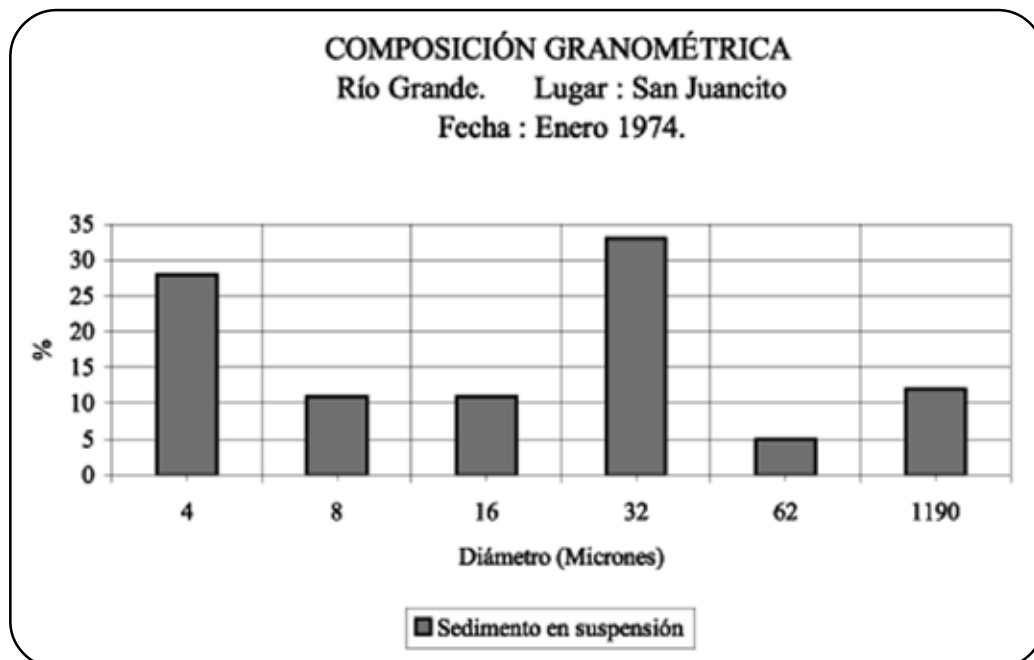


Figura n° 80

/ Figura n° 81



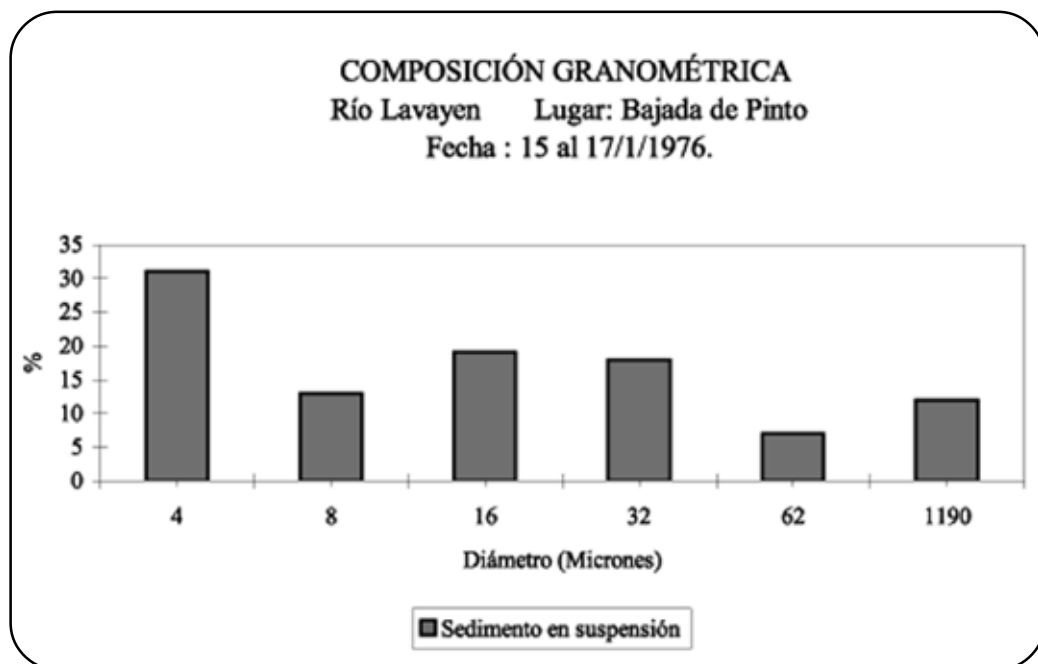
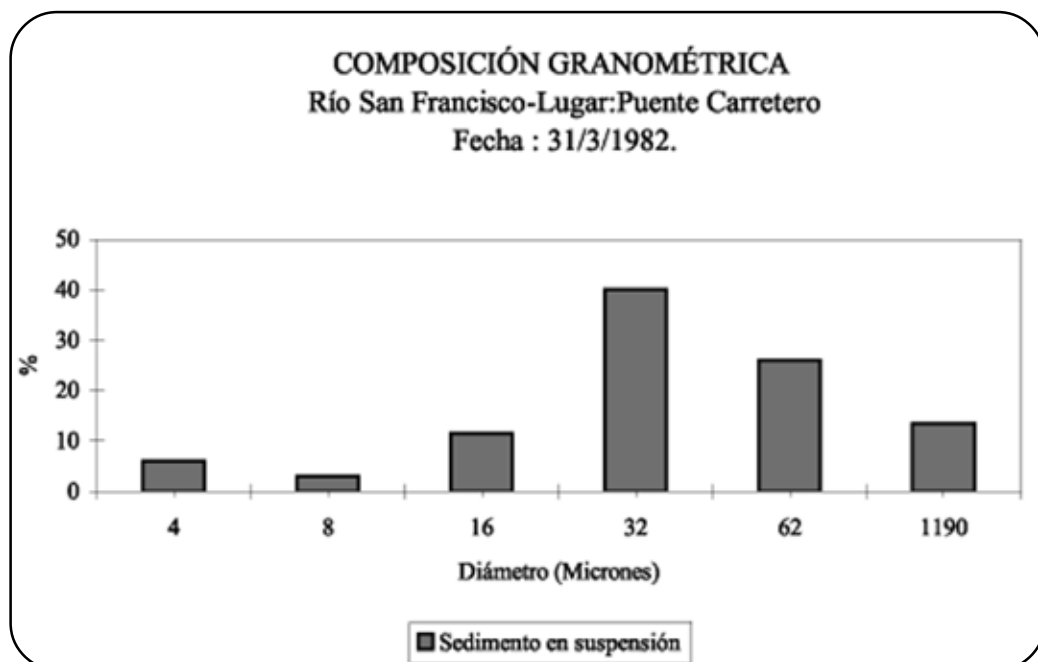
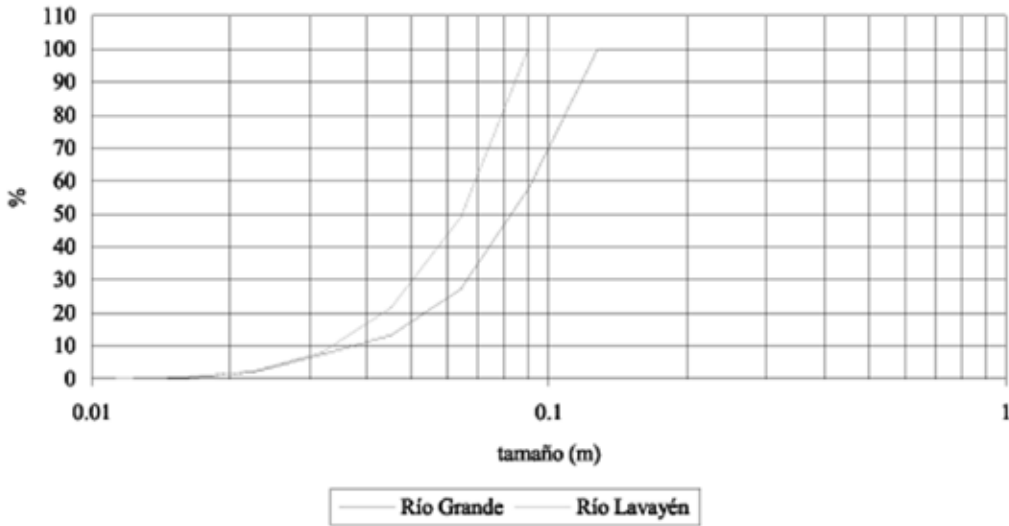


Figura n° 82

/ Figura n° 83



Curvas granulométricas San Juancito - El Piquete



Curvas Granulométricas Río San Francisco

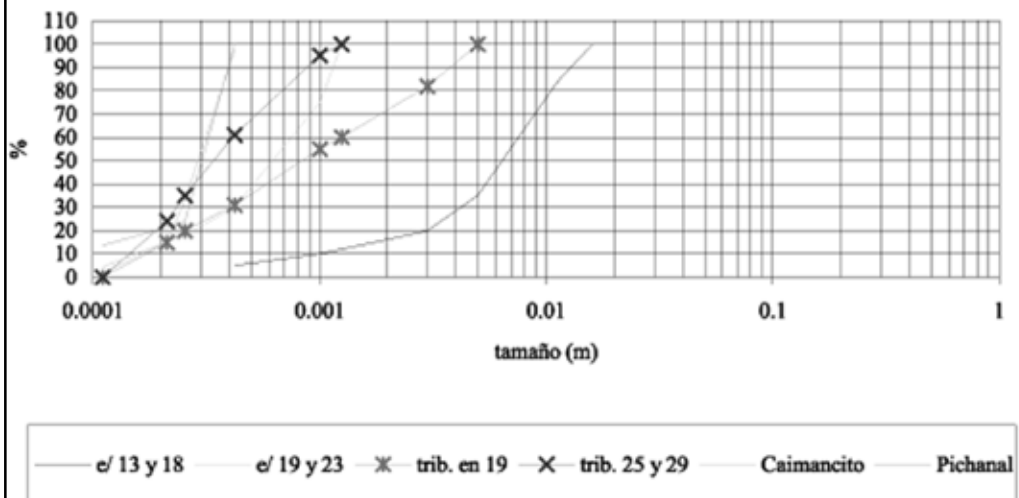
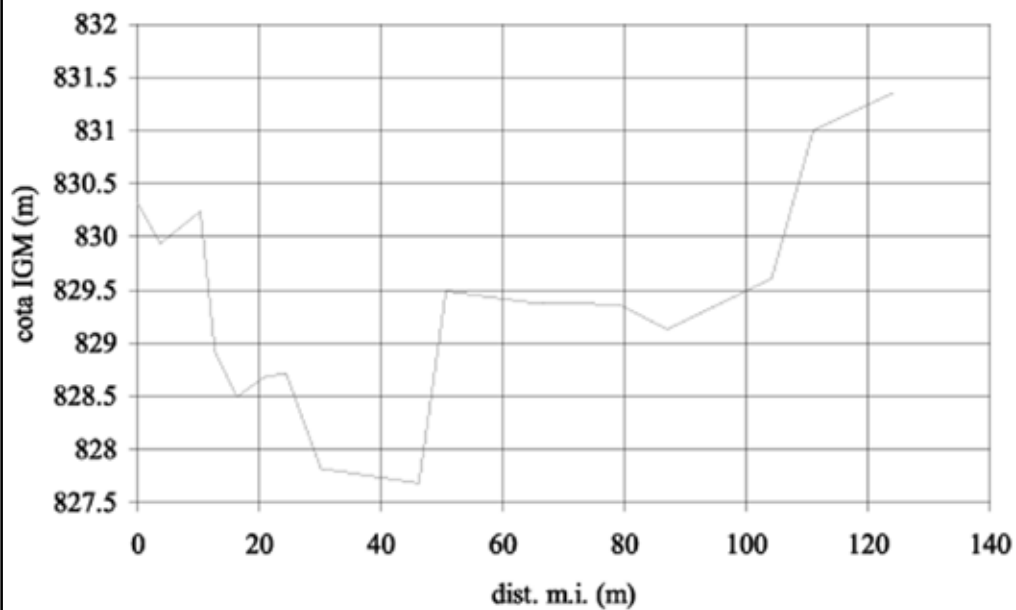


Figura n° 84

Sección San Juancito (1) - Río Grande.



Sección San Pedro (7) - Río Grande.

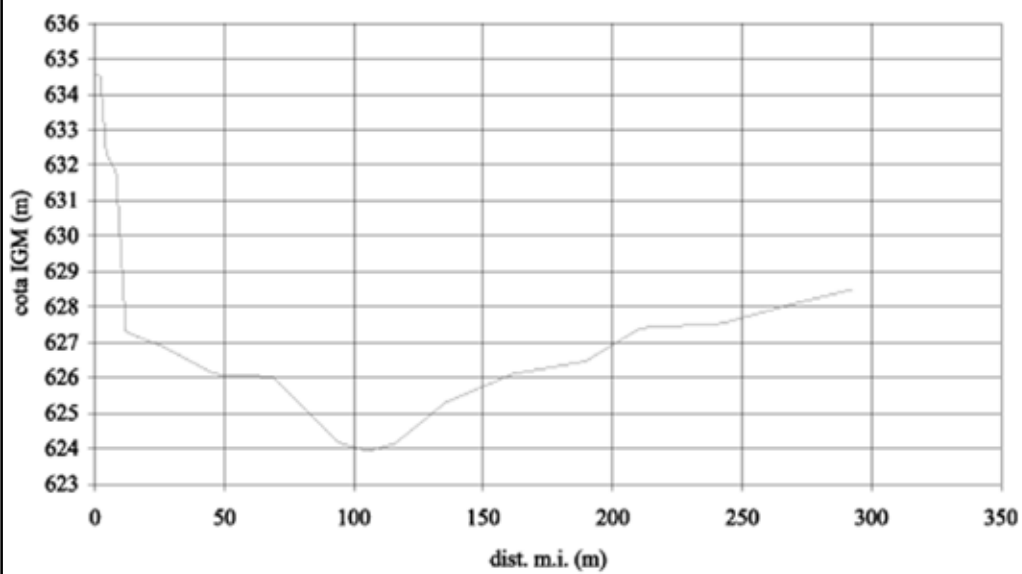
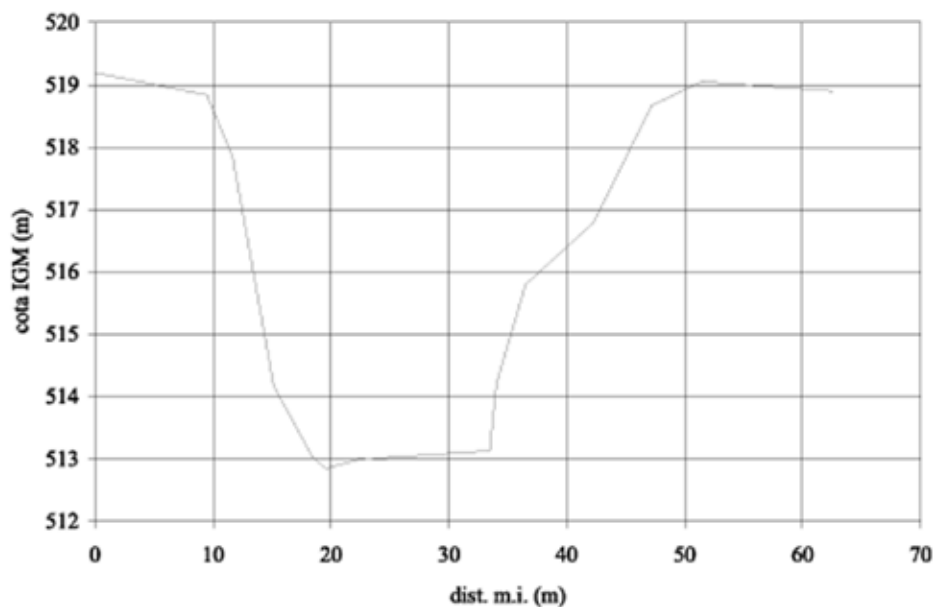


Figura n° 85

Sección Bajada de Pinto (1) - Río Lavayén.



Sección El Piquete (11) - Río Lavayén.

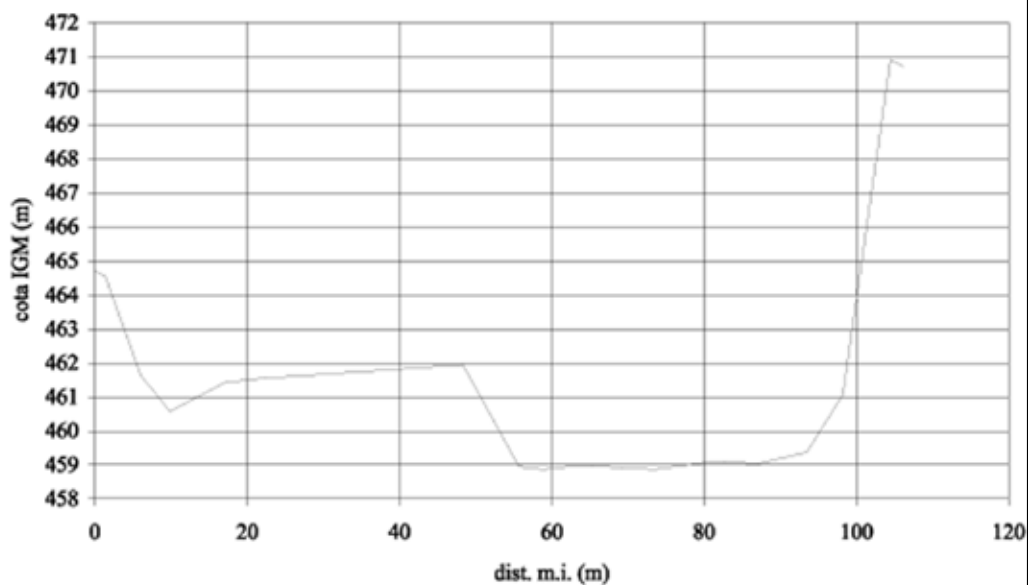


Figura n° 86

Sección Caimancito (34) - Río San Francisco.

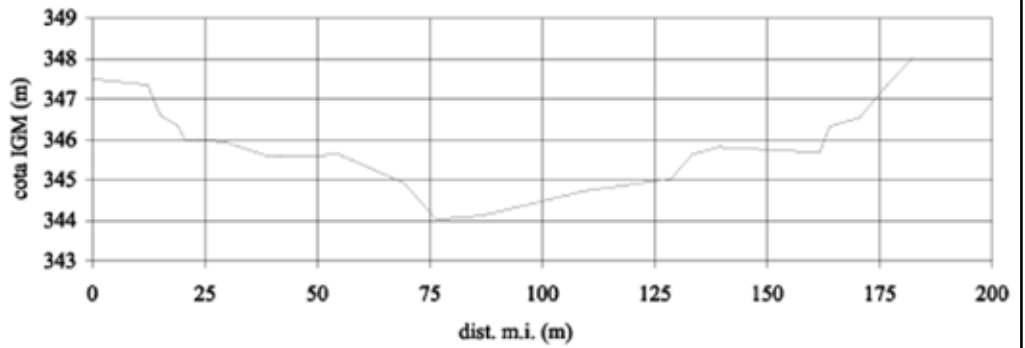
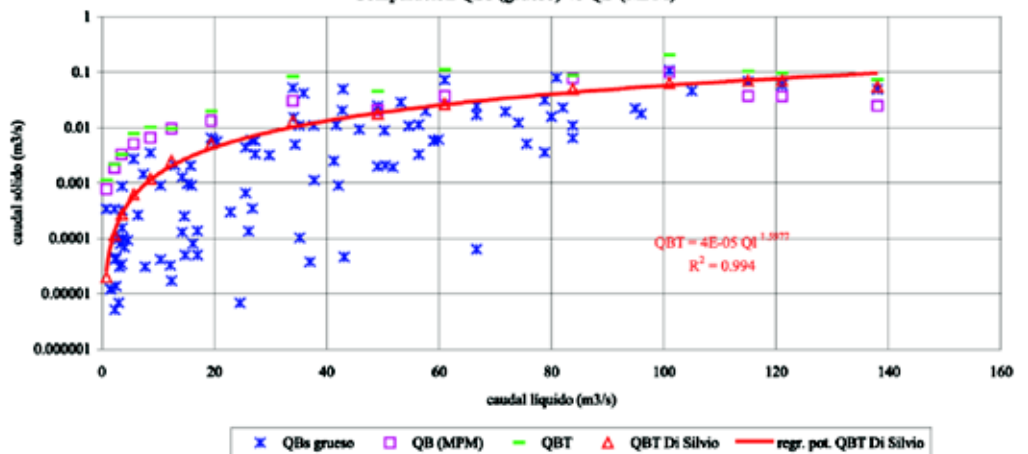


Figura n° 87

/ Figura n° 88

SAN JUANCITO Comparación QBs (grueso) vs QB (MPM)



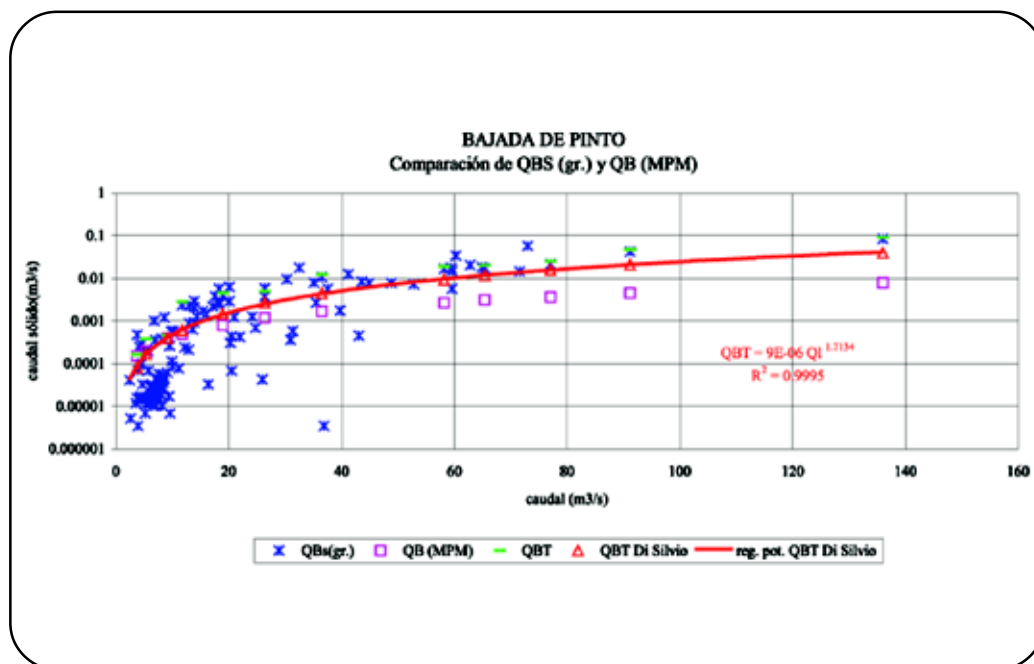
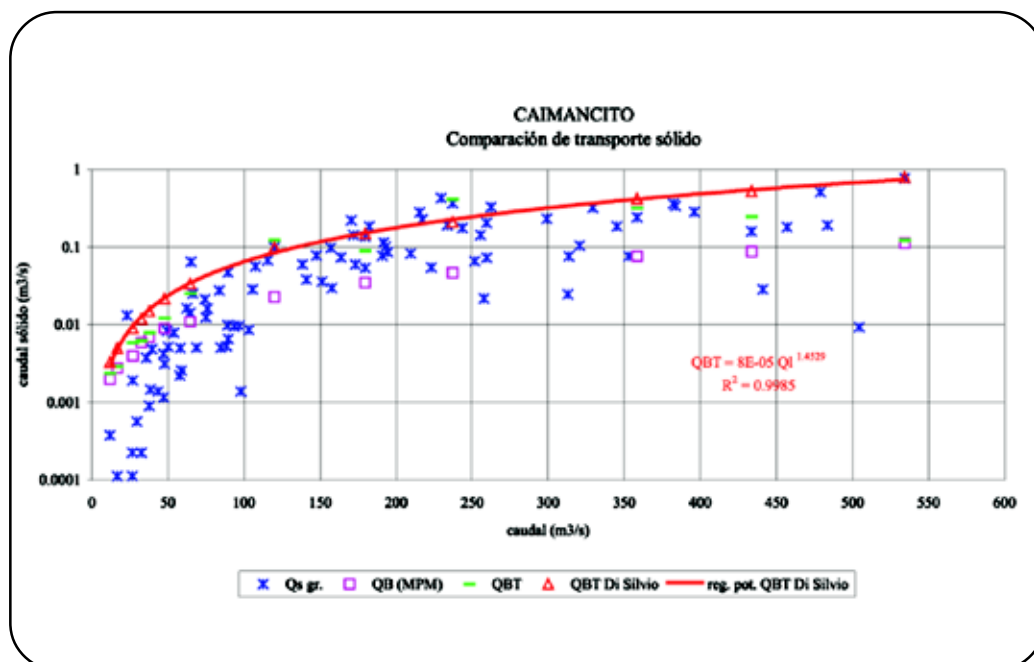


Figura n° 89

/ Figura n° 90



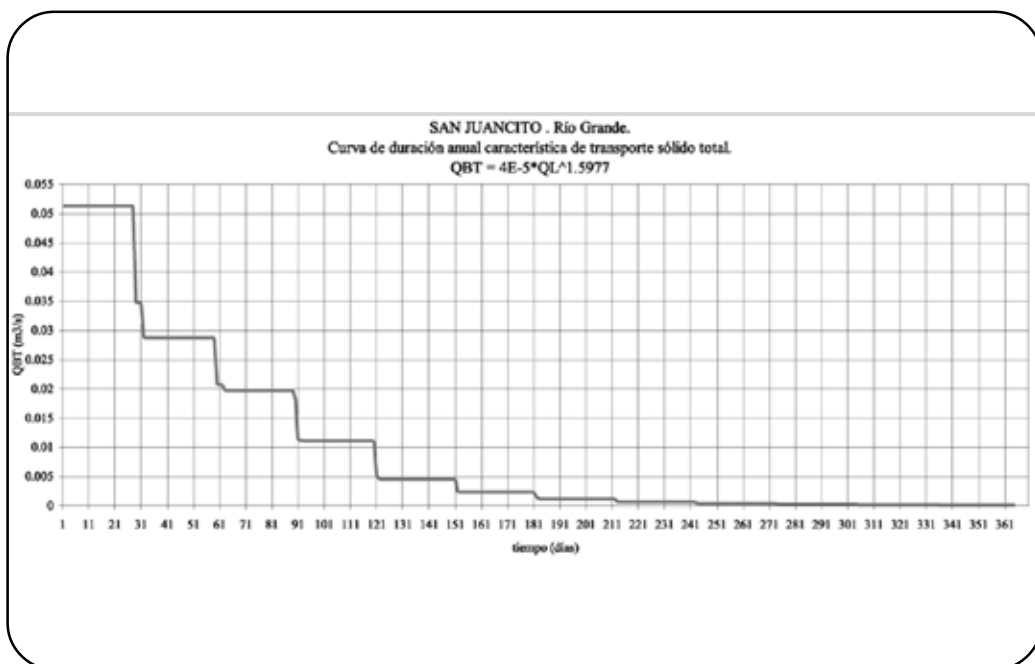
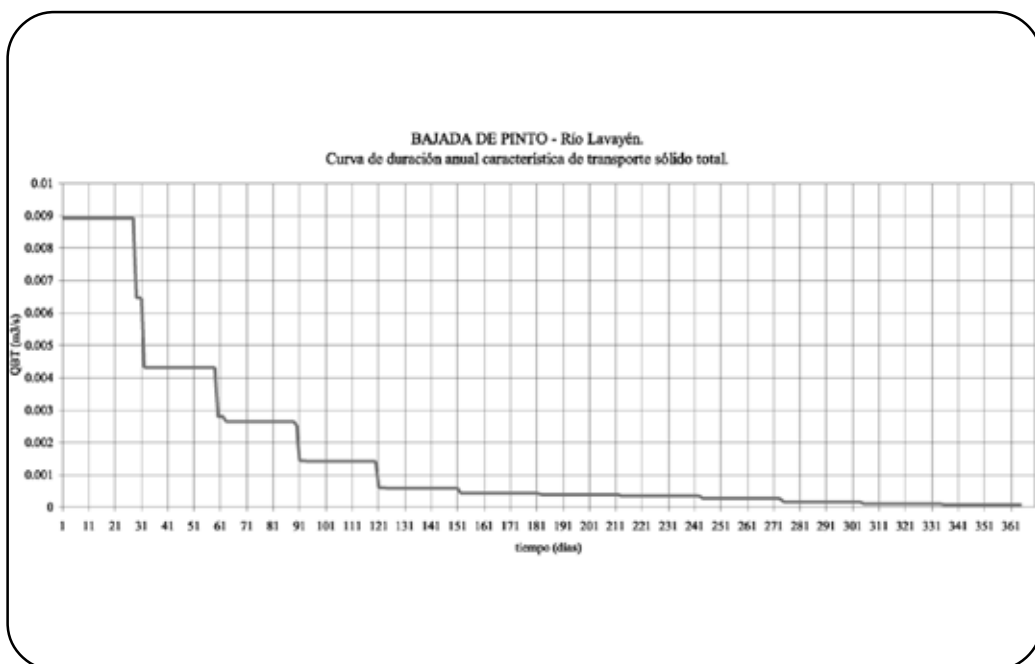


Figura n° 91

/ Figura n° 92



CAIMANCITO - Río San Francisco
Curva de duración anual característica de transporte sólido total.

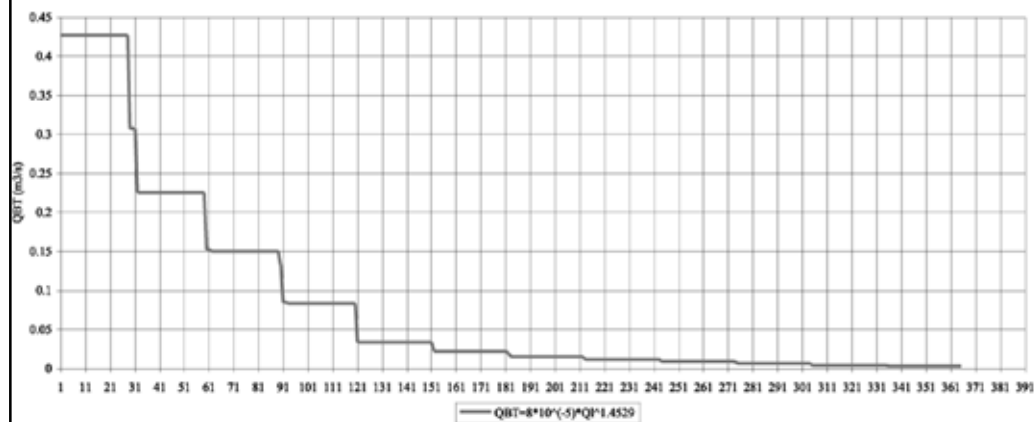
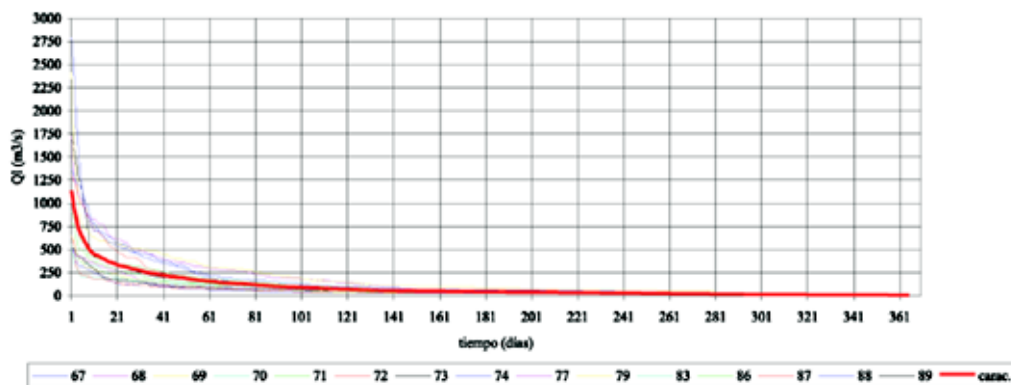


Figura n° 93

/ Figura n° 94

CAIMANCITO
Curva de duración anual característica de caudales medios diarios.



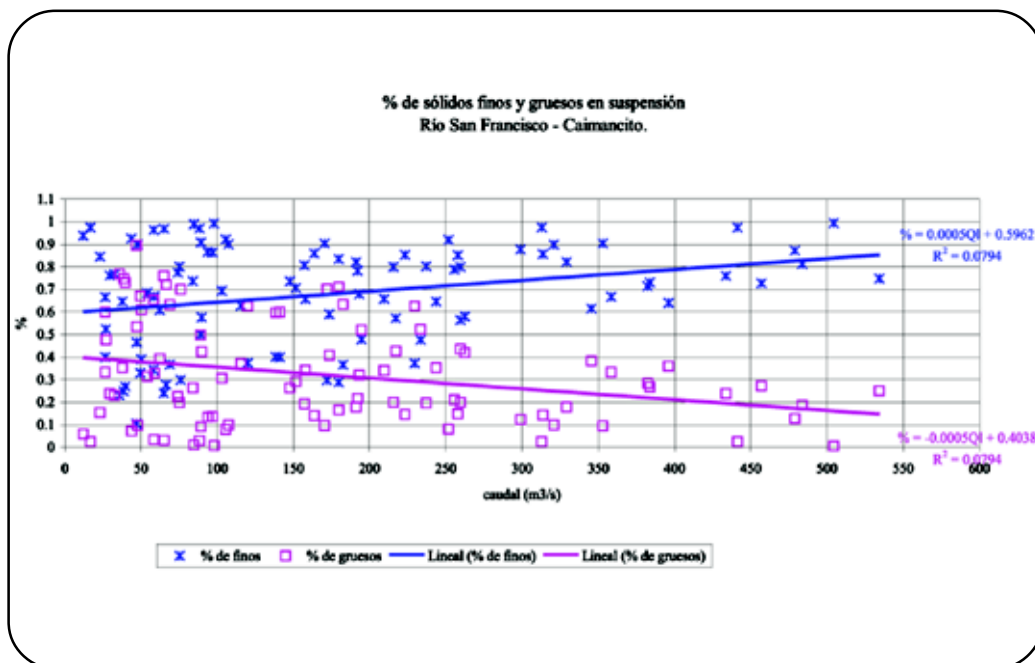
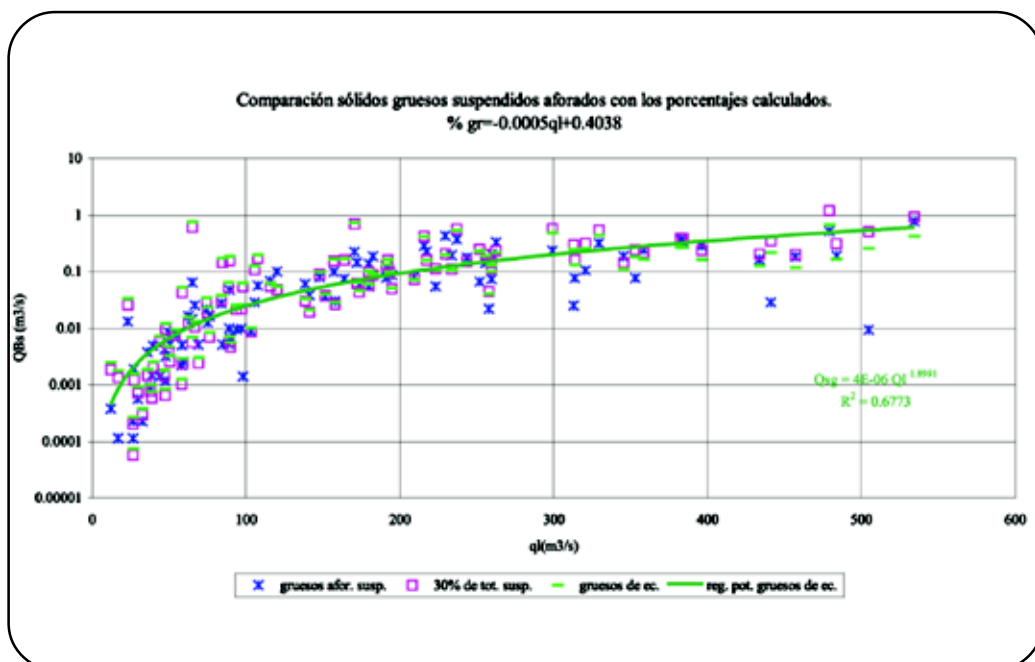
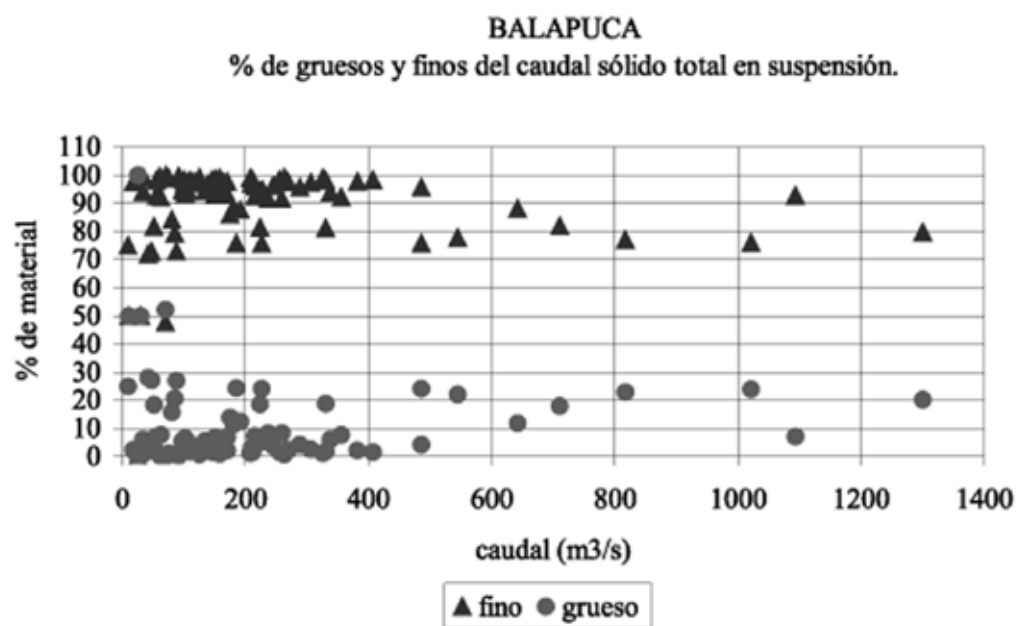
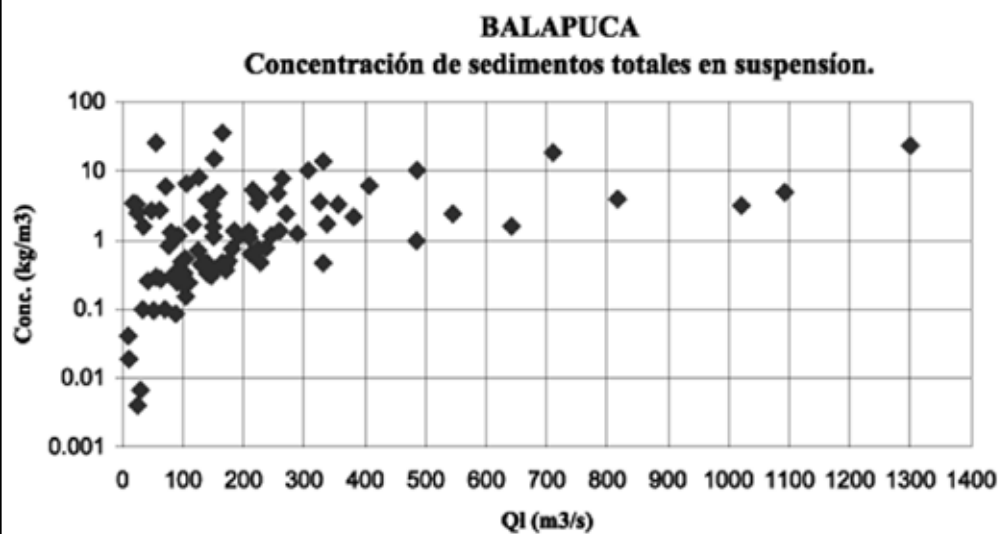


Figura n° 95

/ Figura n° 96





Generación y transporte de sedimentos

Figura n° 97

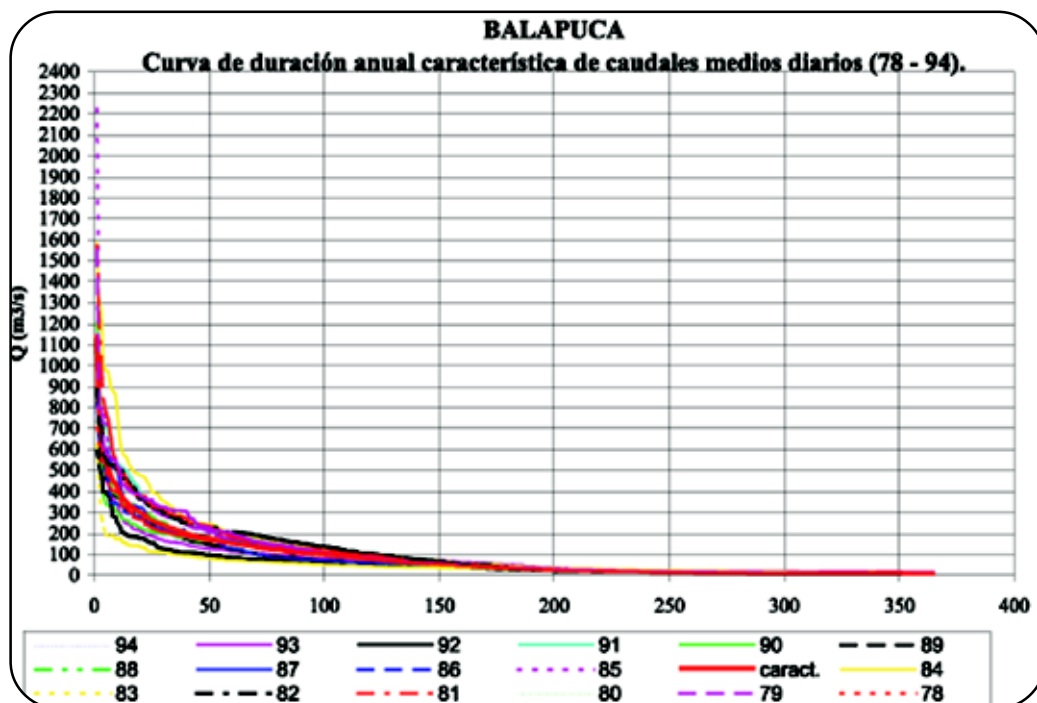
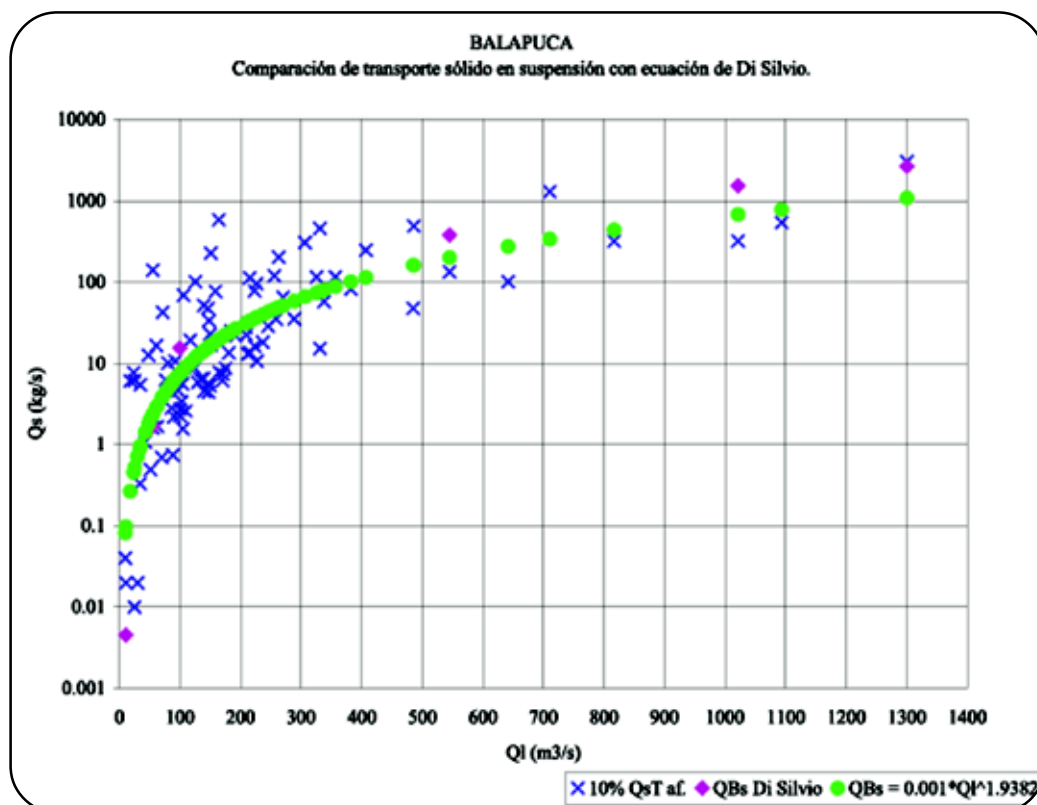


Figura n° 98

/ Figura n° 99



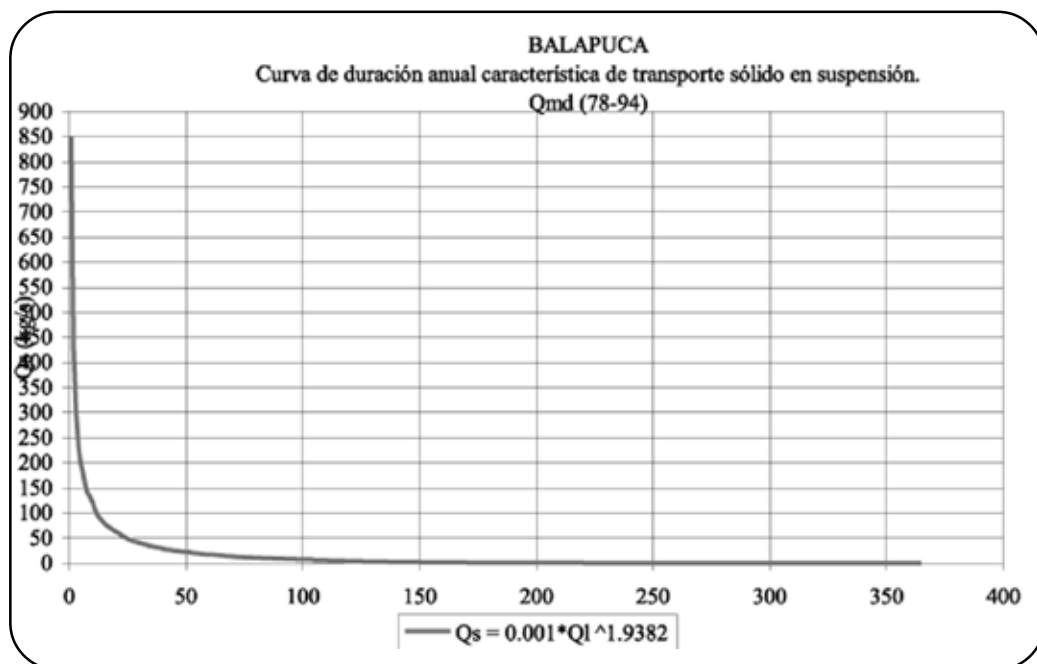


Figura n° 100

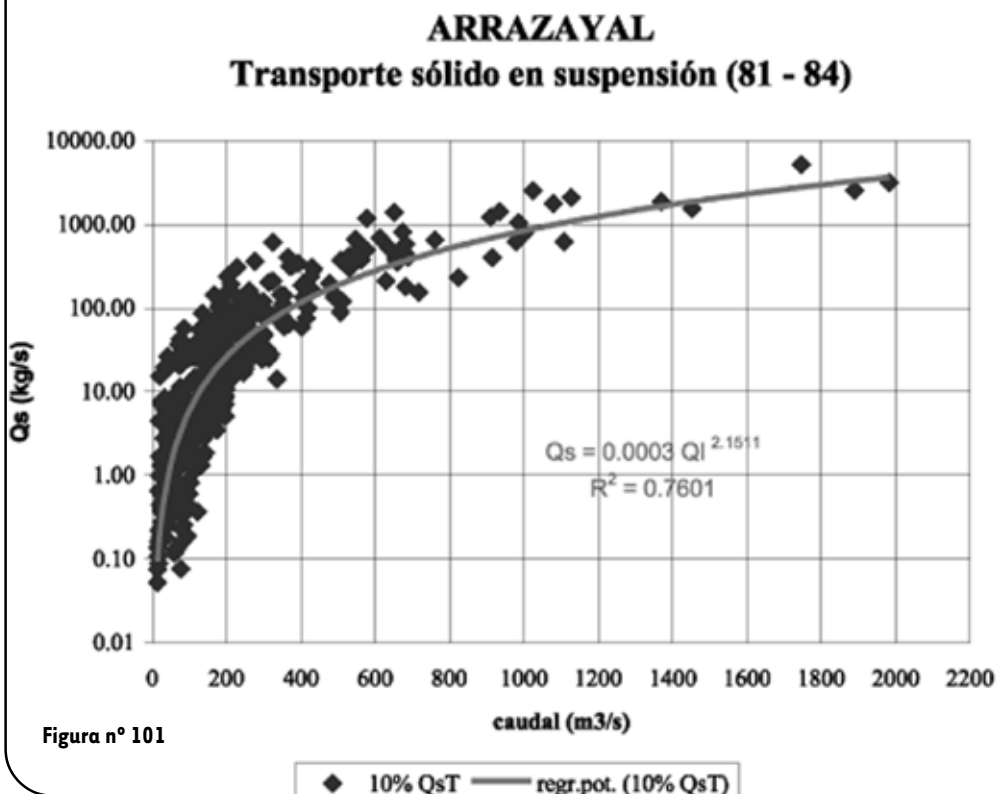
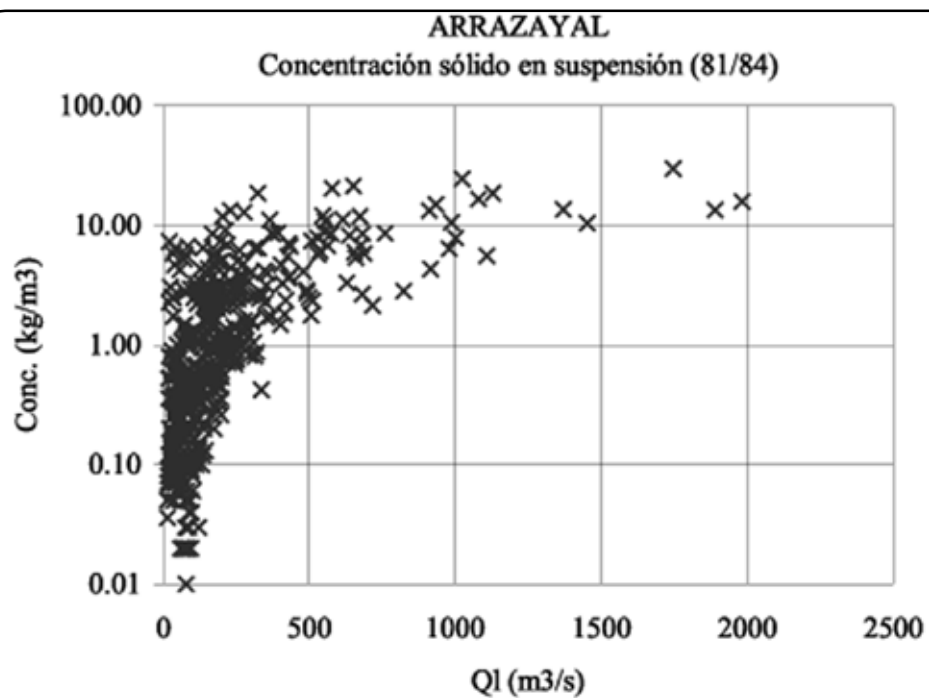
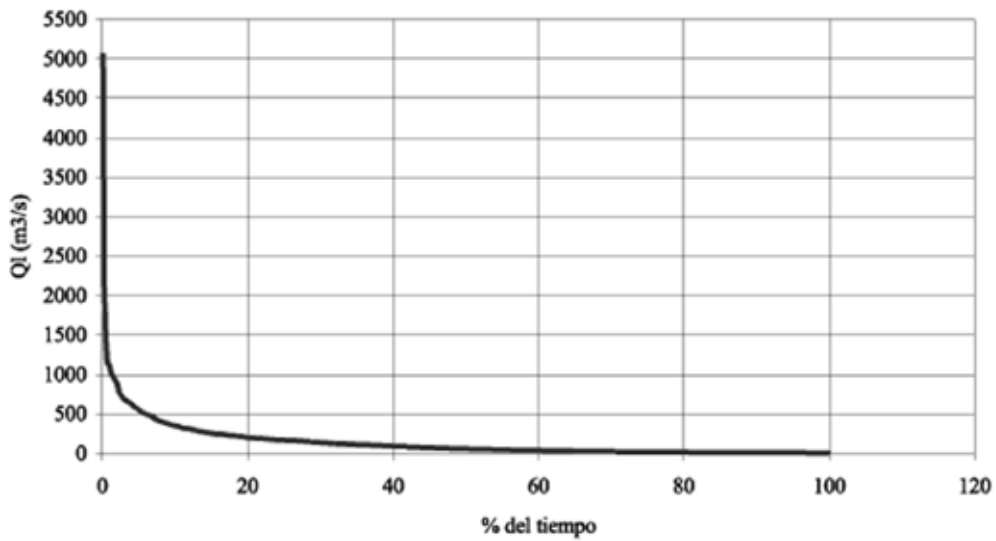


Figura n° 101

ARRAZAYAL
Curva de duración de caudales aforados (78/84)



ARRAZAYAL - Curva de duración de transporte sólido en suspensión.

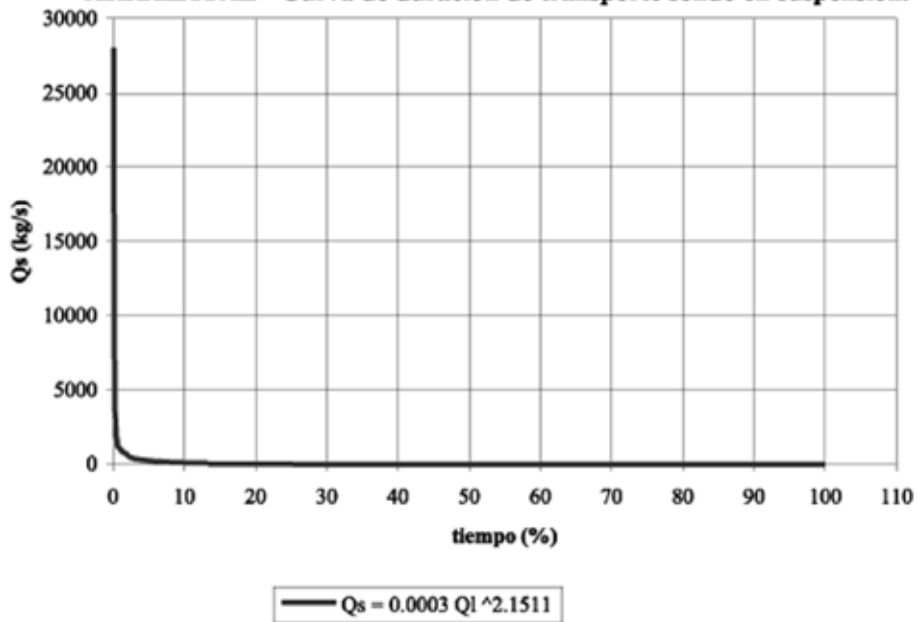
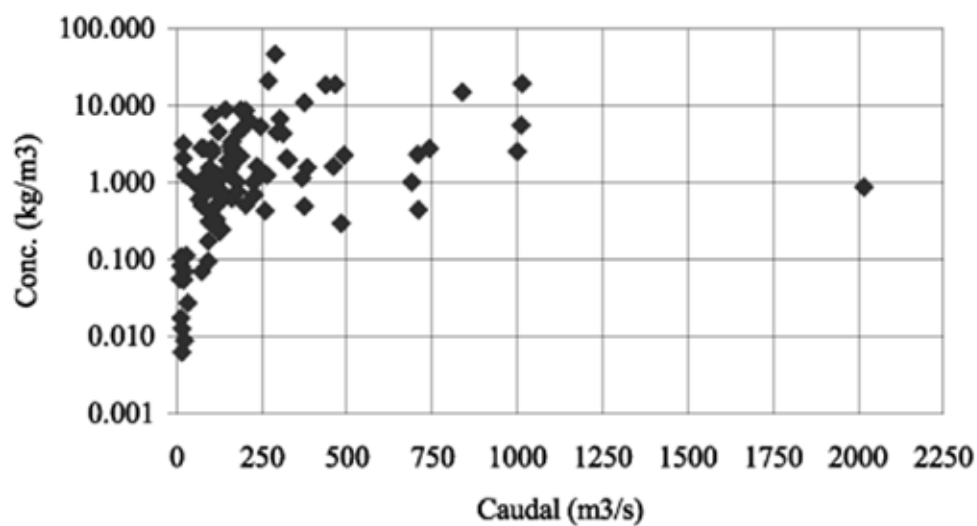


Figura n° 102

AGUAS BLANCAS
Concentración de material total en suspensión (93 - 95)



AGUAS BLANCAS
% de finos y gruesos en el total del material en suspensión (93 - 95)

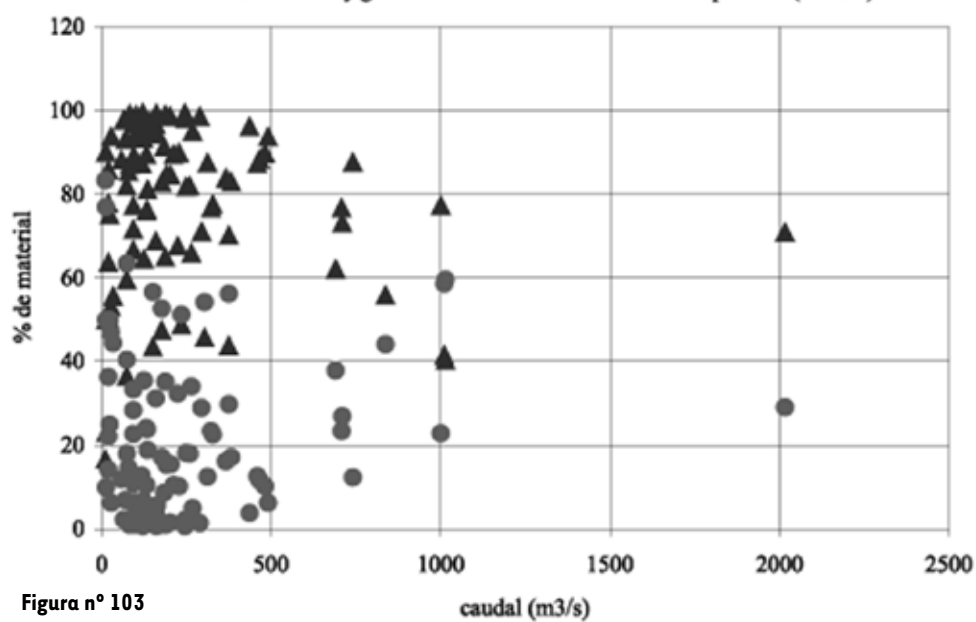


Figura nº 103

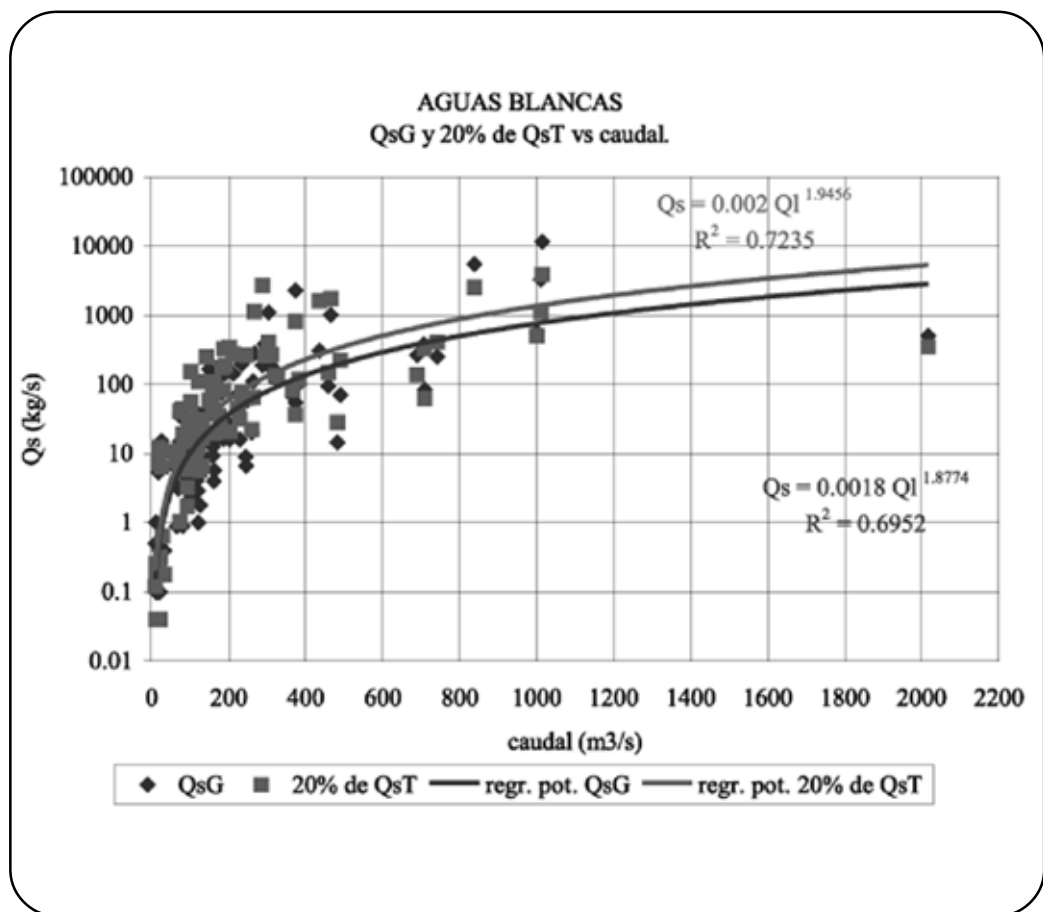
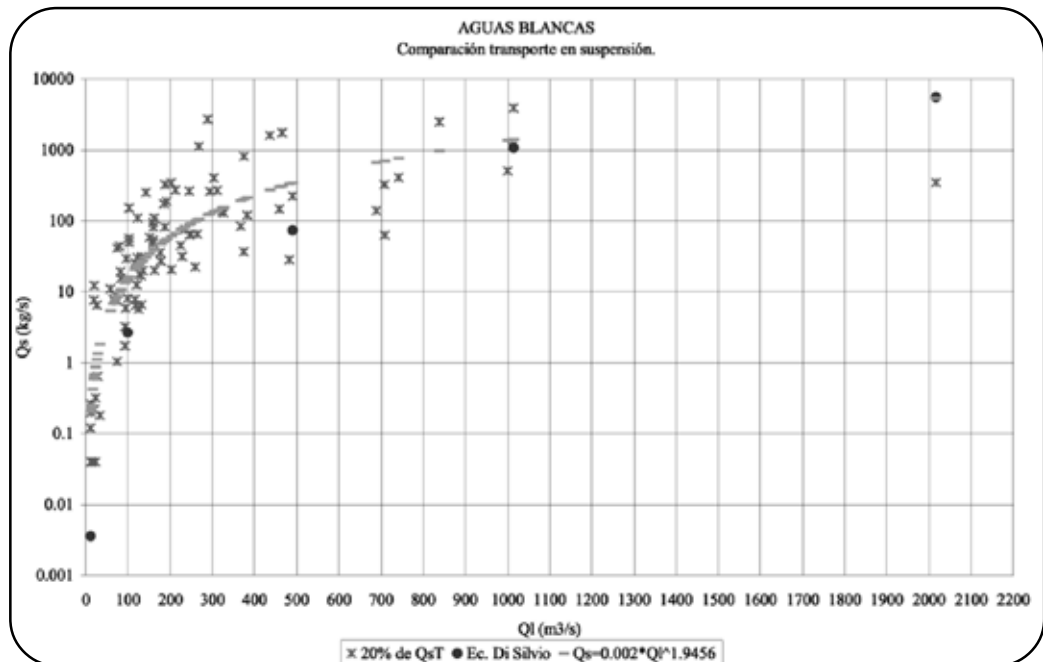


Figura n° 105

/ Figura n° 106



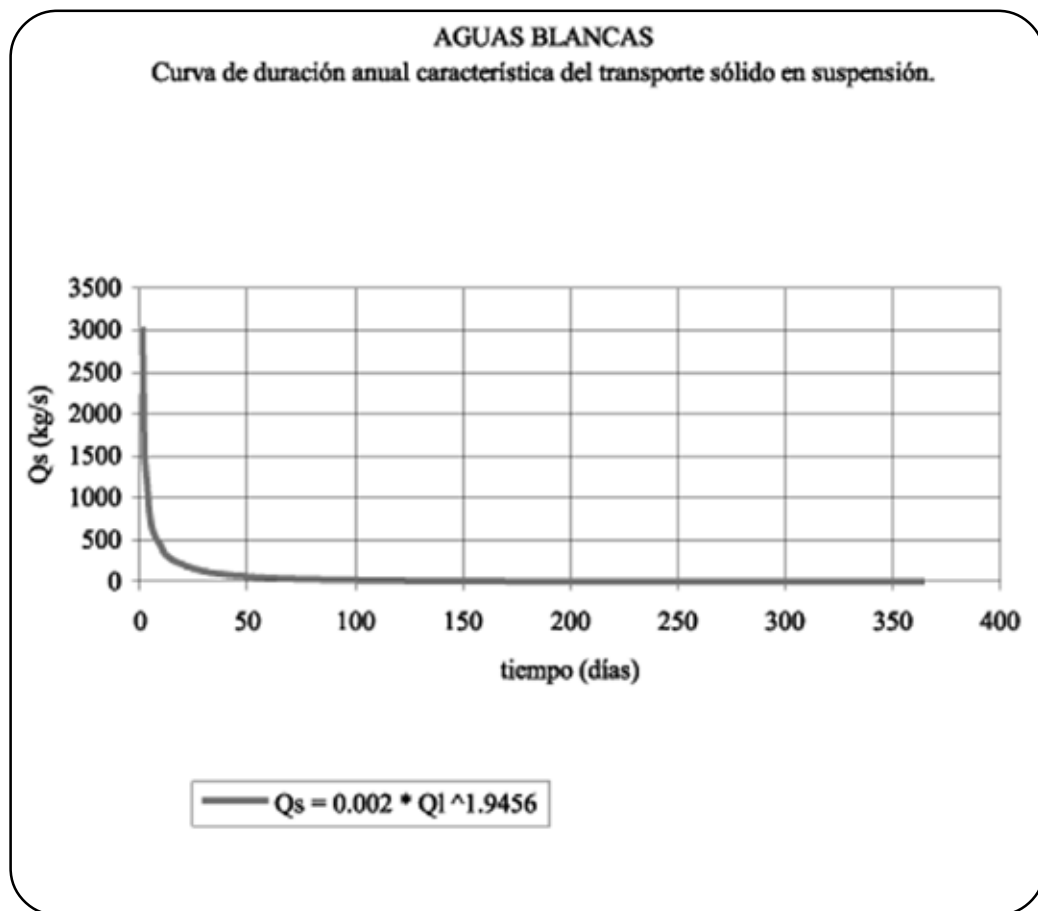
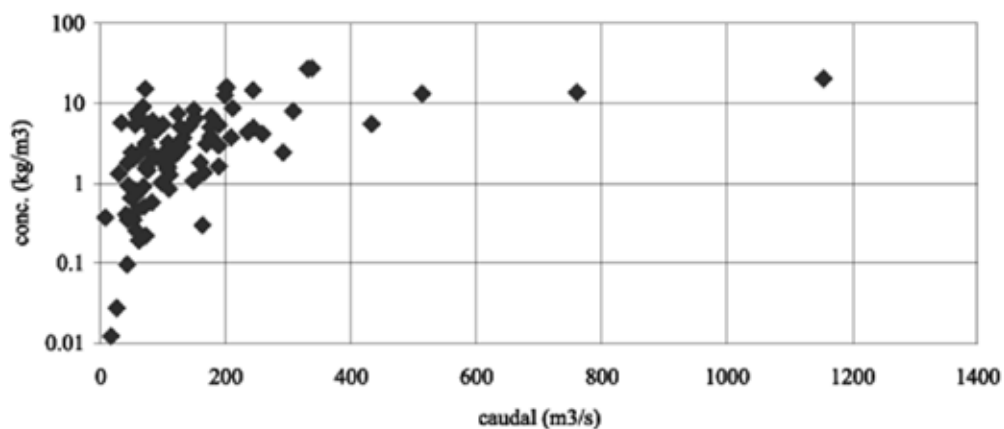


Figura n° 107

CUATRO CEDROS

Concentración de material total en suspensión.



CUATRO CEDROS

% de material fino y grueso en suspensión.

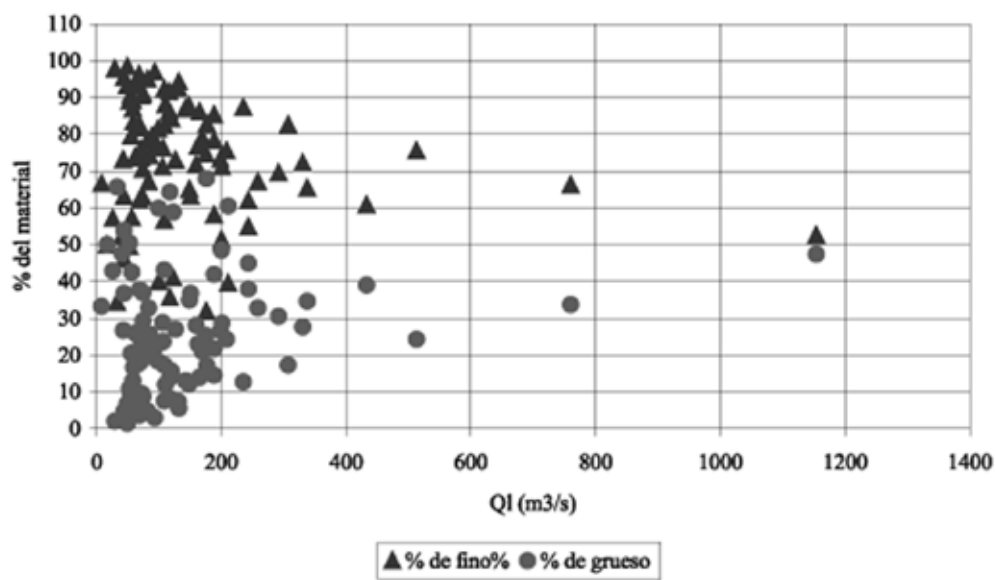


Figura n° 108

CUATRO CEDROS QsG y 30 % de QsT

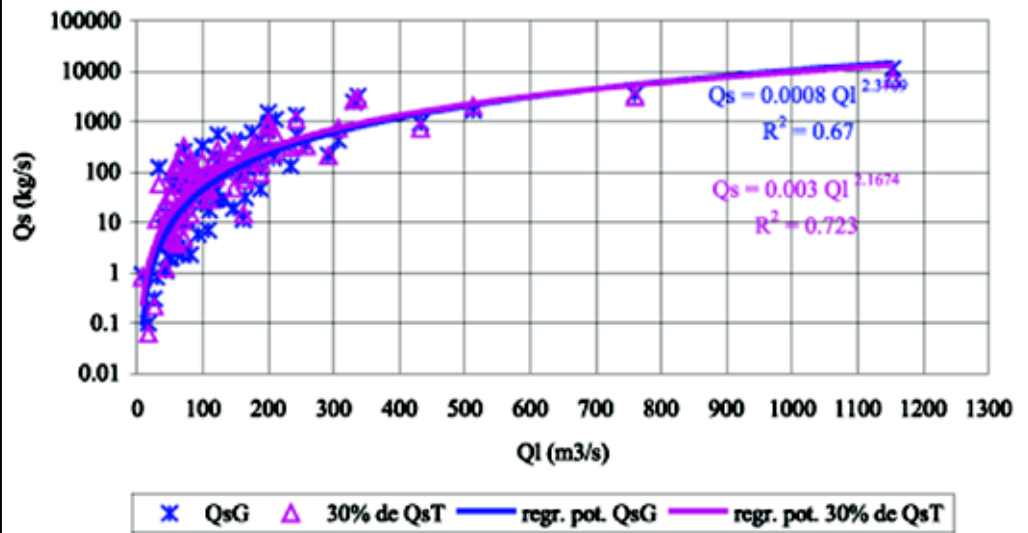
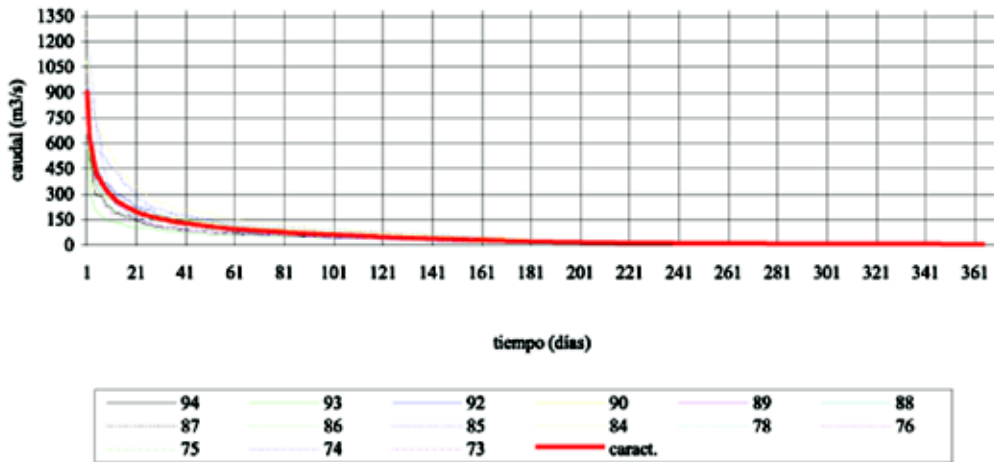


Figura n° 109

CUATRO CEDROS
Curva de duración anual característica de caudales medios diarios.

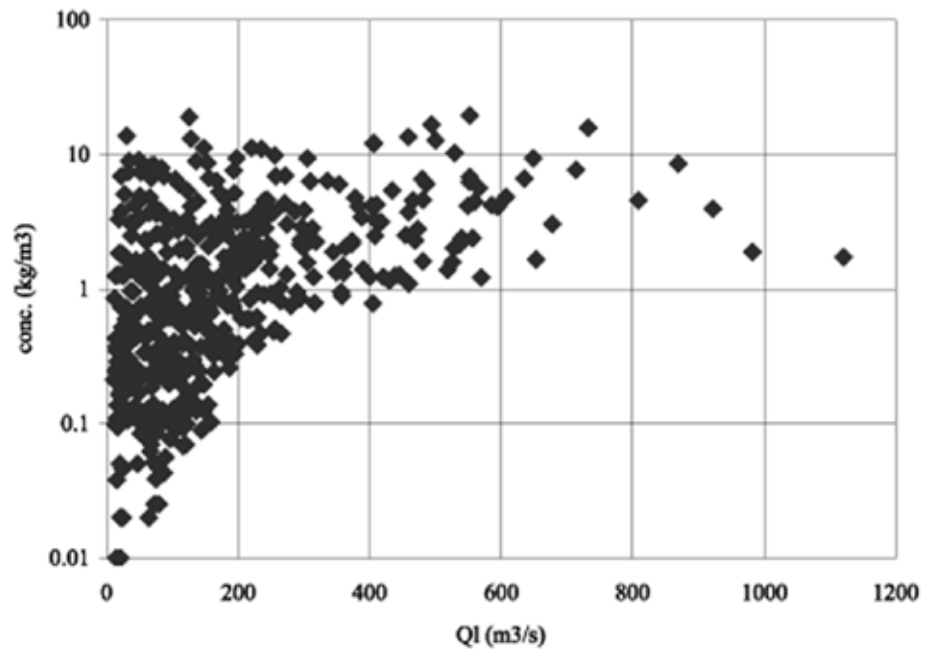


CUATRO CEDROS
Curva de duración anual característica de transporte sólido en suspensión.



Figura n° 110

ASTILLEROS Concentración de material en suspensión.



ASTILLEROS 20% de QsT

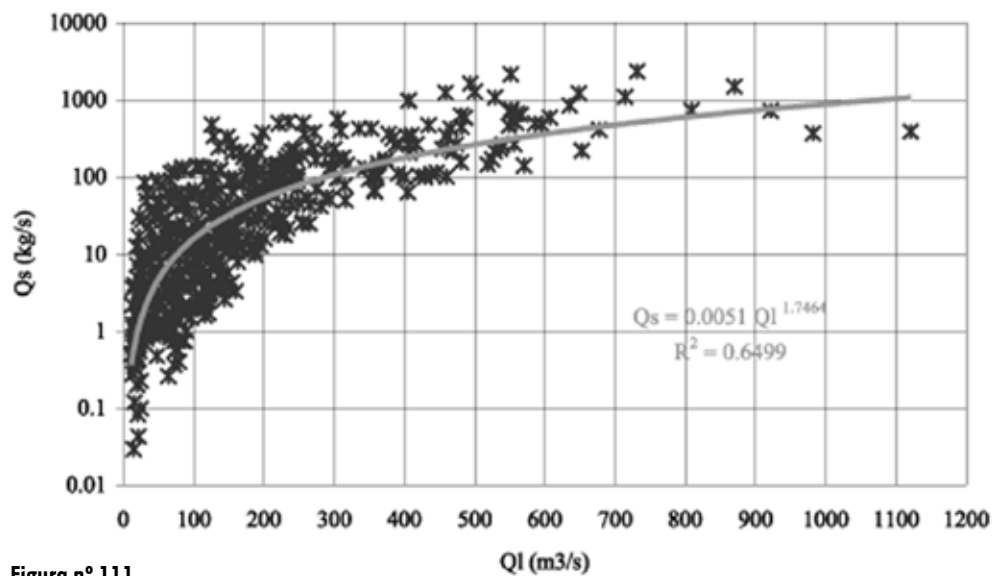


Figura nº 111

✕ 20% de QsT — regr. pot. 20% de QsT

ASTILLEROS

Comparación del transporte en suspensión.

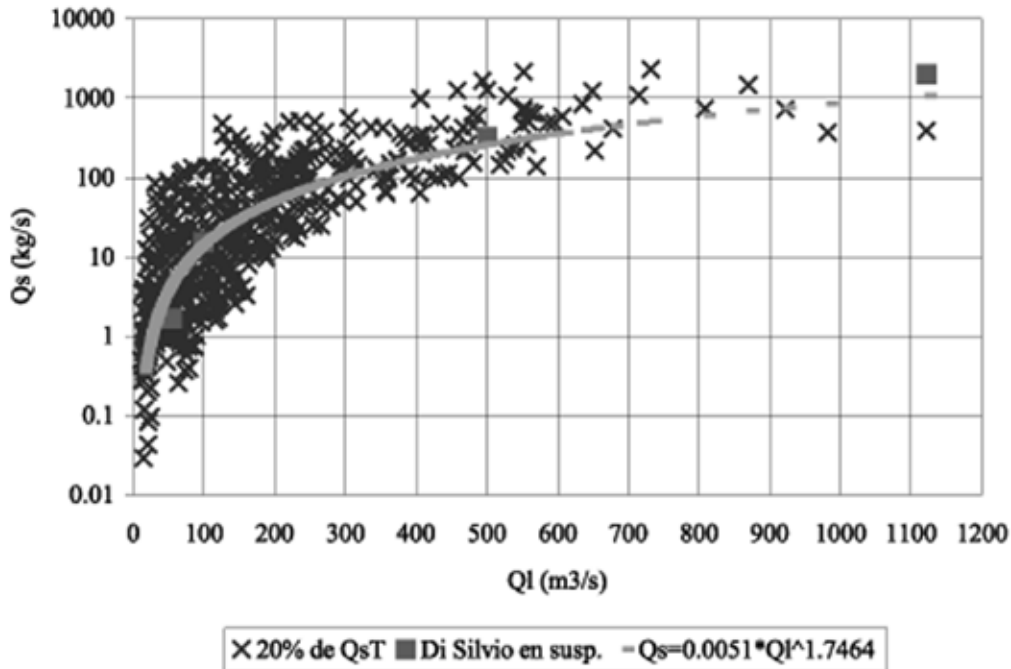


Figura n° 112

ASTILLEROS

Curva de duración de caudales aforados (78/85)

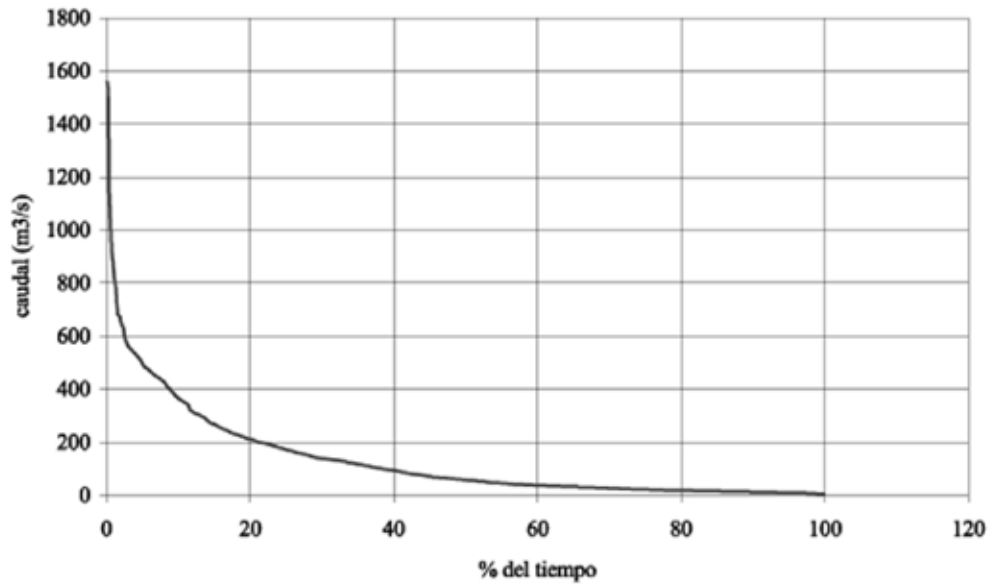
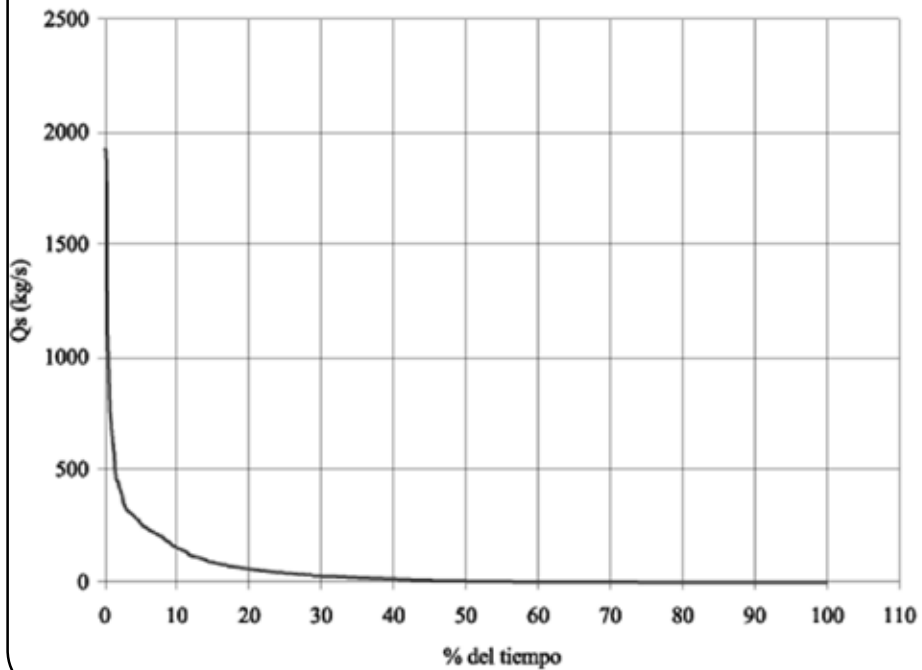


Figura nº 113

ASTILLEROS

Curva de duración de transporte sólido para los caudales aforados (78/85)



SAN TELMO

Concentración de sedimentos totales en suspensión (93/95).

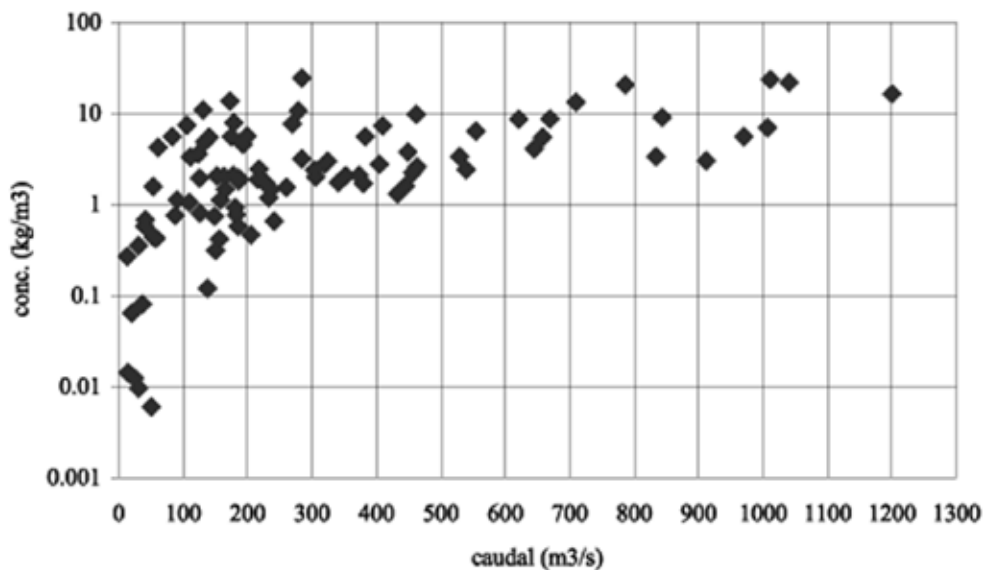
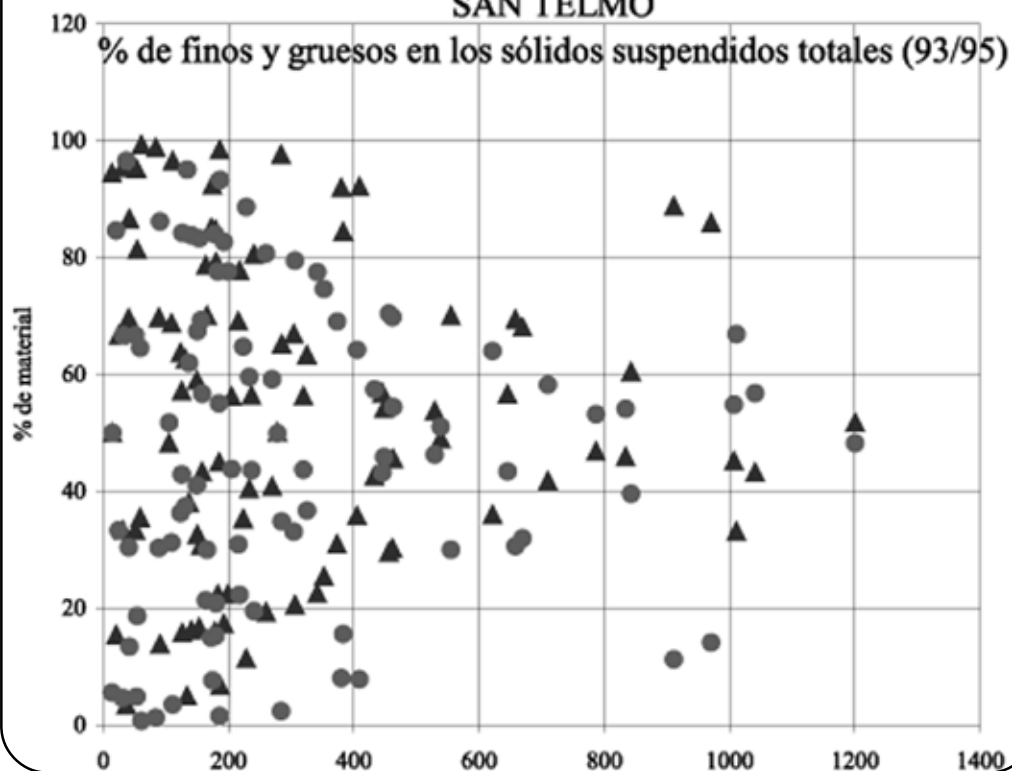


Figura n° 114

SAN TELMO

% de finos y gruesos en los sólidos suspendidos totales (93/95)



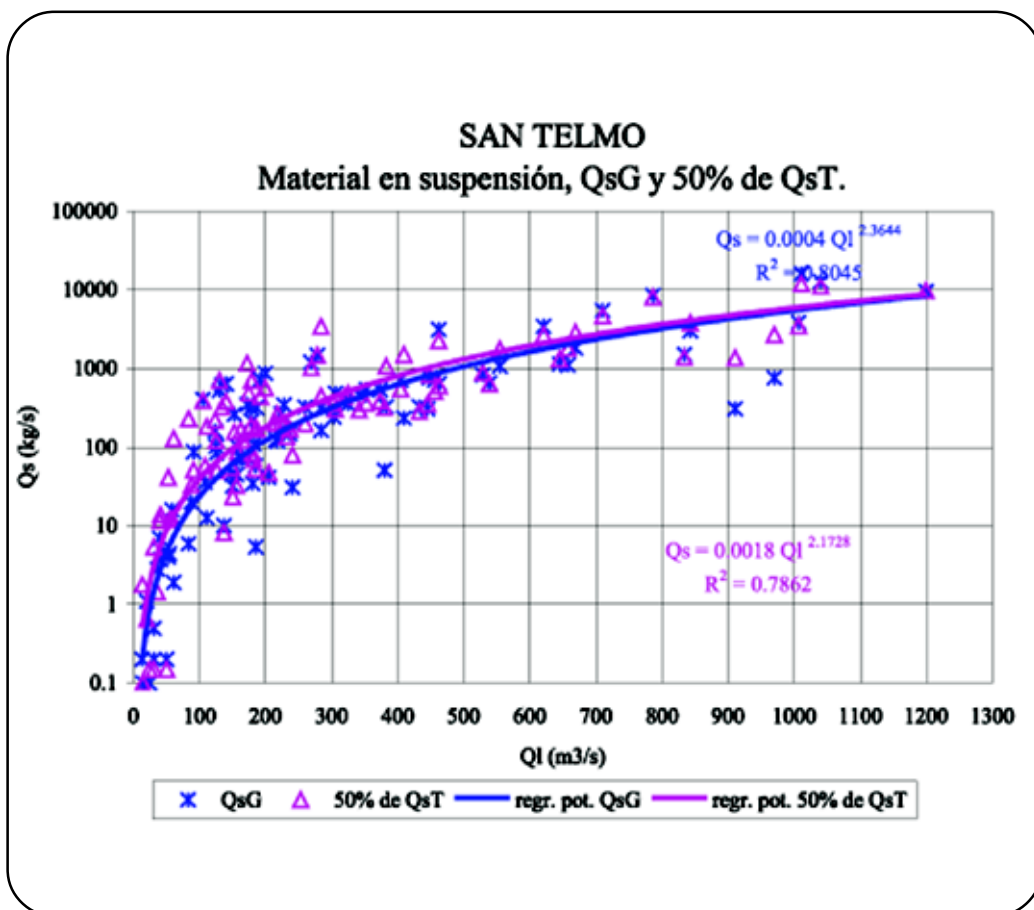
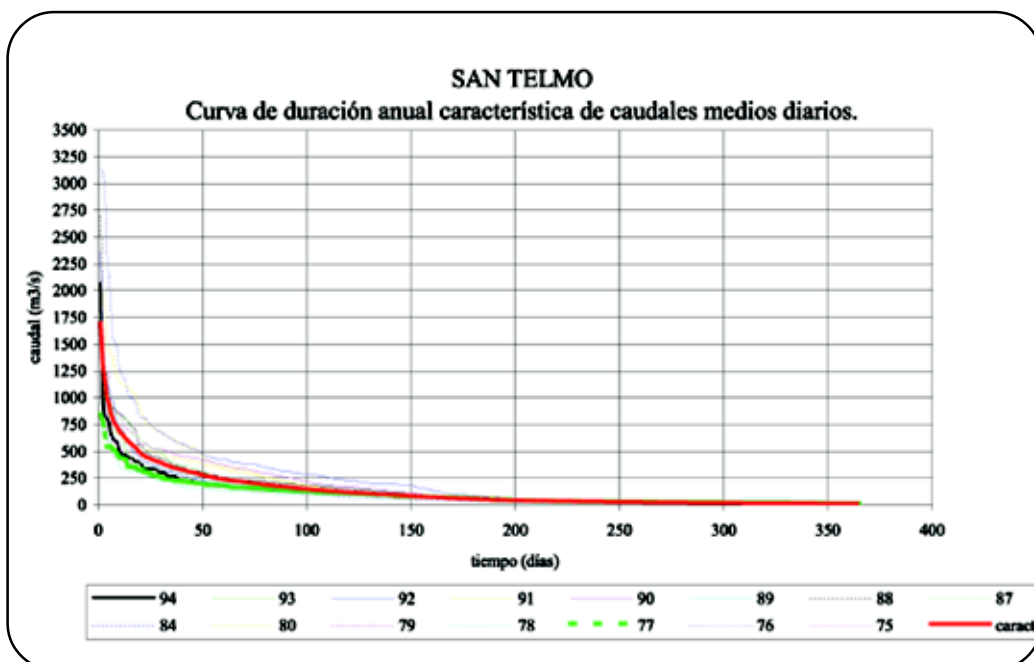


Figura n° 115

/ Figura n° 116



SAN TELMO

Curva de duración anual característica de transporte sólido en suspensión.

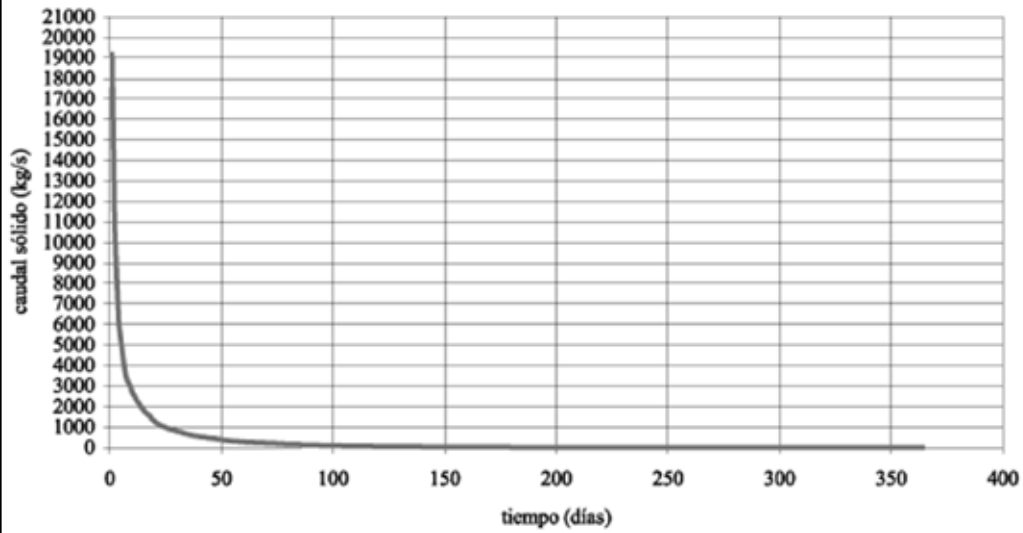
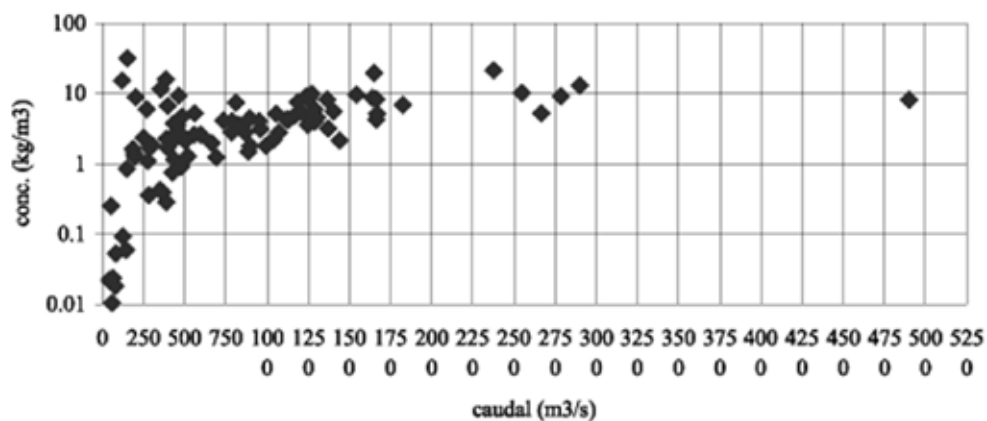


Figura n° 117

POZO SARMIENTO
Concentración de material sólido en suspensión (93 - 95)



POZO SARMIENTO
% de fino y grueso en el material suspendido total.

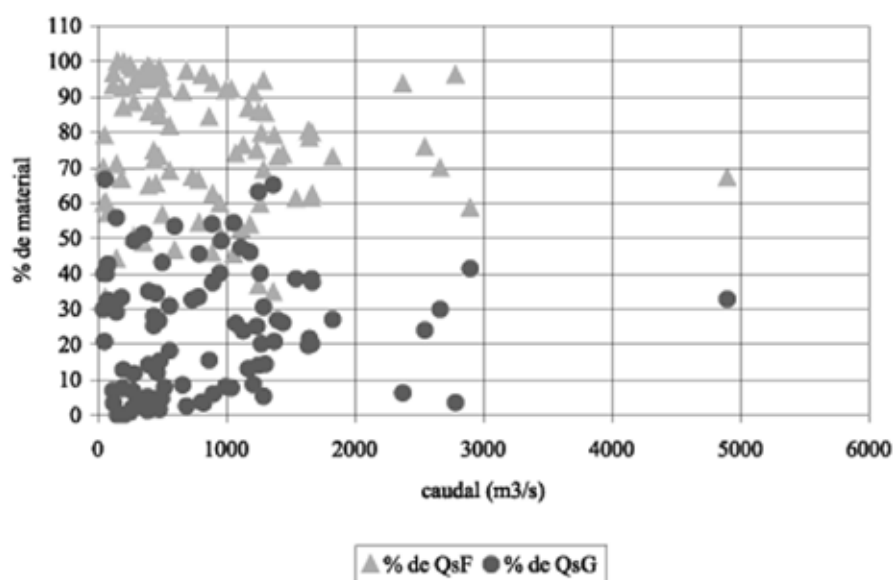


Figura n° 118

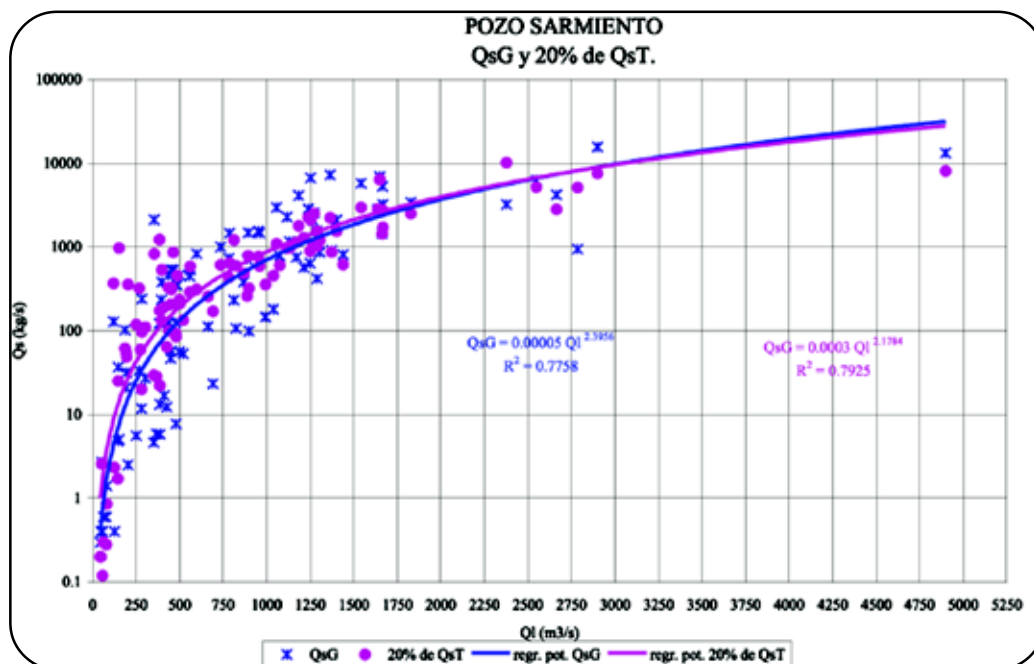
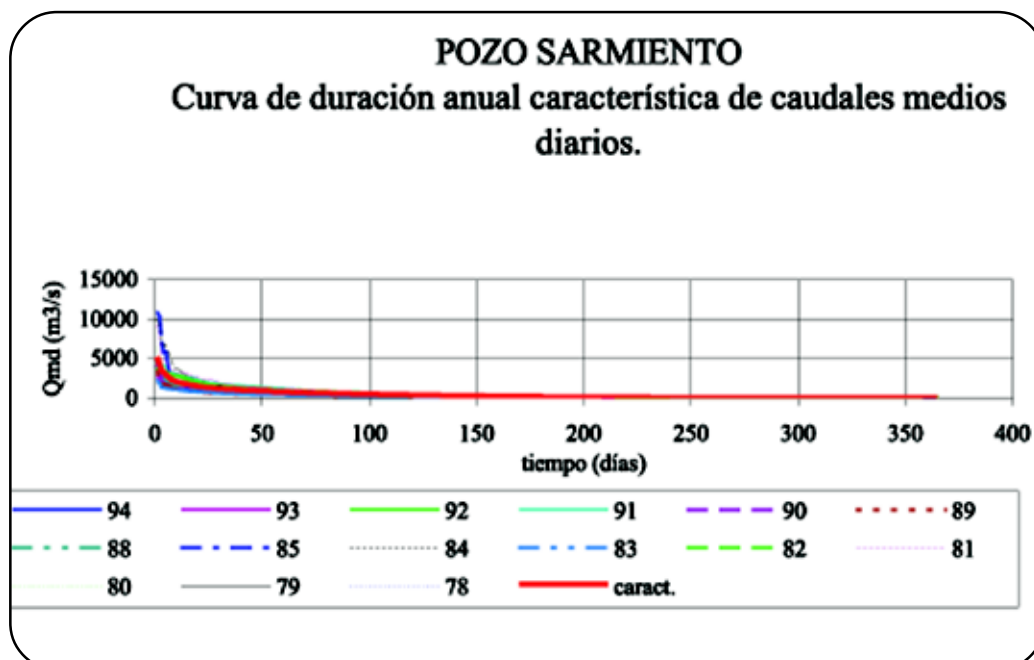


Figura n° 119

/ Figura n° 120



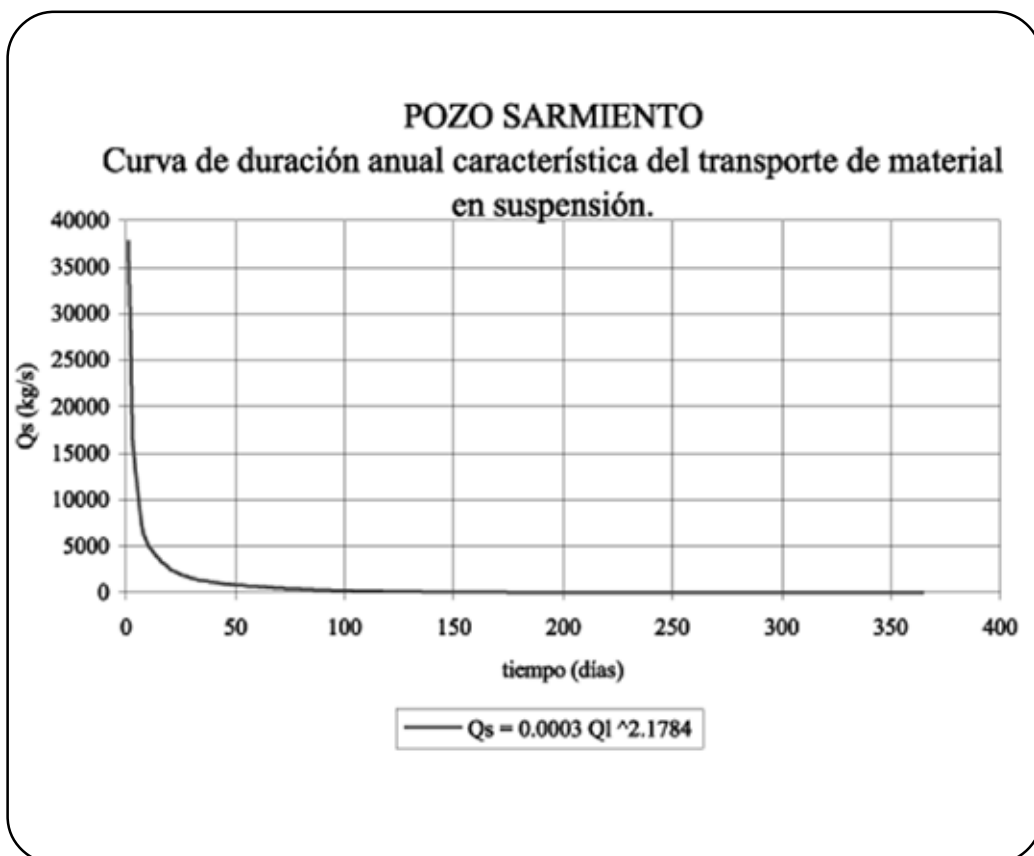
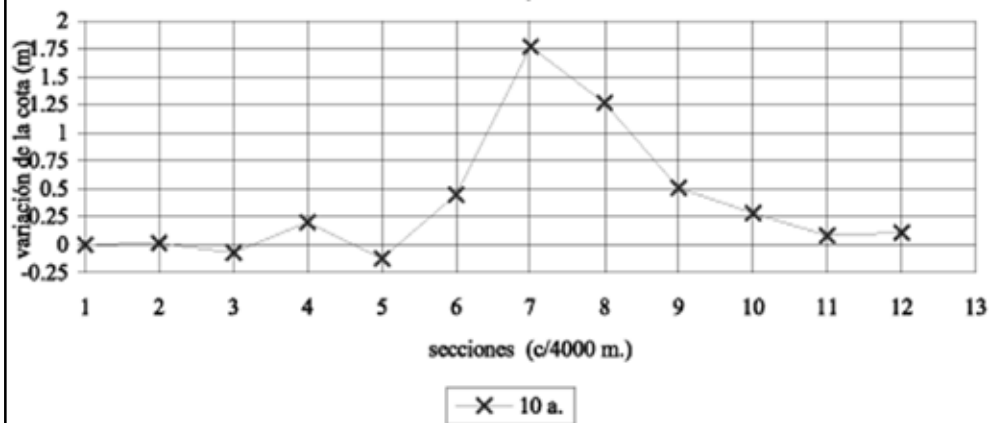


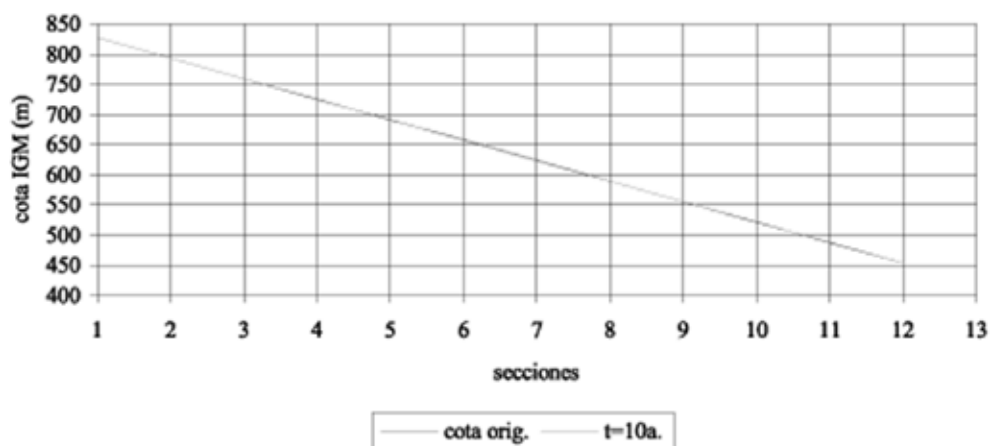
Figura n° 121

Río Grande - Variación de la cota del fondo.

$\Delta t = 1h.$, $Ql \text{ form.} = 31 \text{ m}^3/s.$



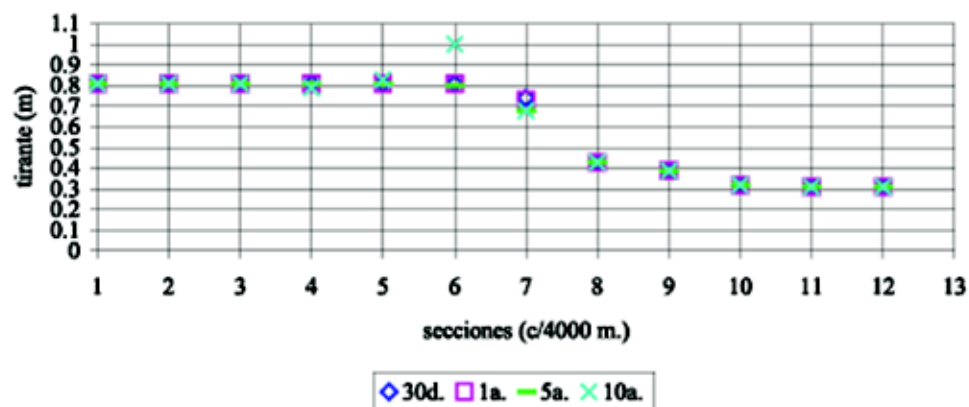
Río Grande - Perfil longitudinal



Generación y transporte de sedimentos

Figura n° 122

Río Grande - Variación del tirante GRANDMO7.dat



Río Grande - Variación del ancho superficial GRANDMO7.dat

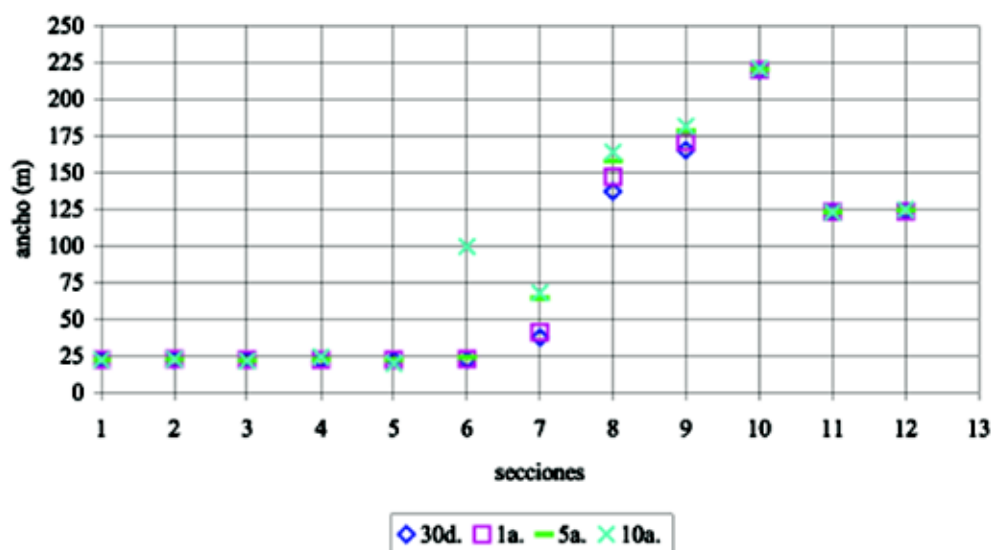
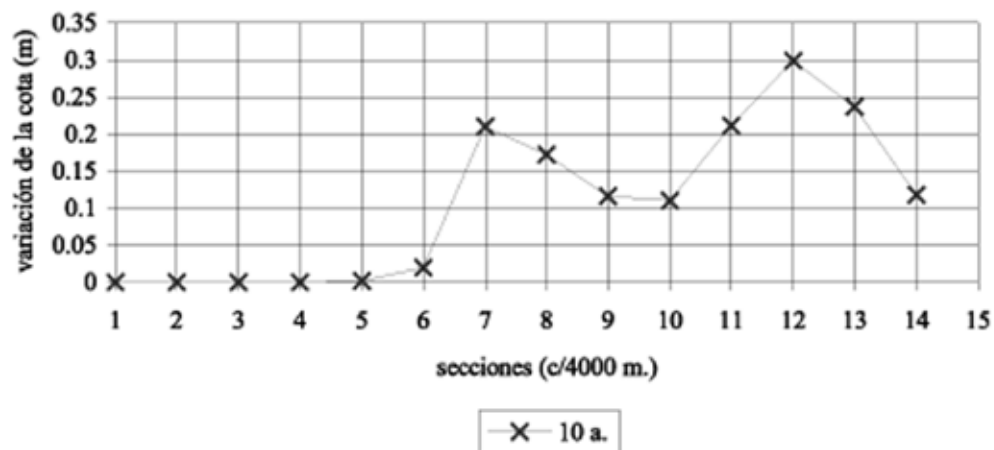


Figura nº 123

Río Lavayén - Variación de la cota de fondo.

$\Delta t = 1h$. $Ql \text{ form.} = 20 \text{ m}^3/s$.



Río Lavayén - Perfil longitudinal

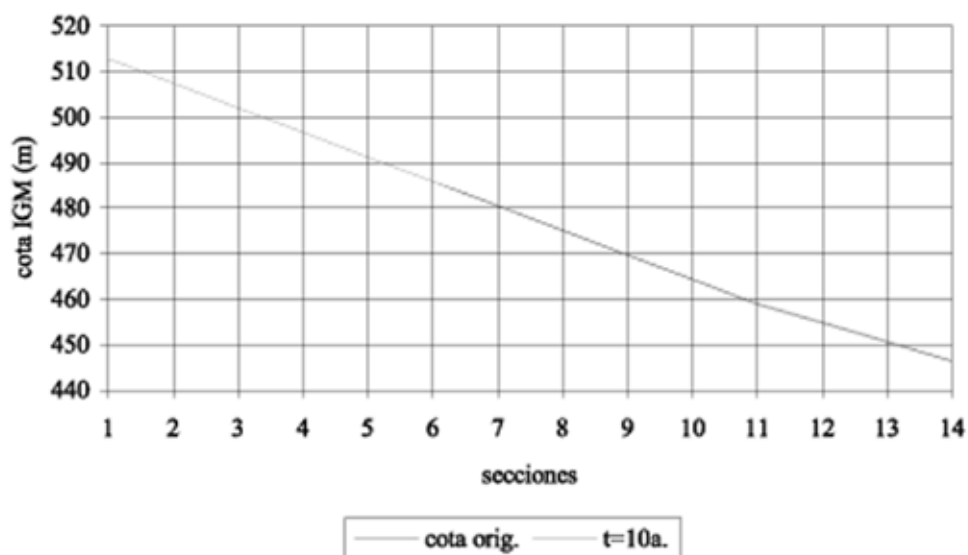
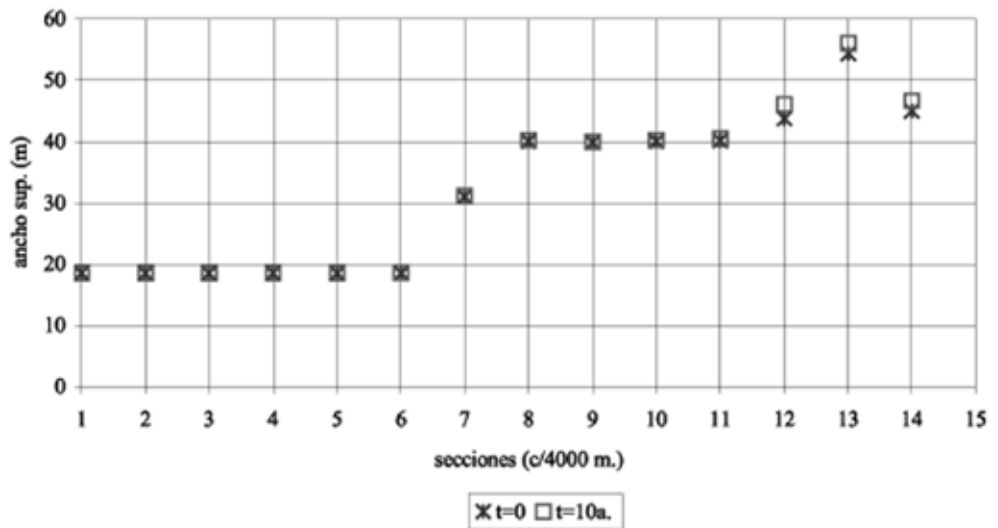


Figura n° 124

Río Lavayén - Variación del ancho superficial.
LAVAMOD.dat - Ql form. = 20 m³/s.



Río Lavayén - Variación del tirante
LAVAMOD.dat - Ql form. = 20 m³/s

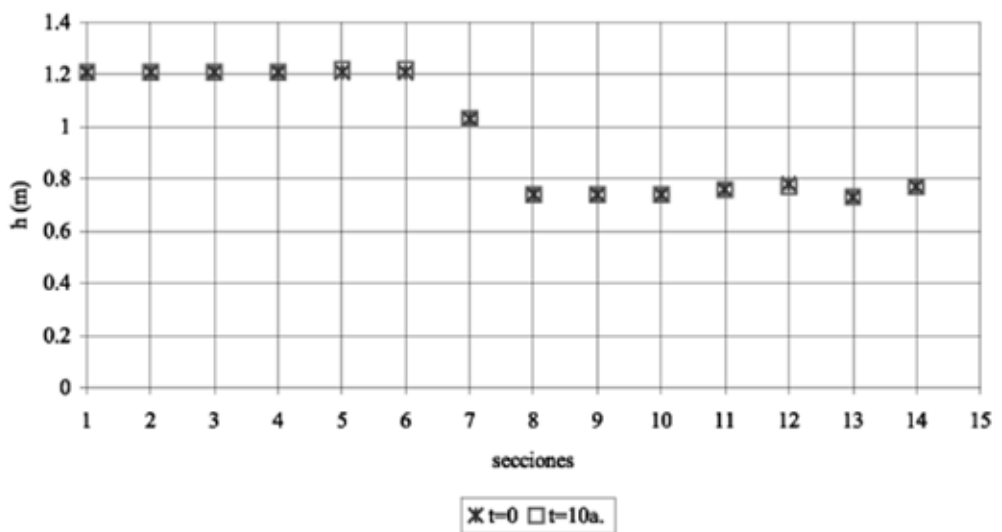
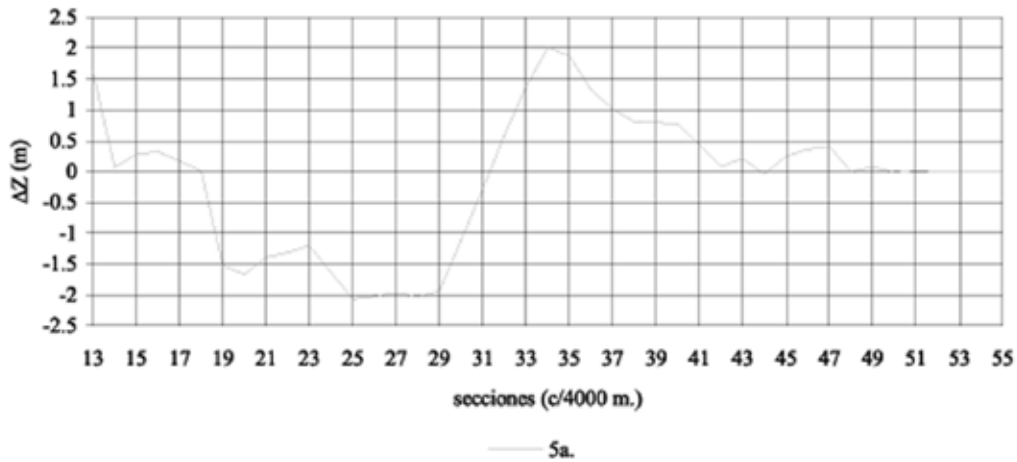


Figura n° 125

Río San Francisco - Variación cota de fondo.
 $\Delta t=1h.$, Ql form.Trib.en 19, 25 y 29.



Río San Francisco - Caudales

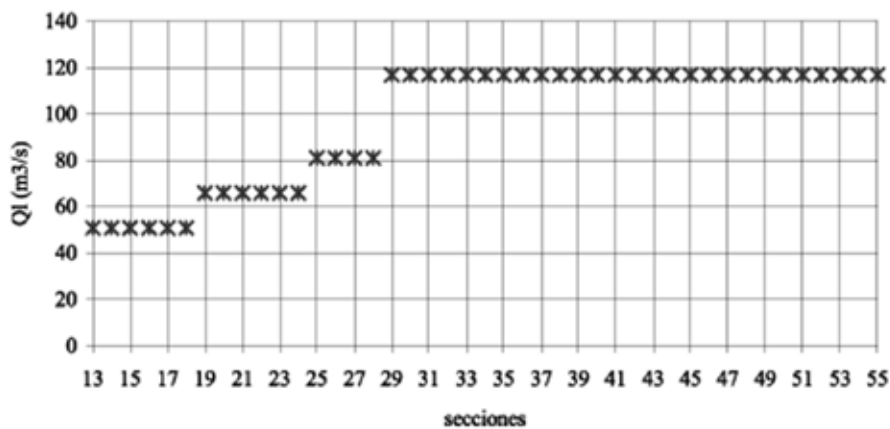


Figura n° 126

Río Grande y San Francisco - Variación de la cota de fondo.
 Ql form., $\Delta t = 15$ min., tributarios en 13(Lav.), 19, 25 y 29.

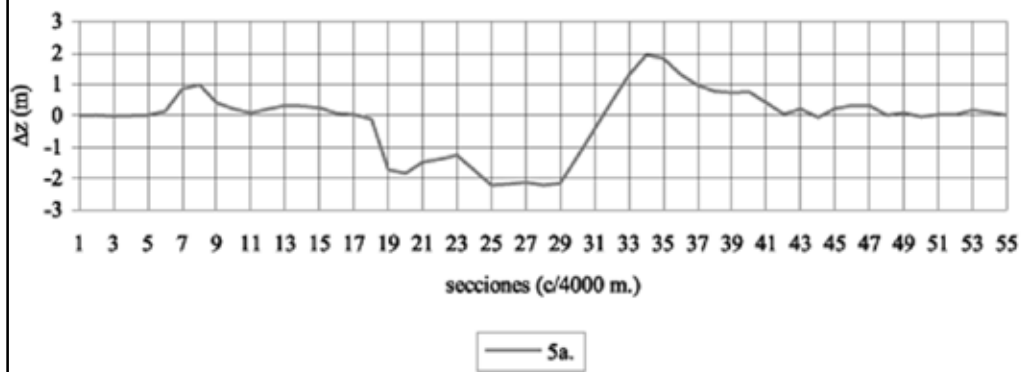
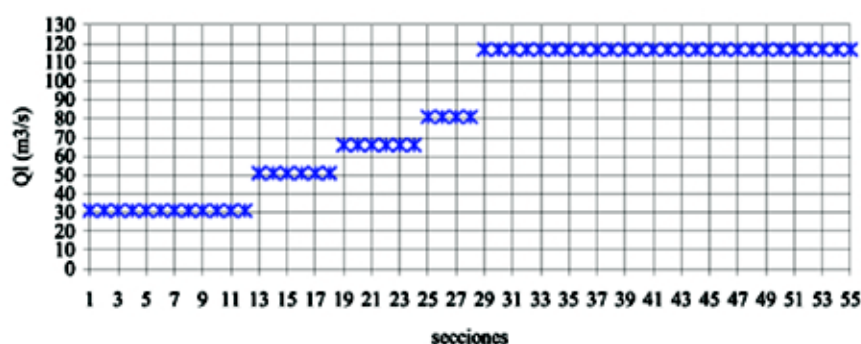
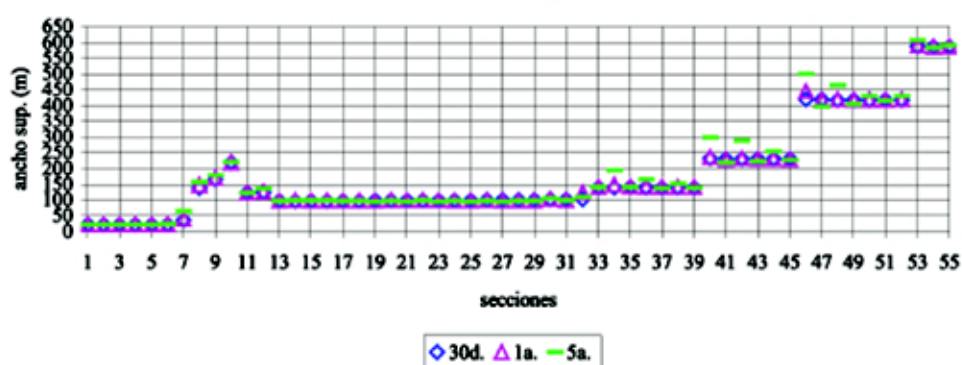


Figura n° 127

Río Grande - San Francisco Caudales.



Río Grande - San Francisco Variación del ancho superficial.



Río Grande - San Francisco Variación del tirante

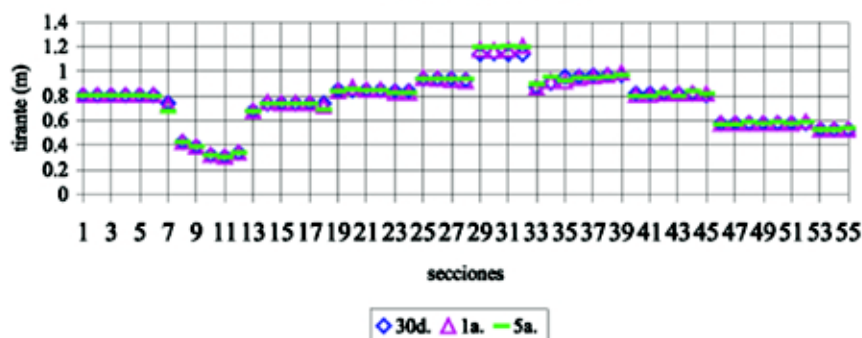


Figura nº 128

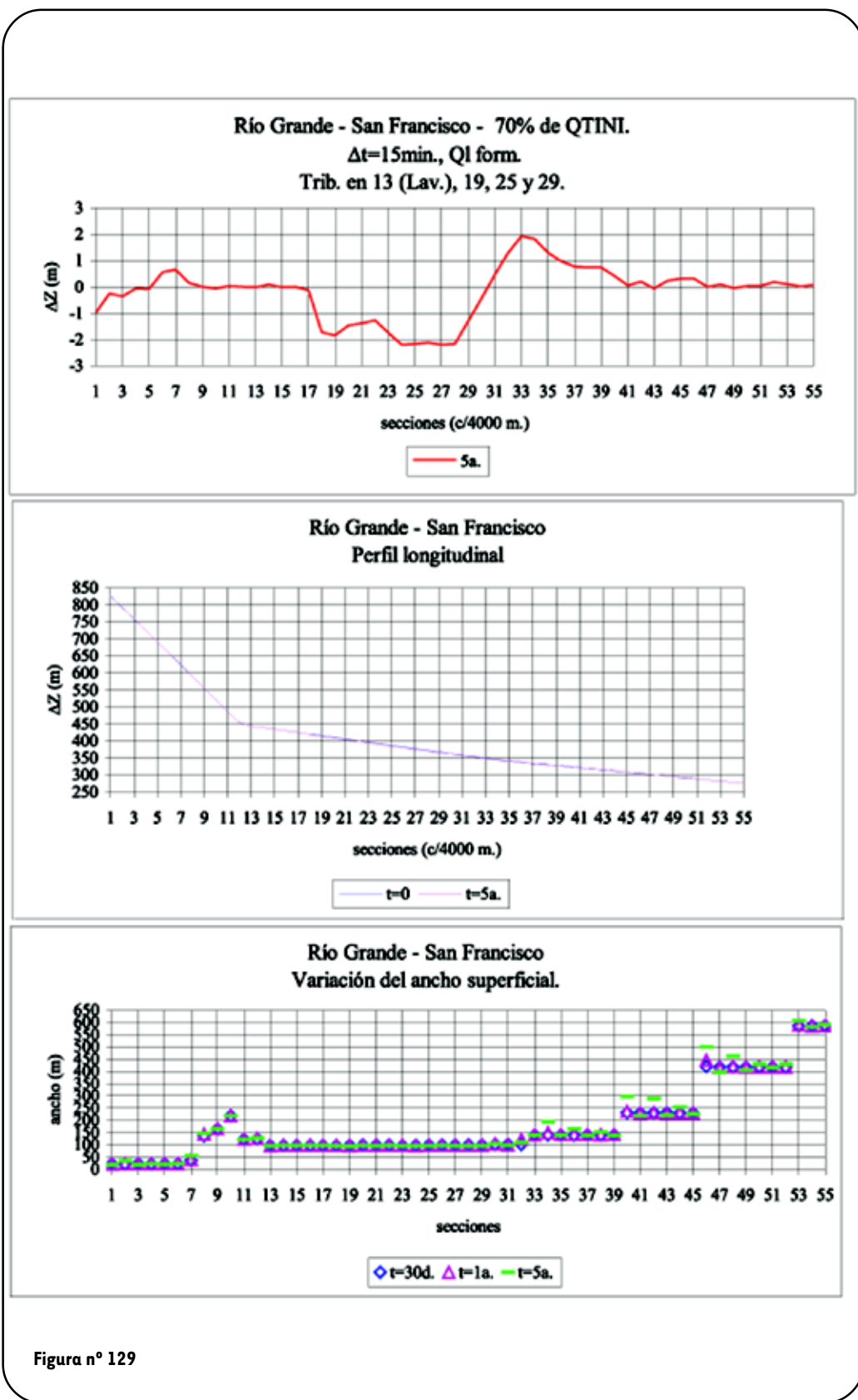
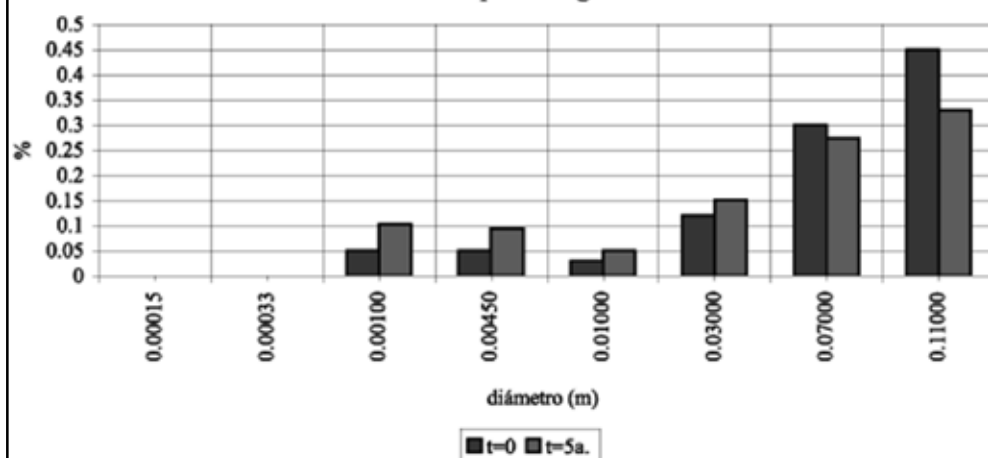
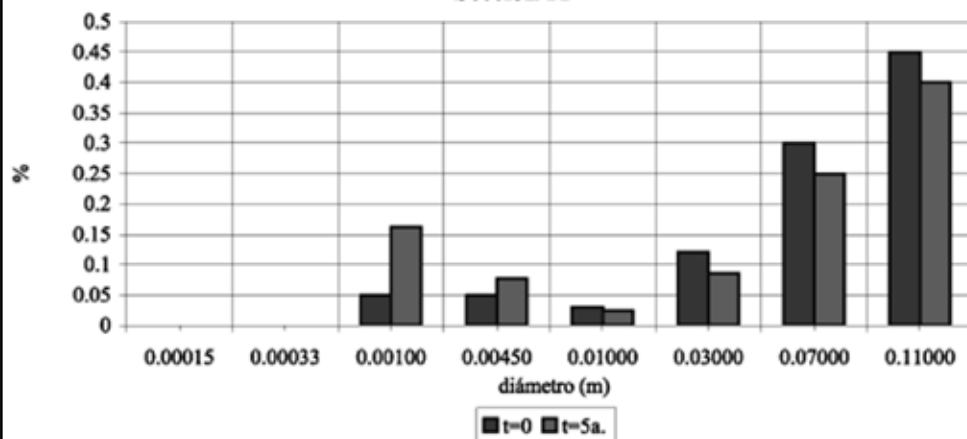


Figura n° 129

Sección 7 - Composición granulométrica.



Sección 11



Sección 13 - Río San Francisco ingreso LavayénTítulo

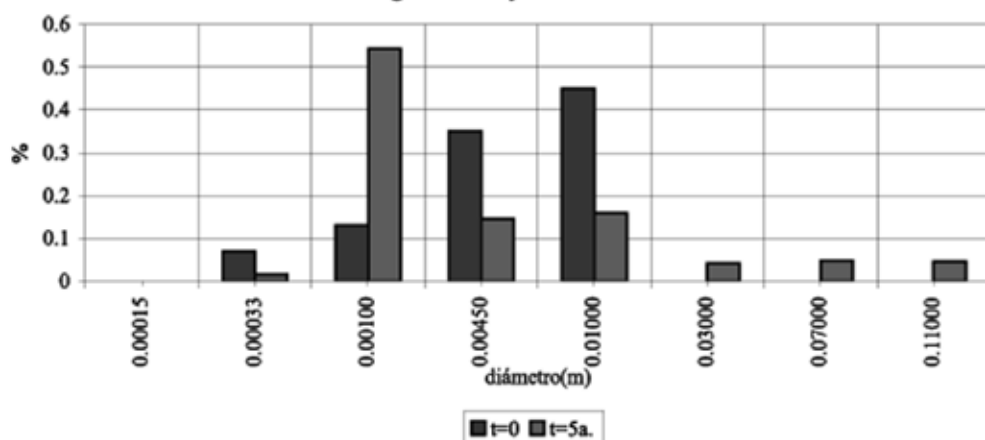


Figura n° 130

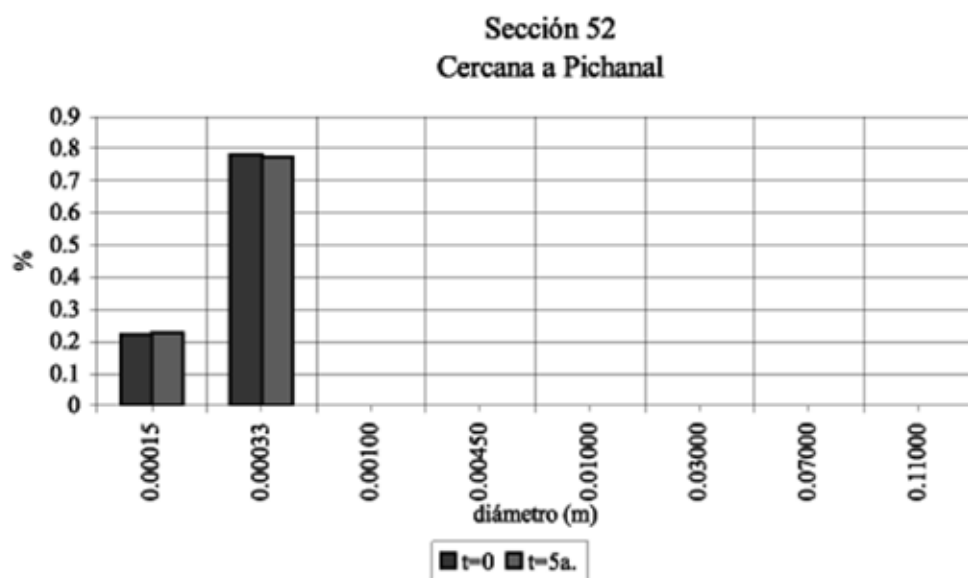
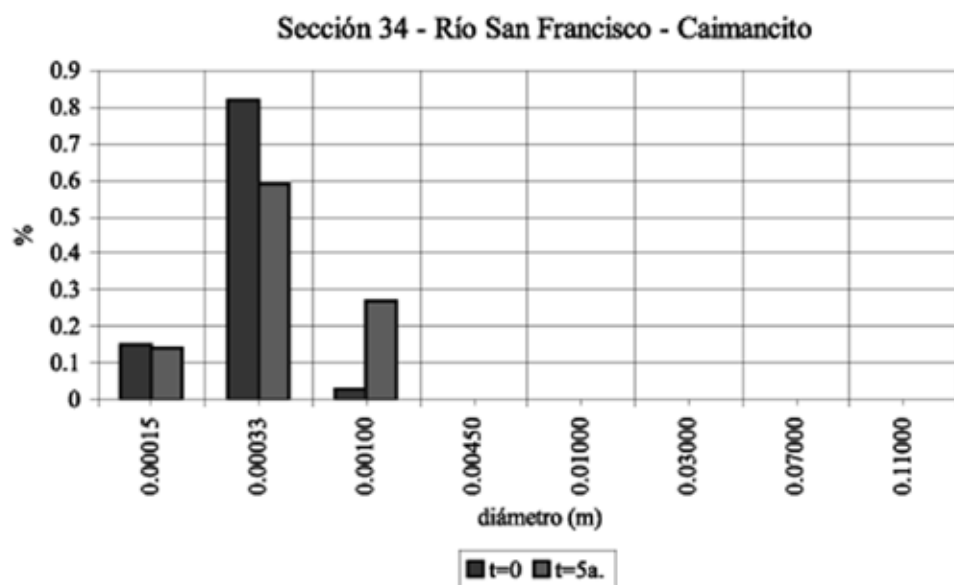
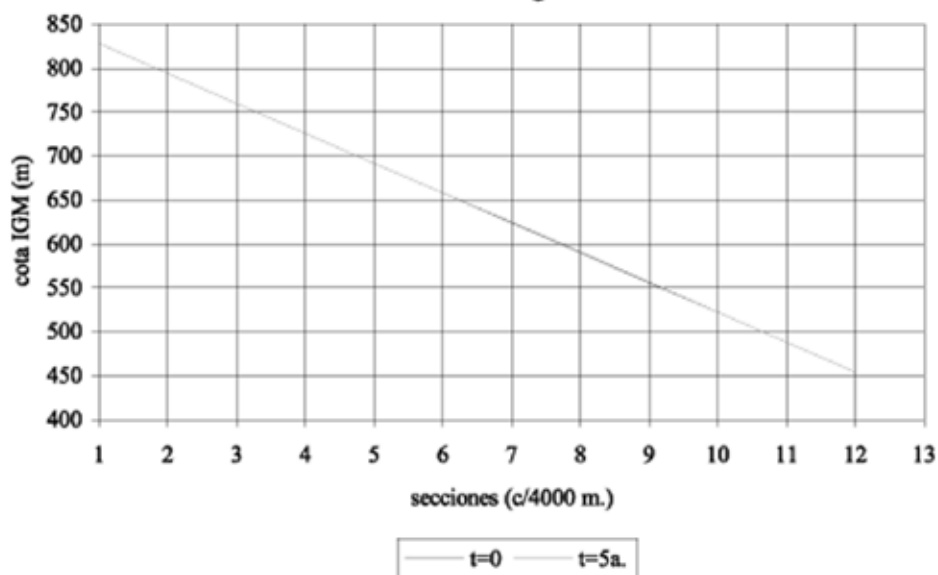


Figura n° 131

Río Grande Perfil longitudinal



Río San Francisco Perfil longitudinal

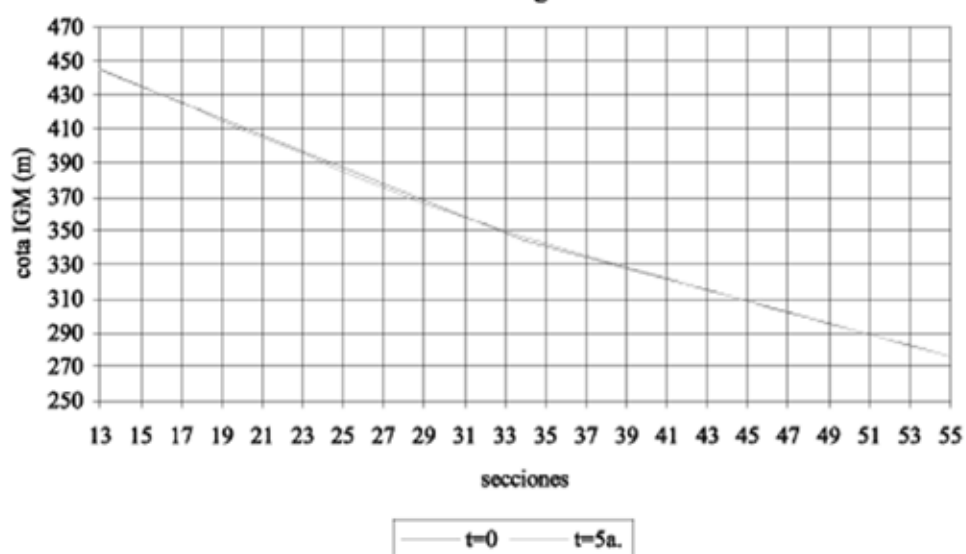
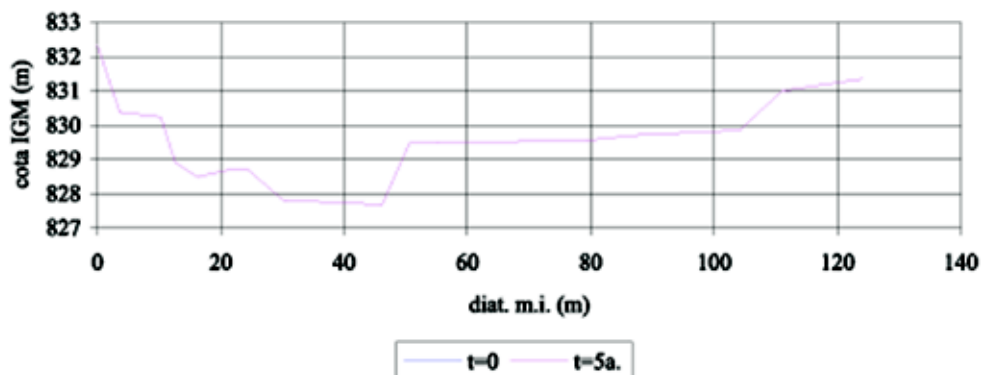
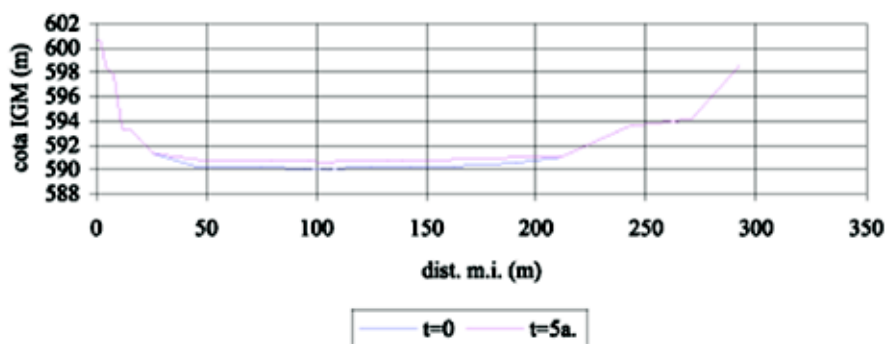


Figura n° 132

Sección 1
San Juancito - Río Grande.



Sección 8
Río Grande



Sección 13
Río San Francisco - ingreso Lavayén

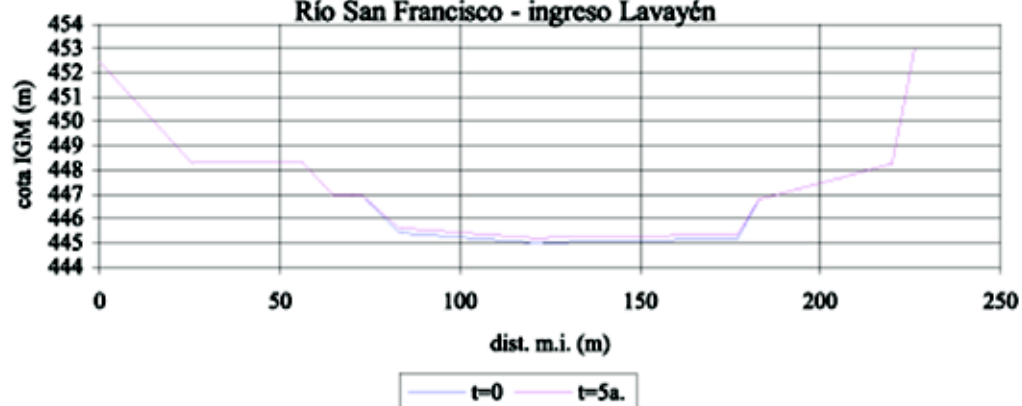
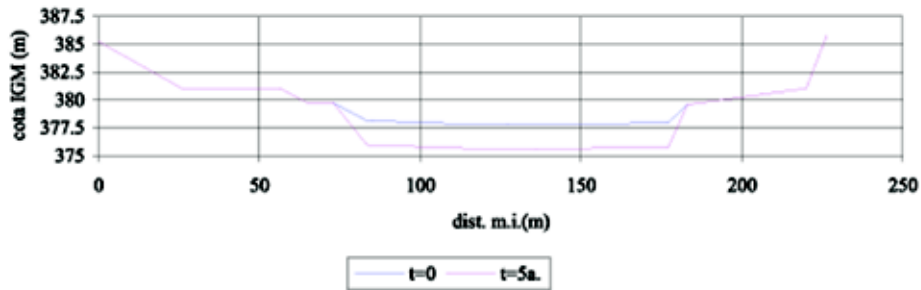
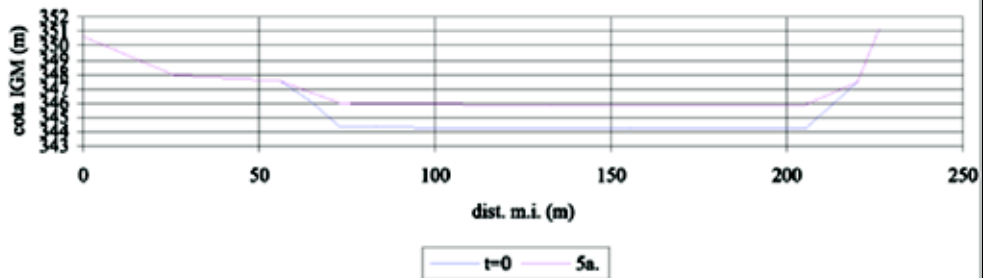


Figura n° 133

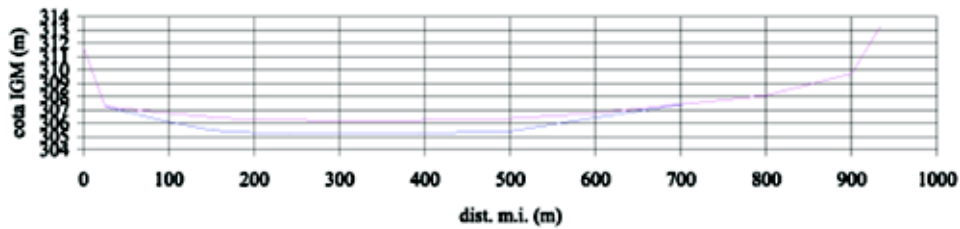
Sección 27



Sección 34



Sección 46



Sección 53

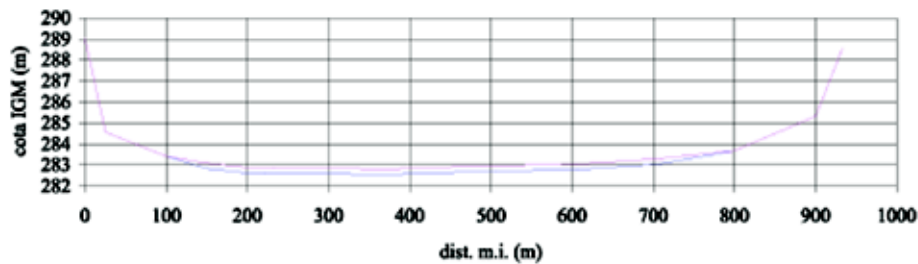
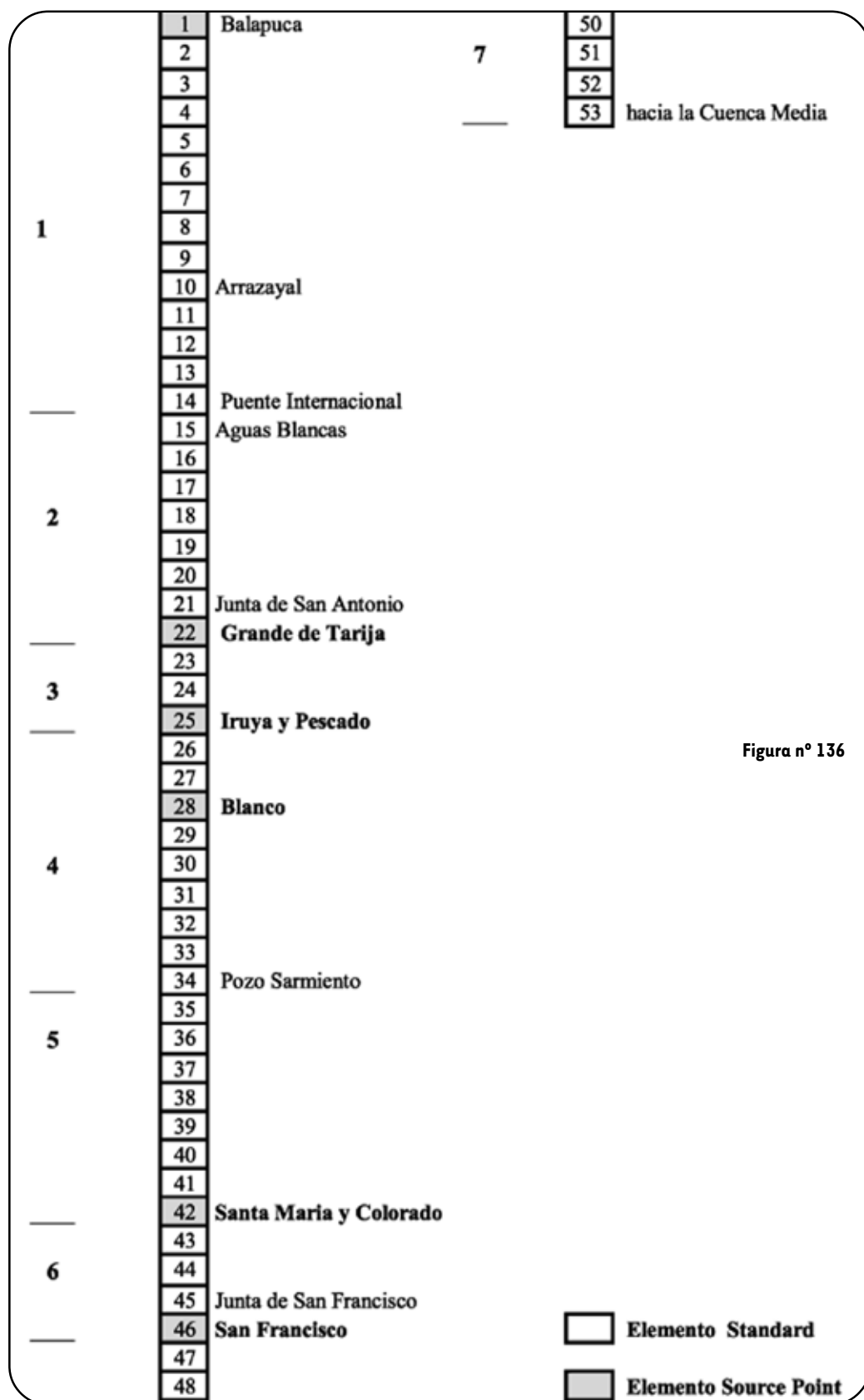


Figura n° 134



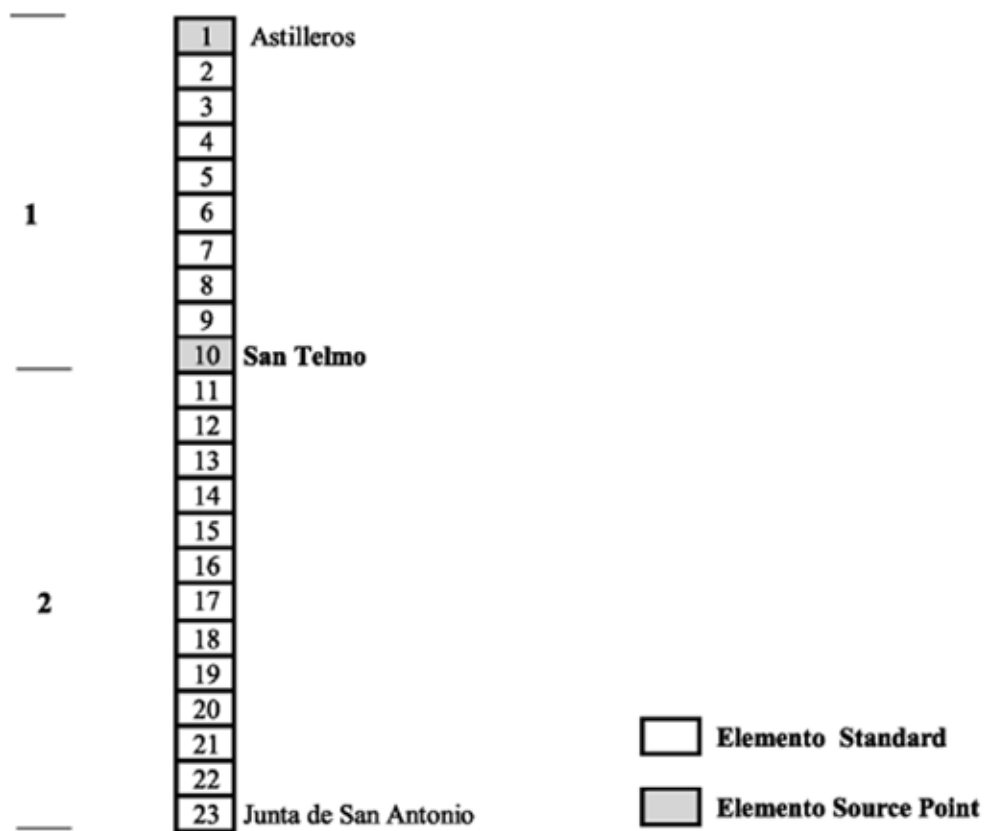


Figura n° 137

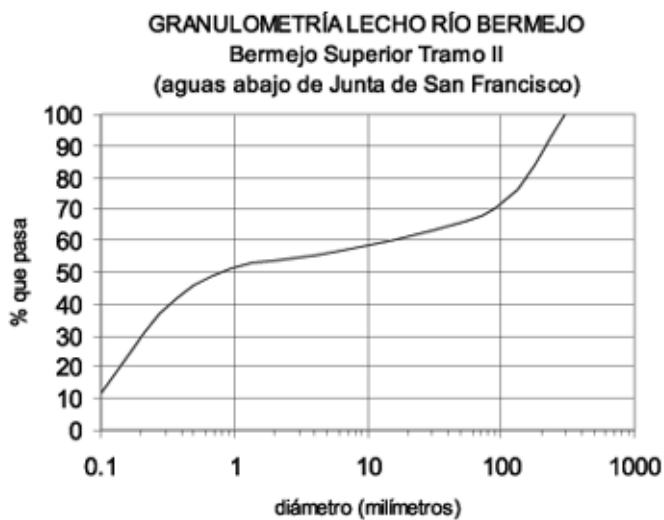
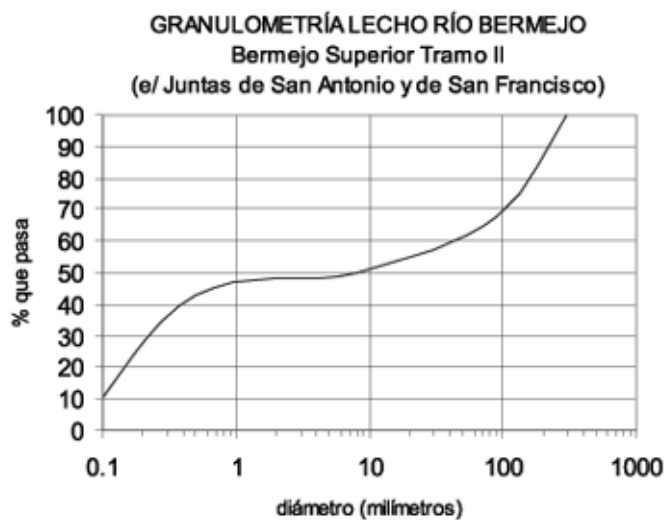
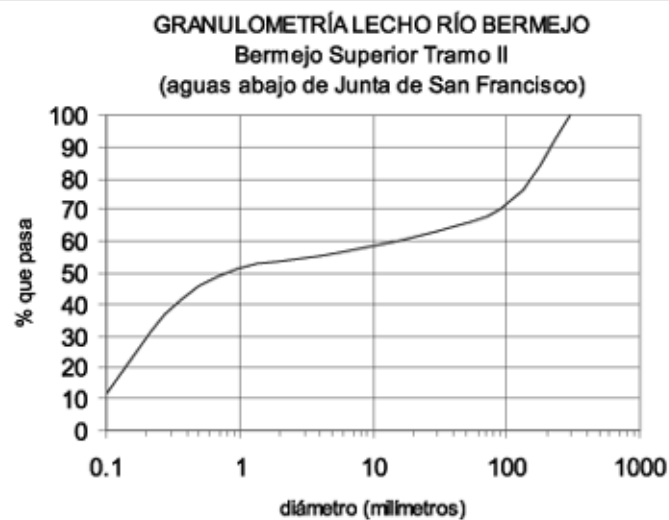


Figura n°138

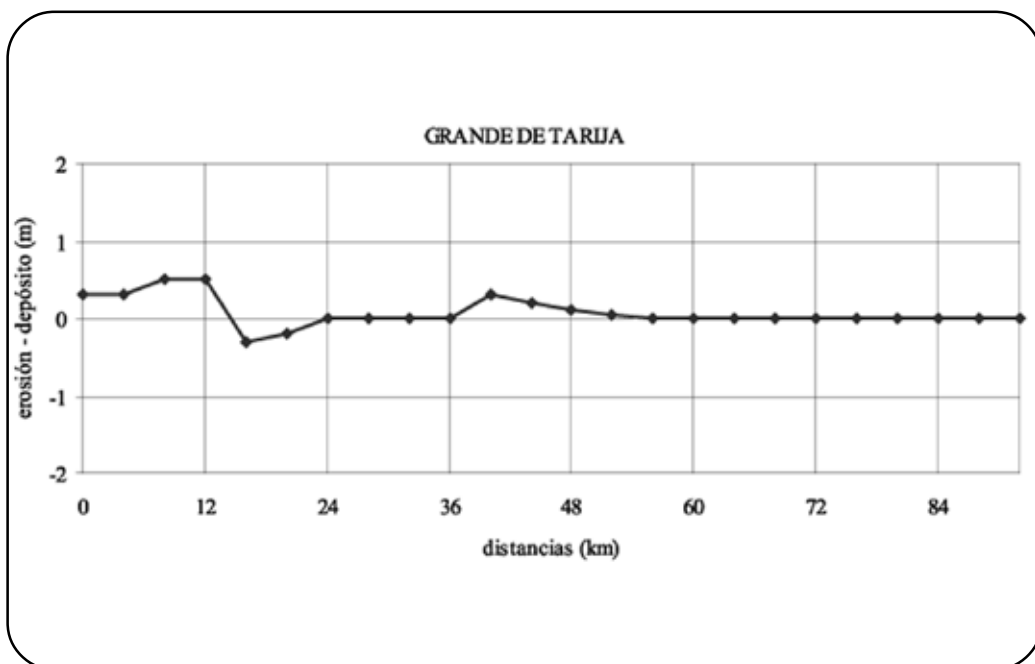
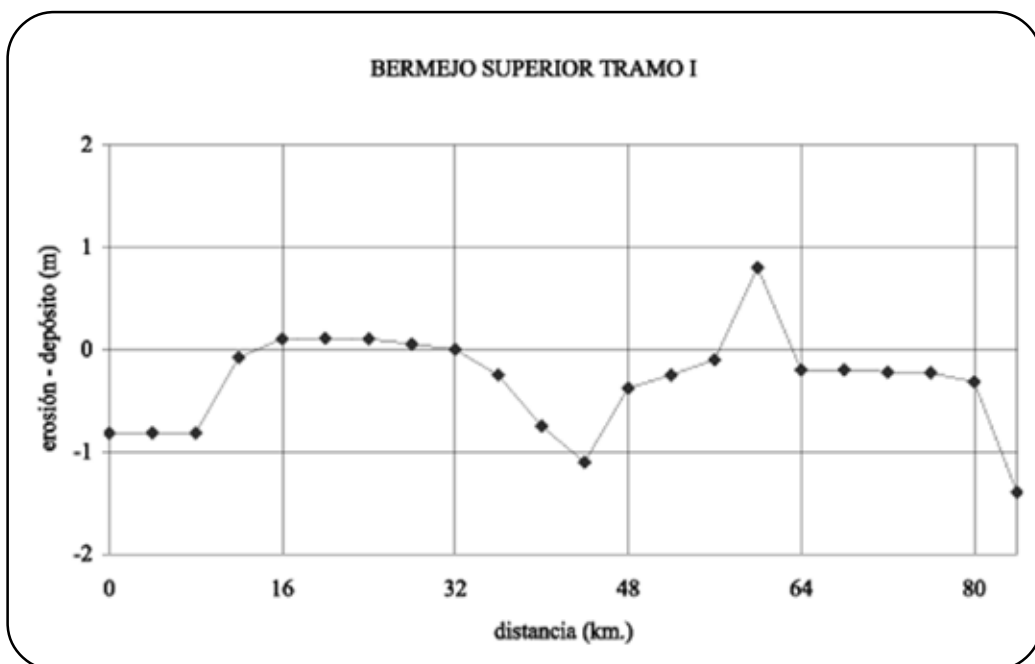


Figura n° 139

/ Figura n° 140 a



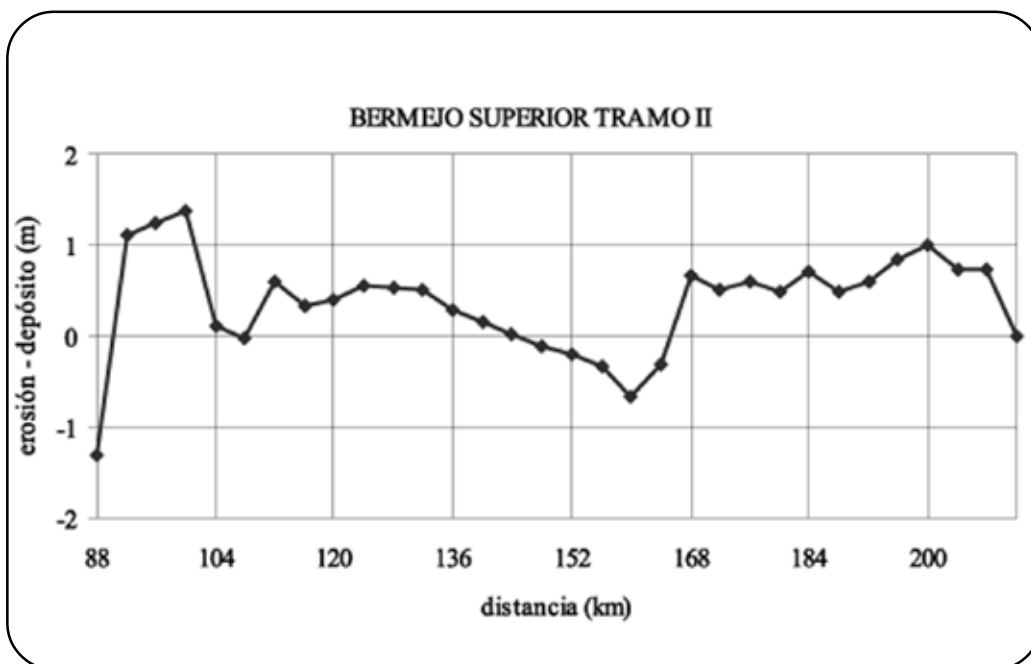
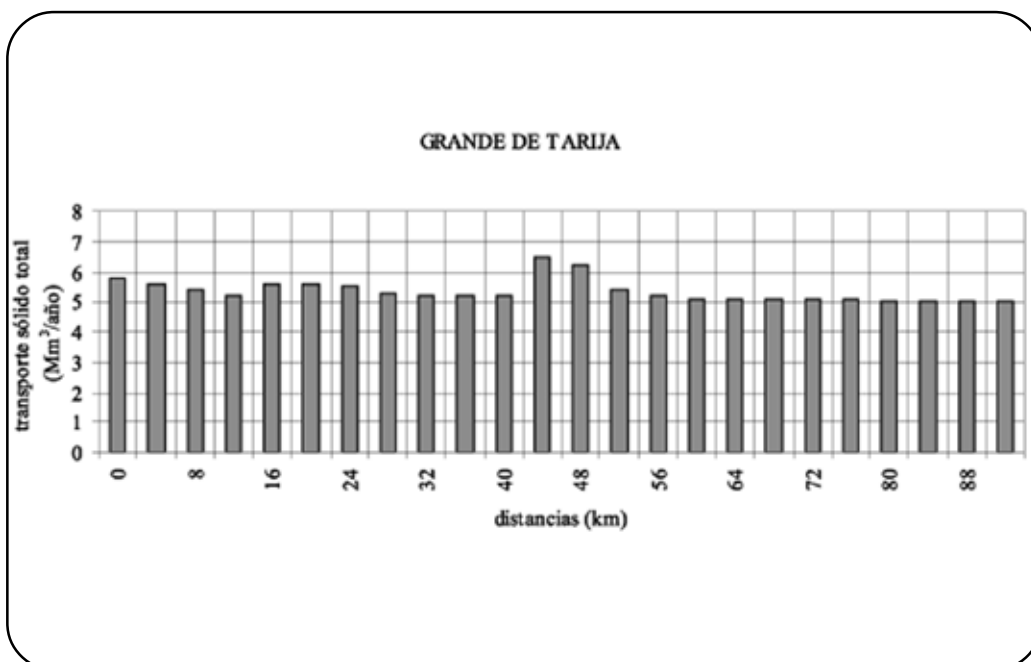


Figura n° 140 b

/ Figura n° 141



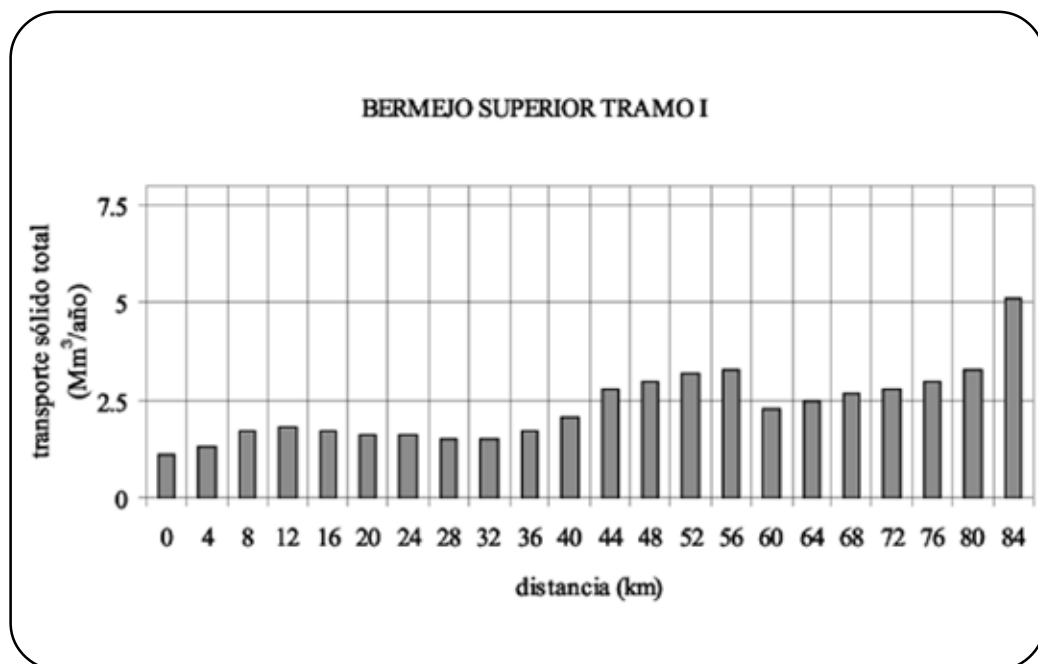
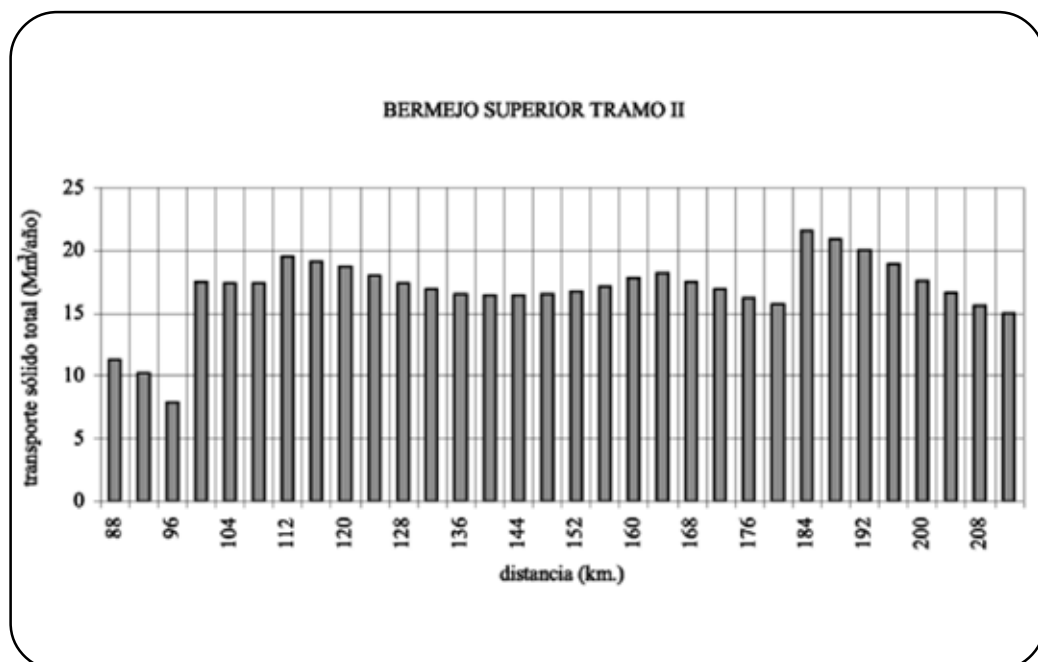


Figura n° 142 a

/ Figura n° 142 b



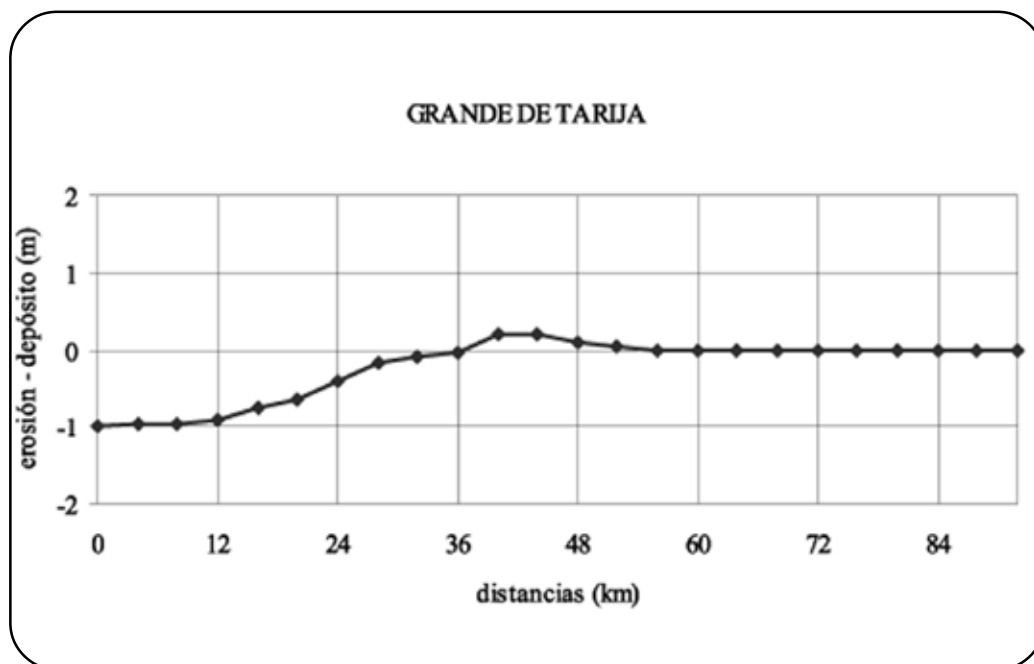
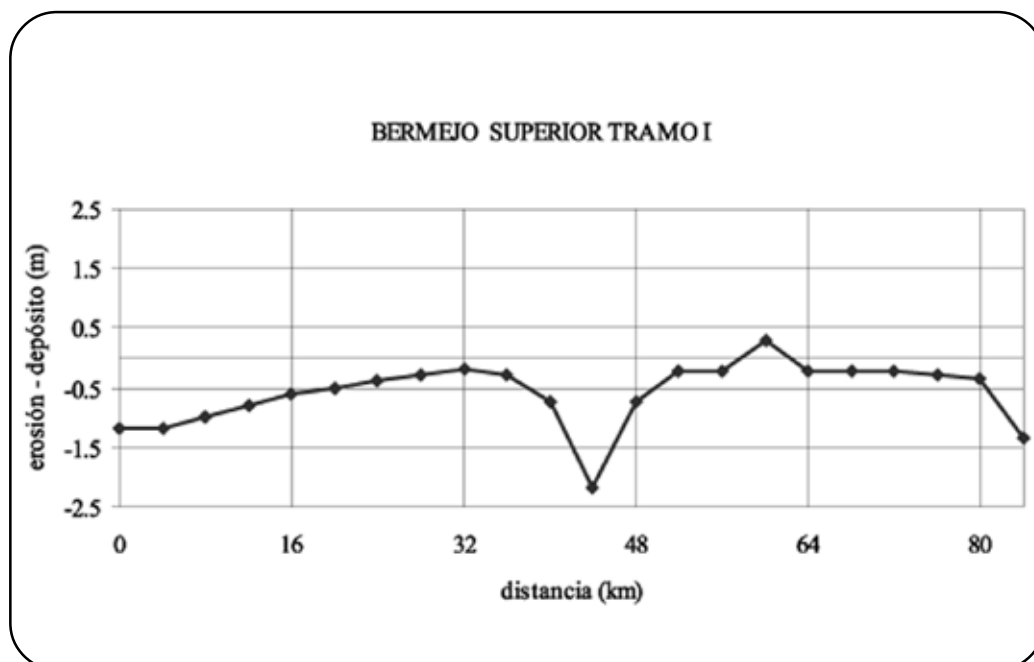


Figura n° 143

/ Figura n° 144



PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO GRANDE EN LOS MOLINOS (PT1).

N	X	Y	Z	OBS.
1	2000.000	2000.000	1362.870	START
2	2087.519	1850.017	1363.042	APEAD.FG
3	2421.728	2192.008	1360.853	DIQUE
4	2489.247	2214.068	1360.856	FIN MÓVIL
5	2357.920	2648.914	1342.011	MOJ.PERF.MUZO.
7	2349.163	2645.166	1342.067	BORDE BCA.
8	2348.675	2644.967	1340.467	PIE BCA.
9	2335.990	2639.624	1339.620	RÍO
10	2328.498	2636.336	1339.354	RÍO
11	2318.418	2632.029	1339.609	RÍO
12	2304.392	2628.038	1339.198	RÍO
13	2302.846	2625.375	1339.856	PLAYA
14	2288.821	2619.383	1339.609	PLAYA
15	2280.356	2607.220	1340.453	PLAYA
16	2277.984	2593.360	1340.162	PLAYA
17	2260.834	2581.787	1340.726	PLAYA
18	2171.302	2569.169	1340.628	PLAYA
19	2153.610	2561.610	1340.692	PLAYA
20	2148.800	2569.505	1339.618	PLAYA
21	2142.908	2566.990	1339.756	PIE BCA.
22	2152.716	2516.671	1347.080	SAL.LIMP.DES.
24	2134.412	2553.376	1345.125	BORDE BCA.
25	2130.574	2551.757	1346.833	TN
5	2129.026	2551.105	1347.081	MOJ.PERF.MUDER.
23	2122.246	2548.165	1347.629	TN

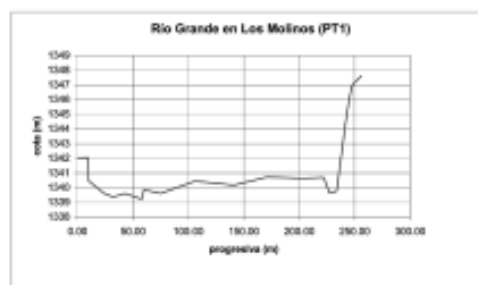
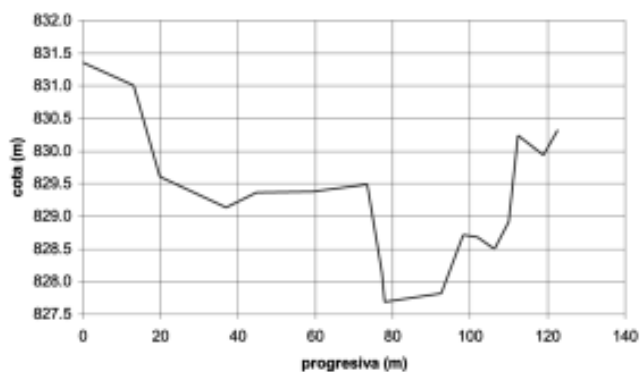


Tabla n° 1

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO GRANDE EN SAN JUANCITO (PT2)

N	X	Y	Z	OBS.
2	1924.174	1903.719	831.355	MOJ.MARG.DER.
3	1932.257	1913.983	831.006	BARRANCA
4	1936.451	1919.308	829.607	PIE BCA.
5	1947.050	1932.766	829.135	PLAYA
6	1951.919	1938.949	829.366	PLAYA
7	1960.700	1950.098	829.380	PLAYA
8	1969.593	1961.390	829.491	PLAYA
10	1971.897	1964.316	828.139	PELO DE AGUA
9	1972.362	1964.906	827.686	CAUCE
11	1981.402	1976.385	827.821	CAUCE
12	1984.913	1980.844	828.719	LAJA
13	1987.192	1983.737	828.683	LAJA
14	1989.912	1987.191	828.496	LAJA
15	1992.168	1990.055	828.918	PIE BCA.
16	1993.657	1991.946	830.241	BARRANCA
17	1997.718	1997.103	829.938	TN
1	2000.000	2000.000	830.321	MOJ.MARG.IZQ.

Río Grande en San Juancito (PT2)



Generación y transporte de sedimentos

Tabla n° 2

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO GRANDE EN SAN PEDRO (PT3)

N	X	Y	Z	OBS.
2	2708.089	3014.937	628.495	MOJ.DER.
3	2718.466	2985.697	635.620	BAR.PTE.
4	2729.416	3013.839	628.110	RÍO
5	2729.039	2984.311	627.828	PR.PTE.
6	2757.996	3012.389	627.534	RÍO
7	2789.438	3010.774	627.405	RÍO
8	2810.622	3009.690	626.475	RÍO
9	2838.995	3008.238	626.102	RÍO
10	2864.601	3006.928	625.304	PLAYA
11	2884.216	3005.924	624.149	CAU.P.AGUA
12	2894.468	3005.400	623.918	CAU.FDO.
13	2906.025	3004.809	624.170	CAU
14	2931.225	3003.519	626.018	P
15	2953.628	3002.373	626.102	P
16	2974.054	3001.328	626.891	P
17	2983.914	3000.823	627.170	COL
18	2988.111	3000.608	627.320	COL
19	2992.049	3000.407	631.828	GAV
20	2995.549	3000.228	632.332	P.B
21	2998.056	3000.099	634.518	BCA
1	3000.000	3000.000	634.542	START
22	2997.992	2983.180	635.620	BAR.PTE
23	3026.959	2997.158	634.841	ÁRBOL
24	3021.373	3021.754	634.653	ÁRBOL
25	2987.342	2982.118	628.609	PTE-1.45

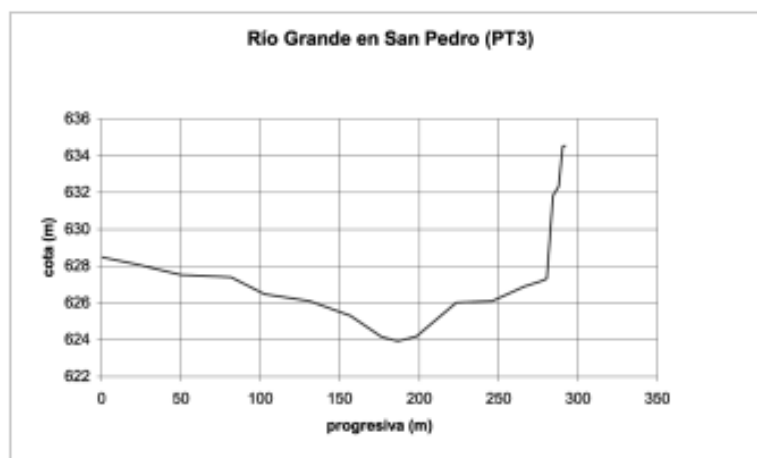


Tabla n° 3

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO LAVAYÉN EN BAJADA DE PINTO (PT4)

N	X	Y	Z	OBS.
14	2000.880	1990.549	300.363	MOJ.IZQ
1	2000.000	2000.000	300.000	START
13	1999.799	2002.162	299.017	BCA
9	1999.477	2005.614	295.339	CAUCE
10	1999.174	2008.873	294.211	CAUCE
11	1999.066	2010.030	294.009	CAUCE
12	1998.814	2012.733	294.155	CAUCE
8	1997.780	2023.854	294.298	CAUCE
7	1997.724	2024.448	295.365	P.AG
6	1997.499	2026.867	296.959	BCA
5	1996.965	2032.602	297.950	BCA
4	1996.505	2037.532	299.829	BCA
3	1996.110	2041.781	300.215	TN
2	1995.081	2052.833	300.066	MOJ.DER
15	1999.568	1995.361	300.275	ARBOL
16	2010.910	2003.199	299.329	FINAL
17	2011.866	1998.040	300.227	UN.AL
18	2012.948	1992.189	300.151	AL
19	2000.612	1979.036	300.642	EST.TEST.MCDIO

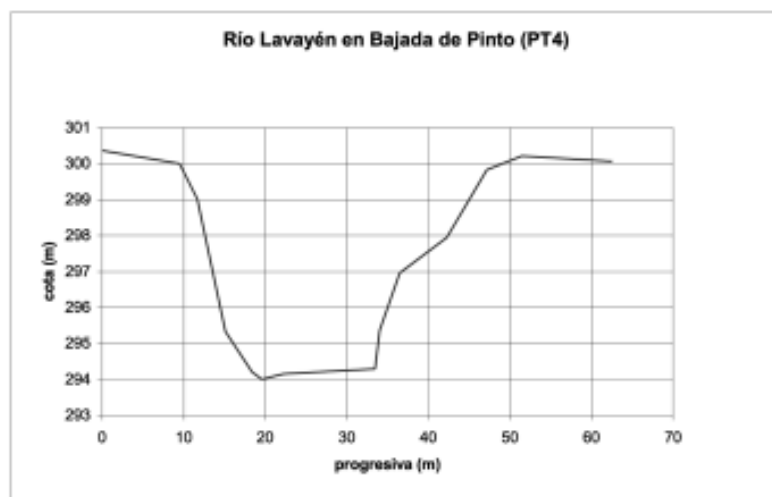


Tabla n° 4

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO LAVAYÉN EN PUENTE ACCESO A "EL PIQUETE" (PT5)

N	X	Y	Z	OBS.	cota IGM
2	1989.759	2056.896	308.783	MOJ.DER	
3	1990.062	2055.211	308.977	BCA	
4	1991.173	2049.041	299.107	P.B	
5	1991.999	2044.448	297.430	CAU-P.AG	
6	1993.143	2038.095	297.086	CAU	
7	1994.103	2032.758	297.168	CAU	
8	1995.553	2024.707	296.934	CAU	
9	1996.426	2019.855	296.997	CAU	
10	1997.408	2014.400	297.020	CAU	
11	1998.142	2010.321	296.924	CAU	
12	1998.701	2007.219	297.008	CAU	
1	2000.000	2000.000	300.000	START	
13	2004.740	1973.662	299.589	RIO	
14	2005.538	1969.227	299.484	RIO	
15	2006.814	1962.133	298.636	RIO	
16	2007.499	1958.328	299.707	P.B	
17	2008.323	1953.751	302.606	BCA	
18	2008.566	1952.399	302.750	MOJ.IZQ	464.69
19	2042.769	1984.206	305.685	VER.PTE.NUEVO	

Río Lavayén en Pte. acceso a El Piquete (PT5)

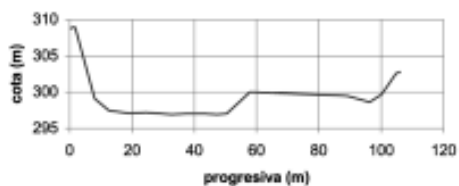
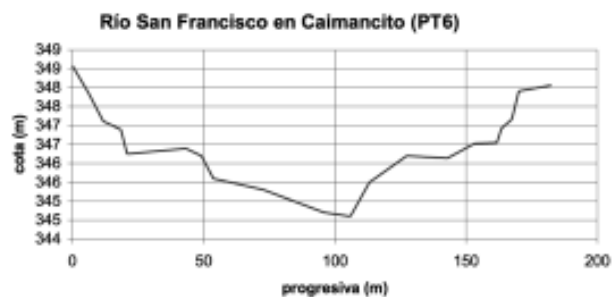


Tabla n° 5

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO SAN FRANCISCO EN CAIMANCITO (PT6).

N	X	Y	Z	OBS.
2	1884.765	2141.404	348.582	MOJ.DER
3	1888.699	2136.577	347.858	TN
4	1892.162	2132.327	347.113	TN
5	1896.483	2127.024	346.896	BCA
6	1897.892	2125.296	346.255	PLAYA
7	1912.075	2107.893	346.390	PLAYA
8	1915.798	2103.324	346.199	P.AG
9	1918.672	2099.802	345.600	FONDO
10	1930.755	2084.974	345.300	FONDO
11	1945.269	2067.163	344.700	FONDO
12	1951.648	2059.336	344.600	FONDO
13	1956.192	2053.759	345.500	FONDO
14	1965.256	2042.636	346.200	PELO AGUA
15	1975.056	2030.610	346.140	RÍO
16	1981.546	2022.646	346.529	RÍO
17	1986.911	2016.062	346.545	RÍO
18	1988.009	2014.715	346.921	RÍO
19	1990.488	2011.673	347.170	P.BCA
20	1992.205	2009.566	347.915	BCA
1	2000.000	2000.000	348.061	MOJ.IZQ.
21	1983.470	1980.401	347.875	ALAMBRE



Generación y transporte de sedimentos

Tabla n° 6

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO BERMEJO EN CARMELO RODRÍGUEZ (PT7).

N	X	Y	Z	OBS.
2	2034.420	2386.408	199.948	MOJ.IZQ
3	2032.684	2366.916	199.391	TN
4	2030.929	2347.213	199.521	TN
5	2028.915	2324.604	198.198	TN
6	2028.590	2320.965	197.469	P.A
7	2025.909	2290.865	196.877	FDO
8	2018.043	2202.558	196.905	FDO
9	2016.022	2179.865	196.730	FDO
10	2010.554	2118.487	196.791	FDO
11	2006.669	2074.871	196.976	FDO
12	2005.031	2056.484	197.302	PA
13	2004.284	2048.092	198.557	TN
14	2002.176	2024.426	198.758	TN
15	2000.671	2007.537	198.948	TN
1	2000.000	2000.000	200.000	START

Río Bermejo en Carmelo Rodríguez (PT7)

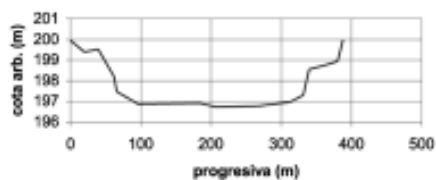


Tabla n° 7

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO BERMEJO EN POZO VERDE (PT8).

N	X	Y	Z	OBS.
1	3000.000	3000.000	100.000	START
2	3000.283	2996.532	100.000	MOJ. DER.
3	2999.876	3001.515	99.940	OR.BCA
4	2999.819	3002.223	98.750	PIE BCA
5	2999.755	3003.000	96.650	P. AGUA
6	2999.534	3005.711	95.250	FDO
7	2998.771	3015.050	95.470	FDO
8	2998.606	3017.083	96.640	P. AGUA
9	2998.542	3017.861	96.900	PLAYA
10	2998.517	3018.170	96.680	P. AGUA
11	2998.299	3020.841	95.630	FDO
12	2998.007	3024.419	95.600	FDO
13	2997.784	3027.150	96.700	P. AGUA
14	2997.630	3029.033	97.260	PLAYA
15	2996.667	3040.834	97.490	MOJ. IZQ.

Río Bermejo en Pozo Verde (PT8)

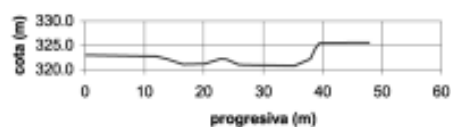


Tabla n° 8

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO BERMEJO EN "CHANCHO FRITO" (PT9).

N	X	Y	Z	OBS.
2	2072.901	2143.575	202.262	M.IZ-BCA
3	2070.261	2138.376	198.024	TN
4	2069.732	2137.335	197.665	TN
5	2069.186	2136.259	196.761	P
6	2065.538	2129.073	196.318	P
7	2064.019	2126.083	194.914	PA
12	2050.689	2099.829	190.910	FDO
13	2024.743	2048.730	192.510	FDO
8	2014.236	2028.037	194.865	PA
9	2010.458	2020.597	195.579	P
10	2005.893	2011.606	197.069	P
11	2002.038	2004.014	199.474	BCA
1	2000.000	2000.000	200.000	START

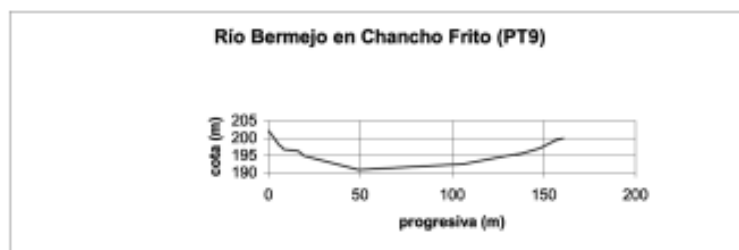


Tabla n° 9

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO BERMEJO EN POZO SARMIENTO" (PT10).

N	X	Y	Z	OBS.	cota IGM
2	1995.393	1999.446	100.000	MOJ.DER	332.03
1	2000.000	2000.000	100.190	START	332.220
3	2000.993	2000.119	100.070	OR.BCA	332.100
4	2009.531	2001.145	76.960	PIE BCA	308.990
5	2015.489	2001.861	75.460	PELO AGUA	307.490
6	2017.961	2002.158	75.460	PA-5.23	307.490
7	2034.214	2004.112	75.460	PA-5.69	307.490
8	2053.009	2006.370	75.460	PA-0.99	307.490
9	2056.126	2006.745	75.460	P.A	307.490
10	2065.658	2007.891	76.030	PLAYA	308.060
11	2074.196	2008.917	76.260	PLAYA	308.290
12	2087.768	2010.548	76.670	PLAYA	308.700
13	2088.821	2010.674	77.390	BCA	309.420
14	2096.168	2011.557	77.720	MOJ.IZQ	309.750

Río Bermejo en Pozo Sarmiento (PT10)

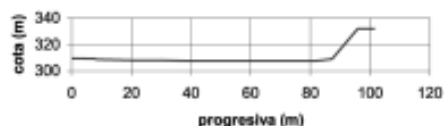


Tabla n° 10

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO BERMEJO EN ZANJA "EL TIGRE" (PT11).

N	prog. m.l.	cota arb.	cota IGM
2	0.00	194.01	303.3
3	4.99	191.61	300.9
4	8.53	190.08	299.37
5	10.83	188.72	298.01
6	33.77	187.27	296.56
7	86.72	186.27	295.56
8	127.09	187.82	297.11
9	180.51	188.15	297.44
10	199.56	187.22	296.51
11	267.81	187.24	296.53
12	270.65	195.03	304.32
13	271.88	195.55	304.84
14	277.37	200.00	309.29
1	279.60	200.00	309.29



Tabla n° 11

PLANILLA DE COORDENADAS: RÍO BERMEJO EN "LA QUENA" (PT12).

n°	prog. m.i.	cota arb.	cota IGM
2	0.000	100.000	291.630
1	12.470	99.230	290.860
3	15.360	99.060	290.690
4	16.160	98.340	289.970
5	24.130	93.830	285.460
6	32.740	92.040	283.670
7	39.690	89.120	280.750
8	73.470	87.960	279.590
9	115.580	86.960	278.590
10	166.620	88.100	279.730
11	185.580	92.030	283.660
12	218.280	93.340	284.970
13	279.680	94.600	286.230
14	284.140	96.700	288.330
15	285.930	97.240	288.870

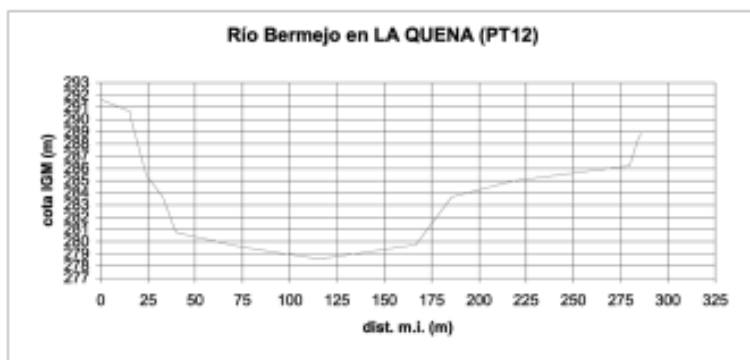


Tabla n° 12

PLANILLA DE COORDENADAS RÍO BERMEJO (PT13).
Aguas arriba de junta San Francisco

N	X	Y	Z	OBS.
1	3000.000	3000.000	100.000	START
2	2998.680	2999.010	99.770	BCA
3	2996.600	2997.450	98.720	P.BCA
4	2963.750	2972.816	99.290	PLAYA
5	2935.677	2951.764	98.800	PELO AGUA
6	2923.141	2942.362	97.600	FDO.
7	2880.003	2910.013	97.790	FDO
8	2876.715	2907.547	98.790	PA
9	2736.301	2802.249	99.370	PLAYA
10	2588.991	2691.779	98.780	PA
11	2566.294	2674.758	96.730	FDO
12	2304.763	2478.633	96.580	FDO
13	2083.049	2312.368	96.350	FDO
14	2079.953	2310.046	98.780	PA
15	2077.577	2308.264	99.600	BCA
16	2065.432	2299.157	99.750	MOJ.DER

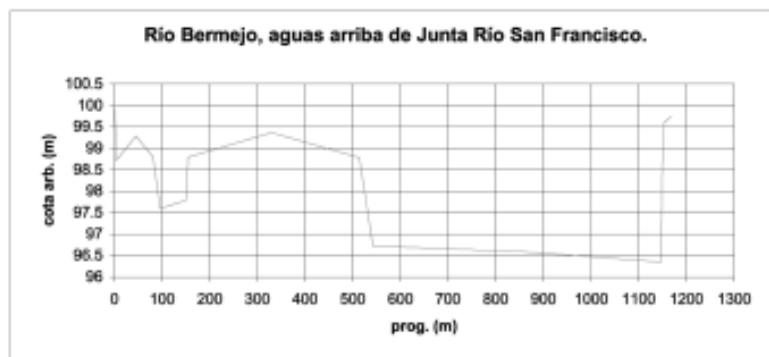


Tabla nº 13

PLANILLA DE COORDENADAS RÍO BERMEJO (PT14).

Aguas abajo de junta San Francisco

N	X	Y	Z arb.	OBS.
1	4000.000	4000.000	100.000	MOJ.IZQ
2	3997.259	3996.281	99.820	O.BCA
3	3996.422	3995.146	98.780	PELO AGUA
4	3994.915	3993.101	97.350	FDO
5	3946.882	3927.930	97.160	FDO
6	3882.075	3840.002	97.410	FDO
7	3880.183	3837.434	98.780	PA
8	3856.213	3804.913	99.560	PLAYA
9	3735.554	3641.204	99.610	PLAYA
10	3548.444	3387.338	99.030	PLAYA
11	3546.047	3384.086	98.680	PA
12	3467.808	3277.933	94.790	FDO
13	3419.092	3211.836	94.670	FDO
14	3365.060	3138.526	95.000	FDO
15	3360.919	3132.908	98.680	PA
16	3358.623	3129.792	99.360	BCA
17	3334.986	3097.722	99.390	MOJ.DER

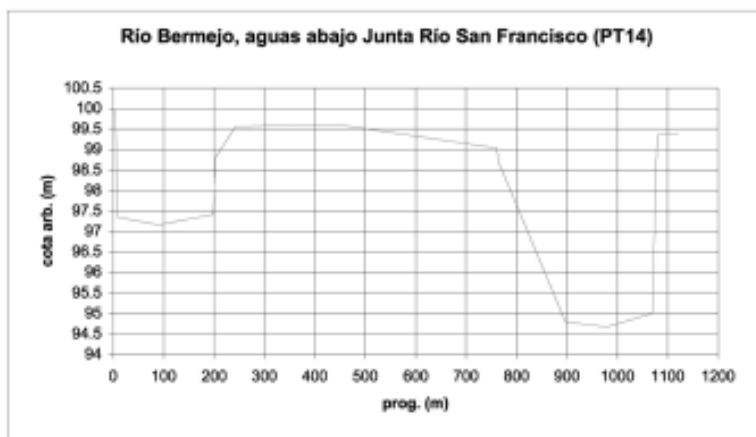


Tabla n° 14

RESUMEN DE COORDENADAS					
PUNTOS FUJOS	LATITUD	LONGITUD	H.Elp.	H. Geod.	Observaciones
Junta S. Francisco. Ag.abajo (M.I)	23° 18' 35" 00467	64° 02' 47" 92066	305.59253	279,402 m	
Junta S. Francisco. Ag.arriba (M.I)	23° 17' 57" 6910	64° 03' 32" 526	305.51237	280,3837 m	Est. Excentrica
LA QUENA (M.I)	23° 14' 51" 2210	64° 06' 13" 6038	317.797	291,63 m	Est. Excentrica
Carmelo Rodríguez (M.D)	23° 00' 22" 8567	64° 20' 05" 894	356.526	330,519 m	Est. Excentrica
POZO VERDE (M.D.)	23° 03' 37" 8182	64° 16' 45" 857	351.485	325,536 m	Est. Excentrica
ZANJA EL TIGRE (M.D.)	23° 11' 31" 4347	64° 11' 07" 6957	335.732	309,29 m	Est. Excentrica
POZO SARMIENTO (M.D.)	23° 08' 18" 4392	64° 12' 35" 0873	358.404	332,03 m	
CAJAMANCITO (M.I)	23° 42' 43" 3249	64° 32' 19" 8842	376.731	347,49 m	Est. Excentrica
EL PIQUETE (M.I)	24° 16' 25" 1846	64° 43' 06" 49181	491.811	464,691 m	Est. Excentrica
BAJADA DE PINTOS	24° 26' 07" 737	64° 50' 43" 5346	546.38	519,186 m	Est. Excentrica

(M.I.) Margen izquierda
(M.D.) Margen derecha

Tabla nº 15

/ Tabla nº 16

Estaciones de aforo sólido en suspensión. «(Alta Cuenca y ríos Seco, Dorado y Del Valle)»			
Lugar	Río	Fecha	
Zanja del Tigre	Bermejo	11/3/1982	
Balapuca	Bermejo	Crecientes 78 / 80	
Arrazayal	Bermejo	17/1/1982	
Alarache	Bermejo	21 y 22/2/82	
Aguas Blancas	Bermejo	18 al 23/3/1982	
Astilleros	Grande de Tarija	11/3/1982	
San Telmo	Grande de Tarija	«3, 4 y 5/1/1981»	
El Angosto - EL Portillo	Iruya	Julio 76 / Julio 82	
El Angosto - El Portillo	Iruya	Febrero 1982	
San José	Iruya	Dic. 80 / Nov. 82	
San José	Iruya	Marzo 1982	
Puesto Romero	Pescado	Dic.77 / Marzo 82	
Cuatro Cedros - Puesto Romero	Pescado	Marzo 1982	
Colonia Colpana	Pescado	Enero 63 / Abril 71	
Puente Carretero	San Francisco	28 al 31/3/1982	
Peña Alta	Valle Grande	21/1/1982	
El Angosto	Mojotoro	15 y 22/12/1979	
Bajada de Pinto	Lavayén	15 al 17/1/1976	
San Juancito	Grande	Enero 1974	
Arrayanal	Candelaria	3/2/1982	
San Antonio	Piedras	1 y 2/4/1983	
Las Bateas	Cañas	Febrero 1983	
El Angosto	Astilleros	Marzo 1983	
San Fernando	Seco	Enero y Febrero 1978	
El Sombrero	Dorado	Enero 1979	
El Ceibal	Del Valle		

DISPONIBILIDAD DE DATOS DE PRECIPITACION MENSUAL DE LAS ESTACIONES ARGENTINAS SELECCIONADAS

N°	DENOMINACION	ALT.	LAT.	LONG.	1950-54	1955-59	1960-64	1965-69	1970-74	1975-79	1980-84	1985-89	1990-94
A818	STA. VICTORIA OESTE	2460	22 15	64 58							XXX	XXXXX	XXXXX
A820	ALARACHE	1090	22 16	64 38					XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
A823	TUCUACA	3650	22 25	65 13							XXX	XXXXX	XXXXX
A724	ASTILLEROS	900	22 22	64 05					XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
A825	HAZARENO	3050	22 30	65 70							XX	XXXXX	XXXXX
A826	EL MOLINO	2620	22 36	65 08							XXX	XXXXX	XXXXX
A827	BALAPUCA	530	22 31	64 26					XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
A728	SAN TRIUNFO	460	22 35	64 14					XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
A830	LAS HIGUERAS	1950	22 44	65 37							XXX	XXXXX	XXXXX
A831	AGUAS BLANCAS	405	22 43	64 22	XXXXX	XX	X	XX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
A832	IBUYA	2730	22 47	65 14							XXX	XXXXX	XXXXX
A833	SAN ANTONIO	1400	22 50	64 58							XXX	XXXXX	XXXXX
A834	CUATRO CERROS	460	22 46	64 28			XX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
A835	EL ANGOSTO	920	22 54	64 32							XXX	XXXXX	XXXXX
A836	SAN JOSE	896	22 55	64 36							XXXXX	XXXXX	XXXXX
A838	POZO SARMIENTO	296	23 06	64 13								XXX	XXXXX

REFERENCIAS:

XXXX años completos o en su defecto que, por la cantidad de registros, se podrían inferir los totales anuales de precipitación

Tabla n° 17

/ Tabla n° 18

DISPONIBILIDAD DE DATOS DE PRECIPITACION MENSUAL DE LAS ESTACIONES BOLIVIANAS SELECCIONADAS

N°	DENOMINACION	ALT.	LAT.	LONG.	1950-54	1955-59	1960-64	1965-69	1970-74	1975-79	1980-84	1985-89	1990-94
B701	CAMASABO	2280	21 30	64 45					XXX	XXXXX	XXXXX	XXX	XXXXX
B702	SELVA QUEBR.	3080	21 33	64 41								XXX	XXXXX
B703	HARVINEZ									X	XXXXX	XXXXX	XXXXX
B704	EL SALADO									XXXX	XXXXX	XXXXX	XXX
B705	ENTRERIOS	1300	21 31	64 10					XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
B706	TARUA	1957	21 32	64 42	XXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
B707	SAN ANDRES	1950	21 37	64 49				XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
B708	SAN JACINTO	1900	21 38	64 42			X	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
B709	LADERA CTRO.										XXXXX	XXXXX	XXXXX
B710	CALAMUCHITA	1980	21 41	64 37						XXXXX	XXXXX	XXXXX	- XXXX
B711	ITANI	985	21 41	63 52					X	XXXXX	XXXXX		X...X
B712	CALDERILLAS	2950	21 45	64 57				...X	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
B713	PIROS SUR	2100	21 45	64 53				XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	- XXXX
B714	CHOCLOCA	1800	21 46	64 44					XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
B715	BALINAS	1800	21 46	64 14					XXXXX	XXXXX	XXXXX	X...X	XXXXX
B716	JUNTAS	1680	21 46	64 47						XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
B717	CANCHASAYU	2130	21 53	64 53					XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
B818	PACAYTA	2200	21 53	64 42				XX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	- XXXX
B821	RIO CONCHAS									XX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
B822	GUANDACAY	850	22 21	64 28					XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX

REFERENCIAS:

XXXXX años completos o en su defecto que, por la cantidad de registros, se podrían inferir los totales anuales de precipitación

Tabla n° 25

IMÁGENES SATELITALES - SECCIONES ANCHO VALLE Y RÍO

Río	Sección	B líquido (m) aproximado	B valle (m)	OBSERVACIONES
Gande	1 (San Juancito)	30	100	
	2	35	100	
	3	35	100	encauzado
	4	35	100	
	5	35	256	
	6	50	218	
	7 (San Pedro)	50	180	anastomosado
	8	150	370	anastomosado
	9	200	520	anastomosado
	10	180	350	anastomosado
	11		240	dos canales
	12		190	dos canales
San Francisco	13		170	ingreso río Lavayén
	14		155	
	15		149	
	16		133	
	17		140	
	18		145	
	19		158	ingreso río Negro
	20		130	
	21		121	
	22		132	
	23		124	
	24		165	
	25		136	ingreso río Ledesma
	26		146	
	27		171	
	28		155	
	29		171	ingreso río San Lorenzo
	30		196	
	31		170	
	32		175	
	33		230	
	34 (Caimancito)	96	228	
	35	114	217	
	36	150	496	
	37	104	414	
	38	89	144	
	39	115	244	
	40	95	348	
	41	83	316	
	42	147	200	
	43	124	478	
	44	90	703	
	45	80	431	

Tabla n° 25 / continuación

IMÁGENES SATELITALES - SECCIONES ANCHO VALLE Y RIO

Río	Sección	B líquido (m) aproximado	B valle (m)	OBSERVACIONES
	46	160	1112	anastomosado
	47	135	742	anastomosado
	48	131	577	anastomosado
	49	117	456	anastomosado
	50	135	603	anastomosado
	51	140	707	anastomosado
	52 (Pichanal)	106	280	anastomosado
	53	130	830	anastomosado
	54	123	312	anastomosado
	55 (Desemb. río Bermejo)	317	528	anastomosado
Lavayén	1 (Bajada de Pinto)		60	
	2		76	
	3		102	
	4		39	
	5		85	
	6		75	
	7		82	encauzado
	8		79	
	9		72	
	10		130	
	11 (El Piquete)		120	
	12		140	
	13		94	
	14		157	

Tabla n° 26a

RÍO BERMEJO SUPERIOR TRAMO I

Sección	Progresiva	Ancho cauce	Ancho valle	Pendiente
No	(Km)	(m)	(m)	(-)
1	4	45	65	0.0037
2	8	40	50	0.0036
3	12	135	290	0.0035
4	16	70	345	0.0034
5	20	115	150	0.0033
6	24	65	205	0.0032
7	28	115	200	0.0031
8	32	75	125	0.0030
9	36	75	100	0.0029
10	40	60	65	0.0028
11	44	135	190	0.0027
12	48	75	150	0.0026
13	52	45	300	0.0038
14	56	50	100	0.0027
15	60	200	290	0.0012

Sección	Progresiva	Ancho cauce	Ancho valle	Pendiente
No	(Km)	(m)	(m)	(-)
16	64	125	345	0.0048
17	68	120	370	0.0043
18	72	150	250	0.0043
19	76	110	400	0.0035
20	80	170	270	0.0027
21	84	180	240	0.0019

Tabla n° 26b		RÍO BERMEJO SUPERIOR TRAMO II		
Sección	Progresiva	Ancho cauce	Ancho valle	Pendiente
No	(Km)	(m)	(m)	(-)
22	88	235	640	0.0019
23	92	155	350	0.0011
24	96	180	420	0.0002
25	100	300	370	0.0004
26	104	220	415	0.0005
27	108	230	630	0.0007
28	112	135	500	0.0004
29	116	245	560	0.0004
30	120	125	250	0.0003
31	124	180	410	0.0003
32	128	150	250	0.0003
33	132	140	230	0.0003
34	136	130	160	0.0004
35	140	170	210	0.0004
36	144	120	180	0.0005
37	148	205	370	0.0005
38	152	200	260	0.0006
39	156	175	210	0.0007
40	160	315	390	0.0010
41	164	145	270	0.0010
42	168	215	450	0.0004
43	172	190	600	0.0003
44	176	240	860	0.0002
45	180	280	500	0.0002
46	184	275	1040	0.0002
47	188	345	1880	0.0002
48	192	400	2450	0.0002
49	196	500	1290	0.0002
50	200	430	1820	0.0002
51	204	265	1420	0.0002
52	208	235	1630	0.0002
53	212	265	1250	0.0002

Tabla n° 27		RÍO GRANDE DE TARIJA		
Sección	Progresiva	Ancho cauce	Ancho valle	Pendiente
No	(Km)	(m)	(m)	(-)
1	4	190	215	0.0017
2	8	115	205	0.0018
3	12	150	175	0.0015
4	16	155	320	0.0013
5	20	90	120	0.0013
6	24	105	270	0.0014
7	28	175	630	0.0014
8	32	115	260	0.0013
9	36	120	225	0.0013
10	40	185	460	0.0012
11	44	95	125	0.0011
12	48	115	160	0.0011
13	52	100	275	0.0011
14	56	160	365	0.0011
15	60	145	510	0.0012
16	64	130	640	0.0012
17	68	160	625	0.0013
18	72	135	425	0.0013
19	76	115	275	0.0013
20	80	150	350	0.0013
21	84	260	530	0.0013
22	88	135	460	0.0012
23	94	230	370	0.0012

Tabla n° 28		AFLUENTES PRINCIPALES		
Sección	Nombre	Progresiva	Ancho cauce	Pendiente
No		(Km)	(m)	(-)
10	San Telmo	40	120	0.0012
25	Iruya y Pescado	100	60	0.0110
28	Blanco	110	60	0.0080
42	S. María y Colorado	165	110	0.0009
46	San Francisco	185	125	0.0009

Generación y transporte de sedimentos

CAPÍTULO C
Influencia de la variación de la carga sedimentaria del río Bermejo en el sistema Paraguay, Paraná, Río de la Plata

CAPÍTULO C

C) INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA CARGA SEDIMENTARIA DEL RÍO BERMEJO EN EL SISTEMA PARAGUAY - PARANÁ - DE LA PLATA.

c.1) Recopilación de antecedentes.

i. Datos de niveles y caudales líquidos, y caudales sólidos, en todas las estaciones de la red de mediciones de EVARSA.

La red de mediciones de caudales líquidos en los ríos Paraguay y Paraná, tiene las siguientes estaciones operativas, de acuerdo al anuario de EVARSA de 1994 (caudales medios mensuales):

RÍO	ESTACIÓN	PERÍODO DE REGISTRO
Paraguay	Puerto Pilcomayo	1980 / 1994
Paraguay	Puerto Bermejo	1910 / 1994
Paraná	Posadas	1901 / 1994
Paraná	Itatí	1911 / 1994
Paraná	Timbúes	1905 / 1994
Paraná	Corrientes	1904 / 1994
Paraná	Chapetón	1975 / 1994
Paraná	Túnel	1904 / 1994

Para los fines perseguidos en el estudio, y en virtud del volumen de información a analizar, se solicitaron a EVARSA los datos de caudales líquidos medios diarios y caudales sólidos para un número de estaciones que permitan definir el comportamiento del sistema, entre ellas una sobre el río Paraguay (Puerto Bermejo), una sobre el río Paraná aguas arriba de la confluencia con el Paraguay (Itatí), y una sobre el Paraná aguas abajo de la confluencia (Túnel Subfluvial). Sobre este tema se volverá con más detalle en puntos siguientes.

ii- Granulometrías de material de lecho y en suspensión en el sistema Paraguay -Paraná - de la Plata.

Se recopilieron curvas granulométricas de material del lecho del río Paraná, en correspondencia con los siguientes pasos de navegación:

Paso	Km	Figura N°
Santa Elena	728	1
Km 786-787	786-787	2
Garibaldi	794	3
Cartagena	850	4
El Selzo	888	5
Malabrigo	915	6
Las Cañas	940	7
Paso de la Patria	1242	8
Travesía Toledo	1250	9
Itatí	1280	10
Las dos hermanas	1356	11
Embocadura S. Isabel	1362	12
Entre Ríos	1365	13
Entre Ríos	1369	14
San Pablo	1404	15
Pta. Naro	1443	16
Abajo Yacyretá	1460	17
Loro IV	1463	18
Desemb. Bermejo	1320	19
V. del Pilar	1330	20
San Antonio	1605	21

iii. Datos batimétricos de los principales cursos del sistema.

Se recopilaron datos batimétricos del río, de trabajos recientes desarrollados en la zona. Estos últimos se mencionan en las Referencias generales.

iv. Estudios de trabajos afines realizados en los ríos del sistema, que permitan el desarrollo de los objetivos a cumplir.

Los trabajos afines realizados se encuentran enunciados en las Referencias generales.

v. Imágenes satelitales, y fotos aéreas de la zona, en especial las correspondientes al delta del Río Paraná.

Se trabajó con imágenes y fotos aéreas que permitieron determinar los conceptos volcados en el punto c.2).

vi. Antecedentes sobre composición mineralógica de sedimentos en suspensión en los ríos Bermejo, Paraguay, Paraná y Río de la Plata.

Resulta de interés estudiar la composición mineralógica de la fracción arcilla de los sedimentos suspendidos en una corriente fluvial, ya que proporciona información sobre el origen de las mismas. Los estudios antecedentes sobre el tema se han volcado en las Referencias generales.

c.2) Análisis global del transporte de sedimentos en el sistema Bermejo - Paraguay - Paraná - de la Plata, en situación actual.

En el desarrollo de esta actividad se analizó globalmente el transporte de sedimentos y su evolución a lo largo de todo el sistema Bermejo - Paraguay - Paraná - Río de la Plata, teniendo como base la información básica hidrosedimentológica en todas las estaciones disponibles de la red, así como los resultados de los estudios de la evolución morfológica del río Bermejo en toda su extensión.

A partir de este análisis, se determinó la incidencia del río Bermejo, desde el punto de vista sedimentológico, en el comportamiento fluviomorfológico de los ríos Paraná (incluyendo el Delta) y de la Plata.

Los escenarios de aplicación de los análisis descriptivos coinciden con los empleados para los estudios de la evolución morfológica del río Bermejo, y son:

- situación natural actual.
- situación con los aprovechamientos de Arrazayal y Las Pavas, sobre el río Bermejo, y Cambarí, sobre el río Tarija, cuyo proyecto está siendo llevado adelante por la Comisión

Binacional para el Aprovechamiento de los Recursos de la Alta Cuenca del Río Bermejo y del Río Grande de Tarija. - situaciones resultantes del análisis de propuestas de manejo de cuencas que surjan del análisis de las unidades de paisaje y mapas de producción de sedimentos o de otras acciones de gran escala que se identifiquen en la Alta Cuenca.

Tal como se explica en las referencias respectivas (Brea, J.D., 1999; Peviani, M., 1999; Brea, J.D., Spalletti, P.D., Spalletti, L., Rafaelli, S., 1999), los escenarios sufrieron algunas modificaciones debidas, en algunos casos, a la poca influencia que la retención de sedimentos generada por las presas presenta para la conformación morfológica del río aguas abajo, y en otros, a la falta de identificación de políticas factibles de manejo de cuencas que afecten significativamente la carga sólida de los ríos de la cuenca del Bermejo. Esto motivó que los escenarios de análisis efectivamente utilizados consideren directamente disminuciones porcentuales en las cargas sólidas aportadas, para cada caso de interés, de modo de conocer cuál es la respuesta del sistema a tal solicitud, independientemente de la potencial causa que pueda generarla.

1. Análisis general.

Estudios antecedentes (Brea, J.D.; Busquets, M.S.; Spalletti, P.D.; 1996) consignan que el aporte de los sólidos suspendidos del río Bermejo a ese tipo de carga sólida en el río Paraná (a la altura de Corrientes) constituye el 70 % del total, si se considera toda la serie de registros disponibles, aumentando este porcentaje si se analizan los últimos años.

En la citada referencia se realizan análisis que resultan de interés para el presente informe, desde el punto de vista del conocimiento del comportamiento general del sistema. Es así que, siempre a partir de los registros disponibles, aproximadamente el 80 % de la carga en suspensión aportada al Bermejo inferior en la Junta de San Francisco proviene de la subcuenca Bermejo Superior, y el 20 % restante de la subcuenca San Francisco. En efecto, considerando la serie de aforos sólidos en Pozo Sarmiento - Zanja del Tigre (Bermejo) y en Caimancito (San Francisco), se obtiene para la primera un transporte en suspensión medio de 70508100 toneladas al año (79 %), y para la segunda uno de 18901200 toneladas al año (21 %), lo que da un total de 89409300 toneladas al año.

Desde que se computa la fracción fina y gruesa de los sedimentos suspendidos (1993), se observa en la estación Pozo Sarmiento una altísima variación de las proporciones de ambas fracciones. Para aguas altas (sobre 72 datos), se tiene en promedio un 77 % de finos y un 23 % de gruesos, mientras que para aguas bajas (22 datos), los por-

centajes son del 73 % y 27 %, respectivamente (Figura N° 118 - capítulo b). Pese a la dispersión, a partir de dichos promedios se observa un aumento del porcentaje de la fracción gruesa con respecto a la fina en aguas bajas, lo que indica la asociación directa entre la carga de lavado y la alta pluviosidad en la cuenca.

En la cuenca inferior del río Bermejo, la única estación de aforos operativa es la ubicada en El Colorado (Brea, J.D., Busquets, M.S.; 1999 (2)). Allí la proporción de arena en suspensión varía entre un 10 y un 20 %, en promedio, de la carga total suspendida. La fracción fina está fundamentalmente compuesta por limos.

En correspondencia con la desembocadura del río Bermejo en el río Paraguay, se verifica en este último la existencia de un banco de arena (Halcrow & Partners, 1973). Si bien la concentración de arenas en suspensión en el Bermejo es muy reducida si se la compara con la de limos, no obstante constituye la mayor concentración de arena encontrada en cualquier estación del río Paraguay hacia aguas arriba.

La concentración de los sedimentos suspendidos del río Paraná sufre un notorio incremento aguas abajo de la confluencia con el Paraguay. Como este río no tiene un transporte en suspensión significativo antes de recibir al Bermejo, se verifica que es este último el causante de dicho incremento (Orfeo, O.; 1995).

En la citada referencia se consigna que, aguas arriba de la confluencia con el Paraguay, los sólidos suspendidos del Paraná son muy homogéneos y están compuestos por altos porcentajes de arcillas (82 %) y menor proporción de limos (18 %). Aguas abajo de la confluencia, en margen izquierda se mantienen las mismas proporciones, mientras que en margen derecha se observa un importante incremento de los limos (63 %), disminuyendo las arcillas (32 %), con un 5 % de arenas.

La relación porcentual de tamaños que presentan los sólidos suspendidos del Bermejo puede ser adecuadamente reconocida en el Paraná, permitiendo identificar su incidencia sobre este último, hasta la localidad de Empedrado (Corrientes), como puede apreciarse en el siguiente cuadro, extraído de la citada referencia:

Lugar	% arenas	% limos	% arcillas
Itatí	0	15	85
Paso de la Patria (1)	0	22	78
Paso de la Patria (2)	5	63	32
Corrientes	4	66	30
Empedrado	3	67	30

(1) Aguas arriba de la confluencia Paraguay - Paraná. (2) Aguas abajo de la confluencia Paraguay - Paraná.

Desde la desembocadura del Paraguay en el Paraná, hacia aguas abajo por este último, se verifican diferencias de concentración entre ambas márgenes, que se van atenuando hacia aguas abajo por efecto de mezcla progresiva.

Lo hasta aquí expresado viene poniendo de manifiesto lo establecido en diferentes referencias (Amsler, M.; Drago, E.; Bertoli de Pomar, H.; 1984; Orfeo, O.; 1995; Drago, E.; Amsler, M.; 1988; Brea, J.D.; Busquets, M.S.; Spalletti, P.D.; 1996), acerca de que la dinámica de los sedimentos suspendidos del Paraná a partir de la confluencia con el Paraguay está directamente relacionada con el ciclo hidrológico del Bermejo.

Hacia aguas abajo por el Paraná, también se ha comprobado la similitud entre las características granulométricas de la carga de lavado de este río (a la altura de la ciudad de Paraná), y la del Bermejo aguas arriba de la Junta de San Francisco (Amsler, M.; Drago, E.; Bertoli de Pomar, H.; 1984). De acuerdo a dicho estudio, en función del régimen del Bermejo (las máximas concentraciones coinciden con los máximos caudales), es esperable que en el río Paraná las concentraciones más grandes de carga de lavado ocurran normalmente un cierto tiempo después de marzo o abril, lo que fue verificado a partir de mediciones.

Los diferentes tipos de material en suspensión que se incorporan al cauce principal del Paraná en su tramo medio, son mezclados por el río de una manera tal que conforman un sedimento suspendido polimodal, pobremente seleccionado, excepto cuando se transportan los picos de concentración aportados por el Bermejo.

Los sedimentos finos transportados en suspensión por el Paraná, salvo situaciones particulares, sólo encuentran condiciones favorables de deposición al llegar al Río de la Plata y sus canales de navegación (Brea, J.D.; Busquets, M.S.; Spalletti, P.D.; 1996).

En cuanto al transporte de arenas en el Paraná, tanto en suspensión como por arrastre de fondo, puede computarse a partir de fórmulas de transporte a capacidad saturada. Las predicciones dadas por la expresión de Engelund - Hansen (Vanoni, V.; 1975) son sumamente confiables para este río, y su aplicación para condiciones medias del río arroja un valor de transporte total de arenas de 25 millones de toneladas anuales.

Muestras del lecho extraídas de los pasos de navegación del río Paraná demuestran una existencia preponderante de arenas.

En el punto c.1) ii., se presentaron las curvas granulométricas de material del lecho del río Paraná recopiladas, en correspondencia con pasos de navegación. En el cuadro siguiente se consigna el diámetro medio representativo del material (d₅₀) en cada uno de ellos.

Paso	Km	d ₅₀ (µm)
Santa Elena	728	420
Km 786-787	786-787	406
Garibaldi	794	329
Cartagena	850	268
El Selzo	888	353
Malabrigo	915	329
Las Cañas	940	378
Paso de la Patria	1242	384
Travesía Toledo	1250	329
Itatí	1280	329
Las dos hermanas	1356	342
Embocadura S. Isabel	1362	253
Entre Ríos	1369	334
San Pablo	1404	382
Pta. Naro	1443	493
Abajo Yacyretá	1460	1866
Loro IV	1463	275
Desemb. Bermejo	1320	77
V. del Pilar	1330	242
San Antonio	1605	275

Se observa que los d₅₀ corresponden a arenas en todos los casos. Hacia aguas abajo del último paso presentado en el cuadro precedente, en el Paraná Inferior, sigue existiendo preponderancia de arenas, con un d₅₀ medio de aproximadamente 250 μm .

Recién en los canales de navegación del Río de la Plata se encuentran altas proporciones de limos en las muestras del lecho, que demuestran que recién en estas zonas las condiciones de velocidad de la corriente son tales que permiten la deposición de los sólidos suspendidos. Los diámetros medios de las muestras de lecho extraídas del canal Mitre (19 μm), canal de acceso (10 μm) y canal Punta Indio (10 μm) confirman lo expresado.

En resumen, puede decirse que el seguimiento de los sedimentos producidos en la alta cuenca del río Bermejo, a través primero de su cuenca inferior, pasando luego por el Paraguay y el Paraná, para llegar al Río de la Plata, efectuado principalmente en base a características granulométricas, permite confirmar el hecho que los sedimentos volcados por el río Bermejo al sistema son en gran medida los que se depositan en la zona del delta del Paraná y los canales del Río de la Plata.

Un análisis complementario del anterior resulta de estudiar la composición mineralógica de la fracción arcilla de los sedimentos suspendidos en una corriente fluvial, que proporciona información sobre el origen de las mismas (Brea, J.D.; Busquets, M.S.; Spalletti, P.D.; 1996). En esta referencia se realiza el análisis que se presenta a continuación.

El sedimento suspendido del Bermejo, muestreado a la altura de la Ruta 11 (Puerto Velaz), presenta una composición mineralógica de la fracción arcilla con marcado dominio de illita (60 %), con presencia de esmectitas (25 %) y caolinita (15 %).

Por su parte, las arcillas suspendidas del Alto Paraná, aguas abajo de la confluencia con el Paraguay, presentan abundante cantidad de illita y montmorillonita, con menores proporciones de caolinita y clorita. Como se ha dicho, la montmorillonita y caolinita provienen de la región tropical (escudo brasileño), mientras que la illita y la clorita son suministrados por el río Bermejo. El predominio de illita (60 %) constituye una característica distintiva, ya que dicho componente, ausente en los sedimentos suspendidos aguas arriba de la confluencia Paraná - Paraguay, tiene sus orígenes en la erosión de terrenos áridos y semiáridos típicos de regiones andinas, lo que indica su procedencia. Las características expuestas se mantienen por el río Paraná, hacia aguas abajo. A la altura de la ciudad de Paraná, se encuentran los mismos componentes en las arcillas en suspensión: illita, caolinita, montmorillonita y clorita, observándose el mismo porcentaje de illita (60 %), correspondiendo el resto a las

otras componentes.

Al llegar al Río de la Plata, las muestras de sedimentos suspendidos y de fondos oceánicos adyacentes, muestran también predominio de illita (44 %), seguida por la montmorillonita (30 %), quedando el resto conformado por caolinita y clorita, según lo especifican las referencias. En muestras de lecho del Río de la Plata exterior se encuentran partes iguales de illita, caolinita y montmorillonita, por influencia de corrientes oceánicas.

En base al análisis efectuado, y si se tiene en cuenta que del total de illita aportada al Río de la Plata el 95 % proviene del río Paraná y el 5 % restante del río Uruguay, y que, el 100 % de la clorita que llega al Río de la Plata proviene también del Paraná (Depetris, P.J.; 1968), se puede concluir que la mayor parte de estos materiales son aportados por el río Bermejo.

En consecuencia, el análisis de la composición mineralógica de las arcillas transportadas en suspensión por el río Bermejo arroja una conclusión coincidente con la surgida de estudiar las granulometrías y concentraciones.

2. Balance a partir de las estaciones de aforo en el sistema Bermejo - Paraguay - Paraná.

En este punto, a partir de la información básica hidrosedimentológica en todas las estaciones disponibles de la red, se buscó caracterizar globalmente el transporte de sedimentos y su evolución a lo largo de todo el sistema, complementando el análisis del punto anterior.

Tal como se expresara anteriormente, se recopilaron datos de aforos líquidos y sólidos para un número de estaciones sobre los ríos Paraguay y Paraná que permitiera definir el comportamiento del sistema. Estos datos fueron provistos por EVARSA. En el cuadro siguiente se resumen los datos recopilados: (ver cuadro en la página siguiente)

La ubicación de las estaciones en el sistema se presenta en el mapa de la Figura N° 22. Puede observarse que sólo en cuatro de las siete estaciones se tienen aforos líquidos y sólidos. No obstante, estas estaciones se encuentran ubicadas de modo tal que permiten realizar el análisis buscado. En efecto, Puerto Pilcomayo se encuentra sobre el río Paraguay, aguas arriba de la confluencia con el río Bermejo; Ita-Cuá e Itatí sobre el río Paraná, aguas arriba de la confluencia con el Paraguay; y Túnel sobre el río Paraná, aguas abajo de dicha confluencia, en las cercanías del Túnel Subfluvial Uranga - Begnis, frente a la ciudad de Paraná.

Con estas estaciones, más Pozo Sarmiento, sobre el Bermejo Superior; Caimancito, sobre el San Francisco; y El Colorado, sobre el Bermejo Inferior; se realizó el balance de sólidos transportados en suspensión.

Estación	Río	Período Ql	Nº de Ql	Período Qs	Nº Qs
Puerto Pilcomayo	Paraguay	11/8/83-10/9/98	124	30/9/93-10/9/98	46
Ita-Cuá	Paraná	14/2/85-22/10/98	122	15/9/93-22/10/98	52
Itatí	Paraná	24/7/82-23/6/98	183	24/11/93-23/6/98	40
Corrientes	Paraná	20/1/81-26/10/98	250	—	—
Timbúes	Paraná	14/5/80-11/9/98	241	—	—
Chapetón	Paraná	30/9/93-11/9/98	11	—	—
Túnel (Paraná)	Paraná	4/3/83-9/11/98	148	27/9/93-9/11/98	52

donde Ql es el aforo de caudal líquido y Qs el aforo de caudal sólido en suspensión.

En la Figuras N° 23 a 29 se presentan las relaciones entre el nivel y el caudal líquido para las estaciones Puerto Pilcomayo, Ita-Cuá, Itatí, Corrientes, Timbúes, Chapetón y Túnel, respectivamente. Se observa en todas ellas una buena correspondencia entre alturas y caudales. En el caso de Ita-Cuá (Figura N° 24), el gráfico muestra a los puntos agrupados según dos tendencias, lo que estaría indicando un posible corrimiento de la escala durante el período de registro.

Del mismo modo, en las Figuras N° 30 a 33 se presentan las relaciones entre los caudales líquidos y sólidos para las estaciones Puerto Pilcomayo, Ita-Cuá, Itatí y Túnel, respectivamente. En cada caso se establecieron expresiones que vinculan los caudales sólidos y líquidos, sobre las que se volverá más adelante. De la observación de estos gráficos ya pueden apreciarse las magnitudes de los transportes sólidos y su influencia en el sistema.

En efecto, los aforos sólidos del río Paraguay en Puerto Pilcomayo, aguas arriba de la confluencia con el Bermejo, dan un valor máximo del orden de los 600 kg/s, siendo el promedio de los registros de 251 kg/s (Figura N° 30).

El río Paraná, antes de la confluencia con el Paraguay, presenta en Ita-Cuá valores máximos del orden de 1100 kg/s, con un promedio de los registros igual a 269 kg/s (Figura N° 31). En Itatí, donde la dispersión de los datos es mucho mayor que el caso anterior, se han medido caudales sólidos máximos del orden de los 3000 kg/s (Figura N° 32), con un valor promedio de los registros de 506 kg/s. Entre ambas estaciones se encuentra emplazada la presa de Yacretá.

En la estación de aforos Túnel Subfluvial, ya el río Paraná acusa el ingreso del río Bermejo en el sistema: el valor máximo aforado llega a los 8000 kg/s, con un valor promedio de los registros de 3150 kg/s.

A partir de estos valores queda reflejada la importancia de los aportes del Bermejo al sistema. Si bien no resultan suficientemente exactos los análisis cuantitativos directos a partir de los datos aquí presentados, la coincidencia de los períodos de registro de los aforos sólidos recopilados para estas cuatro estaciones, permite sí la determinación de un número expeditivo. En estas condiciones, considerando los valores medios de los registros, y a Itatí para representar al río Paraná aguas arriba de la confluencia con el Paraguay, se obtienen las siguientes proporciones de los aportes sólidos al río Paraná aguas abajo:

Río	% de aporte
Bermejo	81
Paraguay (antes del Bermejo)	6
Paraná (antes del Paraguay)	13

Estos valores están en el mismo orden de magnitud que los obtenidos a partir de analizar toda la serie de registros disponibles, pero acusan una mayor influencia del aporte del Bermejo (81 % frente al 70 % que surge de la referencia), lo que además daría una tendencia coincidente a la que indica que en los últimos años, con la construcción de las últimas presas sobre los ríos Iguazú y Paraná Superior, ha disminuido el aporte sólido de este último (13 % frente al 24 % que surge de la referencia) (Brea, J.D.; Busquets, M.S.; Spalletti, P.D.; 1996; Anderson, R.; da Franca Ribeiro, N.; Diaz, H.; 1993). Recientes mediciones de concentración y turbidez disponibles en el río Paraná, conducen a conclusiones en el mismo sentido.

Más allá de la distribución porcentual de los aportes provenientes de los distintos ríos, interesa conocer cómo resulta el balance del material transportado en suspensión a través del sistema, a partir de las mediciones existentes. A tal fin, se trabajó a partir de los caudales sólidos mensuales en las estaciones de la red.

De los ríos del sistema, el último anuario sedimentológico publicado por Agua y Energía (Agua y Energía Eléctrica, 1991) sólo contiene datos de la alta cuenca del río Bermejo y de la del San Francisco. Como ya se expresara, las estaciones de interés utilizadas para el presente análisis fueron Zanja del Tigre - Pozo Sarmiento sobre el Bermejo (con datos de caudales sólidos en suspensión mensuales para el período 1945-89), y Caimancito sobre el San Francisco (1948-89).

De las estaciones sobre los ríos Bermejo Inferior, Paraguay y Paraná, pudo obtenerse la información de los caudales medios mensuales, a partir del último anuario hidrológico (EVARSA, 1994), de acuerdo al siguiente detalle (ver cuadro en pie de página):

Como puede apreciarse en el cuadro precedente, no existe homogeneidad en los períodos de registro, lo que es de fundamental importancia a la hora de efectuar un balance. Por lo tanto se buscó en primer término un período en el que se tuvieran los registros de caudales mensuales sólidos y líquidos al menos en las principales estaciones del sistema. Fue así que se trabajó con el período 1969-1989 (veinte años), el que es cubierto por todas menos por Puerto Pilcomayo, justificando este hecho en virtud de la poca influencia del aporte sólido del río Paraguay aguas arriba de la afluencia del río Bermejo, demostrada precedentemente.

Para el Bermejo Superior y el San Francisco se consideraron los valores de caudal sólido mensual dados por el anuario sedimentológico (Agua y Energía Eléctrica, 1991). Para el resto de las estaciones se trabajó con los caudales medios mensuales, determi-

nando los caudales sólidos correspondientes a partir de las relaciones obtenidas a partir de los aforos. El resultado de este análisis se resume en el cuadro siguiente, donde QsT es el caudal sólido en suspensión expresado en miles de toneladas anuales (ver último cuadro en pie de página):

A partir de estos valores pueden hacerse interesantes observaciones, siempre teniendo en cuenta que las características de las variables analizadas (en especial, la alta dispersión de los aforos sólidos), y la metodología empleada (determinación de relaciones entre caudales líquidos y sólidos aforados y su aplicación con caudales medios mensuales) hacen que los resultados obtenidos no puedan considerarse numéricamente exactos, aunque sí absolutamente válidos para el cumplimiento de los objetivos del estudio.

En primer lugar se observa que la suma del aporte del Bermejo Superior y del San Francisco (112358000 t/año) resulta casi coincidente con el correspondiente al Bermejo Inferior en El Colorado (106913000 t/año). Esta igualdad resulta de suma importancia pues permite confirmar los resultados obtenidos en el análisis de la dinámica fluviomorfológica del río Bermejo Inferior (Brea, J.D.; 1999).

En el informe de referencia se expresa que, desde el punto de vista morfológico, el sistema Bermejo Superior - Bermejo Inferior parece encontrarse en equilibrio. A partir del análisis de resultados de las corridas del modelo matemático utilizado, se concluye que parte del material ingresado en la Junta de San Francisco es depositado en el Bermejo Inferior, y es compensado con la erosión del lecho y márgenes del río en épocas de

Río	Estación	Período disponible
Bermejo Superior	Z. del Tigre - P. Sarmiento	1940-94
San Francisco	Caimancito	1946-94
Bermejo Inferior	El Colorado	1968-94
Paraguay Puerto	Pilcomayo	1980-94
Paraná	Itá - Cuá	1901-94 (1)
Paraná	Itatí	1910-94
Paraná	Túnel	1904-94

(1) registro en Posadas, estación más cercana

Río	Estación	QsT 1000 t/año
Bermejo Superior	Z. del Tigre - P. Sarmiento	87199
San Francisco	Caimancito	25159
Bermejo Inferior	El Colorado	106913
Paraguay	Puerto Pilcomayo	8125
Paraná	Itatí	8005
Paraná	Túnel	99477

crecida, lo que da una equivalencia entre el material que entra y sale del sistema.

Lo expresado concuerda con el resultado del balance aquí efectuado, confirmando, por otro camino, las conclusiones del informe de referencia.

Volviendo al cuadro anterior, si se analiza el nudo Paraguay - Paraná, se obtiene que el aporte del primero es de 115038000 t/año (resultante de la suma de las estaciones El Colorado y Puerto Pilcomayo), mientras que el del segundo resulta de 8005000 t/año. Esto indica que del total aportado (123043000 t/año), los porcentajes correspondientes discriminados resultan:

Río	% de aporte
Bermejo	87
Paraguay (antes del Bermejo)	7
Paraná (antes del Paraguay)	6

Si se compara este cuadro con el similar presentado anteriormente, confeccionado en base a los aforos sólidos, se observa un incremento de la incidencia del aporte del Bermejo en relación al total, a expensas del aporte del río Paraná Superior, lo que también en este caso coincide con lo indicado en las referencias citadas (Brea, J.D.; Busquets, M.S.; Spalletti, P.D.; 1996; Anderson, R.; da Franca Ribeiro, N.; Diaz, H.; 1993).

Si se compara el total calculado aportado por el Paraná Superior y el Paraguay (123043000 t/año), con el resultado en la estación del Túnel Subfluvial (99477000 t/año), la diferencia resulta del orden del 20 %. En esta estación existen algunas dudas sobre los registros recopilados, en relación con saber si realmente representan el total del caudal pasante en la sección en épocas de crecida (parte del caudal se estima que pasa por el Colastiné). Esto puede explicar la diferencia señalada, que de todos modos se ubica dentro de los márgenes de error esperables al tratar con aforos sólidos.

Otra observación de interés a partir del análisis efectuado es la influencia que tiene el período de registros analizado en las cantidades de sedimentos aportados. En efecto, como ya se expresara, a partir de la utilización de todos los registros de la serie de cada estación (Agua y Energía Eléctrica, 1991), el aporte del Bermejo resulta de alrededor de 90000000 t/año; mientras que para el análisis efectuado en el período 1969-89, el aporte del mismo río fue de alrededor de 123000000 t/año. Se considera que entre estos órdenes de magnitud se encuentra el aporte anual del río Bermejo al sistema Paraguay - Paraná - Río de la Plata.

3. Delta del río Paraná y Río de la Plata..

Hasta aquí se ha analizado el comportamiento del sistema hasta prácticamente la desembocadura del río Paraná en la zona del delta. Como se ha señalado, el transporte de sedimentos del río Paraná se compone en general de arenas y de limos, con menor proporción de arcillas.

Como también se expresara, a los efectos del análisis del sistema fluvial en la escala aquí considerada, el transporte de arena se produce a una tasa que es la correspondiente a la capacidad de saturación, razón por la cual puede computarse a partir de fórmulas tales como la de Englund - Hansen, que arroja un valor del transporte total de arenas del orden de 25 millones de toneladas al año (Amsler, M.; 1995).

Considerando una densidad promedio de un depósito de arena del orden de 1700 +/- 100 kg/m³, el transporte citado equivale a un volumen cercano a 15 millones de metros cúbicos anuales.

En cuanto a los limos y las arcillas, estos son transportados por el río Paraná como carga de lavado. No existen límites prácticos para la cantidad de sedimento transportado por la corriente de agua en este modo de transporte. Debe recordarse que en todos los análisis efectuados a lo largo del estudio, se ha considerado como carga de lavado a la fracción fina (limos más arcillas) del transporte en suspensión medido en las estaciones de aforos sólidos utilizadas. Si bien esto no es estrictamente cierto, ya que se considera a la carga de lavado constituida por tamaños de partículas que se encuentran en muy pequeñas cantidades en una muestra del lecho (van Rijn, L.; 1993), resulta aceptable a los fines prácticos y para el cumplimiento de los objetivos del estudio. Por otro lado, no existen mediciones específicas a lo largo del sistema que permitan una determinación más precisa del límite entre carga de lavado y en suspensión.

Tal como se expresara en el punto anterior, el río Paraná recibe un aporte de material sólido en suspensión total (fino más grueso) del orden de 123 millones de toneladas anuales (calculado para el período 1969-89), en la confluencia con el río Paraguay. En base a los estudios efectuados, puede considerarse como base para el análisis que alrededor de 100 millones de toneladas anuales constitu-

y en el aporte de fracción fina (fundamentalmente limos) debido al río Bermejo.

Es oportuno señalar en este punto que algunos estudios antecedentes (Amsler, M.; 1995) dan un valor del transporte de partículas de limos y arcilla en el Paraná en el orden de 145 millones de toneladas anuales. El mismo fue determinado a partir de datos del período 1976-81, y considerando como diámetro límite de la carga de lavado un valor de 31 (m. Si bien se está en los mismos órdenes de magnitud, se resalta el hecho ya mencionado de la variabilidad de los aportes sólidos calculados en función de los períodos considerados.

En cuanto a la densidad de los depósitos de limo, puede tomar un valor variable entre 1100 y 1600 kg/m³, dependiendo del diámetro de las partículas, el tipo de sedimento y el tiempo de consolidación/deposición.

Se ha caracterizado entonces el aporte sólido del río Paraná, antes de la entrada al Delta. El Delta del río Paraná abarca una franja de tierras bajas, con una superficie total aproximada de 1500000 Ha, que se inunda periódicamente debido fundamentalmente a las crecidas de los ríos Paraná, Uruguay, y de la Plata. La zona del Delta está conformada por numerosos cursos de agua de distinta magnitud, naturales y artificiales, cuyo comportamiento hidrodinámico está sujeto a las condiciones de caudales aportados por los ríos Paraná y Uruguay, y a los niveles en el Río de la Plata. El aporte líquido fundamental al sistema está dado por el Río Paraná, siendo sus dos brazos principales en la zona inferior el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú, que llevan el 20 y 80 % del caudal total del Paraná, aproximadamente (Bombardelli, F.; Menéndez, A.; Brea, J.D.; 1997) (Figura N° 34).

En el extremo inferior de la zona del Delta, el Río de la Plata constituye una hendidura en el litoral atlántico de Uruguay y Argentina, que descarga las aguas de los ríos Paraná y Uruguay al océano Atlántico. Su longitud aproximada es de 290 km. El nivel de agua en el Río de la Plata está determinado por la descarga fluvial, el régimen de mareas y los factores atmosféricos o meteorológicos.

Toda la zona del Delta del Paraná se encuentra afectada por la onda de marea que penetra en el Río de la Plata. Dicha onda está alterada, entre otros factores, por la descarga fluvial, la resistencia al escurrimiento por la baja profundidad, la morfología del estuario, y la configuración de la red de canales que conforma el Delta. Hacia aguas arriba, la onda de marea remonta los brazos del Delta y el Río Paraná, considerándose que su efecto es totalmente despreciable recién a la altura de la ciudad de Rosario.

El análisis de la composición granulométrica de los sedimentos del lecho de los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú, y de los procesos geomórficos

que les dieron origen, permiten concluir que el último de los cursos mencionados capta la mayor parte de los caudales líquido y sólido del río Paraná antes de la bifurcación (Amsler, M.; 1995). El Paraná de las Palmas puede llegar a transportar volúmenes importantes de arena en suspensión, que deposita al llegar al Canal Mitre, sólo en situaciones de grandes crecientes (Hopwood, H.; Menéndez, A.; Chividini, M.; Cavaliere, M.; Brea, J.D.; 1991).

En la zona del Delta, los cambios fluviomorfológicos se relacionan en gran parte con los desbalances de masa de sedimento entrante y saliente de una zona o tramo de río. Para la realización de este análisis es conveniente discutir separadamente la mecánica de las arenas, por un lado, y la de los limos y arcillas, por el otro.

Como ya se expresara, el lecho de los cauces principales es de arena, y el transporte de dicho material se produce a una tasa correspondiente a la capacidad de saturación. Esto implica que la capacidad de transporte de estas corrientes fluviales, en el supuesto caso de que se produzca un déficit en un aporte del sistema superior, será completada siempre por aportes sólidos tomados del lecho del río. Sobre este tema se volverá al analizar la influencia de cambios del aporte sólido del Bermejo en el sistema.

Como consecuencia de los hechos señalados, se concluye que la formación de bancos y depósitos de arena en el Delta depende del material aportado por los cauces principales del Paraná, y no por los suministros en la alta cuenca. Cabe aclarar asimismo que, en términos generales, las corrientes del Río de la Plata no tienen capacidad de arrastre suficiente para el transporte de arenas, lo que implica que las arenas que ingresan al Delta por transporte fluvial son depositadas en esa zona, pudiendo ser redistribuidos en algunos casos por acción del viento y/o por procesos litorales (acción del oleaje sobre playas).

Para el análisis de la deposición de limos y arcillas, resulta conveniente caracterizar el comportamiento del sistema en aguas bajas y en aguas altas.

En el caso de aguas bajas, los limos son transportados como carga de lavado junto con la corriente de agua. En esta condición, las aguas fluyen por los cursos del sistema en forma encauzada, existiendo algunas pérdidas del material de la carga de lavado en brazos transversales y cuerpos de agua laterales, tales como lagunas y dársenas portuarias, donde se dan las condiciones de velocidad de la corriente que permitan su deposición. Consecuentemente, puede decirse que el limo es conducido con una eficiencia alta a la desembocadura de los cauces fluviales en el Río de la Plata.

En el caso de aguas altas, se produce un intercambio entre el agua de los cauces y las masas de agua que inundan las planicies e islas del Delta.

Cuando una masa de agua con carga de lavado ingresa en zonas inundadas de muy baja velocidad, se produce la deposición de dichos materiales, contribuyendo de ese modo al crecimiento del Delta.

En cuanto a la tasa de avance del frente del Delta, cabe indicar que, en la situación actual, es del orden de 100 metros/año.

Llegamos finalmente al último nodo del sistema estudiado: el Río de la Plata. A los efectos del presente análisis, este río puede dividirse en (Figura N° 35):

† Río de la Plata Superior, desde el frente del delta hasta una línea imaginaria desde La Plata hasta Colonia.

† Río de la Plata Medio, zona canal Intermedio, desde la línea La Plata - Colonia hasta la altura de la Torre Mareográfica Oyarbide, en el Km 121 del canal navegable principal.

† Río de la Plata Exterior, zona externa de la Barra del Indio.

El Río de la Plata Superior es la zona de mayor actividad fluvialógica. En particular se produce el relleno del lecho debido a la deposición de limos en el fondo del estuario, y la formación de bancos de materiales limosos en el frente del Delta.

En relación a los dragados de mantenimiento de los canales de navegación en esta zona, cabe indicar que en su estado actual, con una profundidad de 9.75 metros al cero de las cartas náuticas y con anchos de solera del orden de 100 metros, los volúmenes de mantenimiento medios anuales son del siguiente orden de magnitud:

Canales	Volumen de mantenimiento
Mitre	4000000 m ³ /año (5400000 tn/año)
De Acceso	1000000 m ³ /año (1350000 tn/año)
De Acceso Norte y Sur	1000000 m ³ /año (1350000 tn/año)
Martín García	7000000 m ³ /año (9450000 tn/año)

Los materiales dragados son casi exclusivamente limos. Para la transformación a peso se ha considerado una densidad de 1350 kg/m³. La ubicación de los canales puede observarse en la citada Figura N° 35.

En consecuencia, el monto total de sedimentos depositados en los canales navegables principales de este sector del Río de la Plata resulta del orden de 17550000 toneladas anuales.

Si consideramos, tal como se indicara más arriba, que el aporte de finos del Bermejo al sistema es de unos 100 millones de toneladas anuales, los sedimentos depositados en los canales del Río de la Plata Superior representan aproximadamente un 17 % de dicho aporte. Se concluye que el porcentaje restante (83 % menos lo que queda en el Delta) se deposita en parte en el lecho del estuario, fuera de la zona de los canales, y, por otra parte, se transporta hacia el Río de la Plata exterior y el Océano Atlántico.

En el Río de la Plata Medio existe aproximadamente un equilibrio entre el sedimento entrante y saliente. Consecuentemente no se producen grandes cambios fluviomorfológicos en esta zona.

En lo que se refiere al Río de la Plata Exterior, allí se ubica la llamada Barra del Indio. Esta constituye una elevación del lecho en la boca exterior del Río de la Plata, que se produce debido a la decantación en aguas salobres de las partículas mas finas de la carga de lavado proveniente del río Paraná. Los tamaños de partículas en esta zona son en general menores a 15 micrones, y las densidades de depósito inicial en el lecho y en los canales navegables son del orden de los 1100 kg/m³.

En relación a los dragados de mantenimiento del canal de navegación Punta Indio, ubicado en la zona, en su estado actual, con una profundidad de 9.75 metros al cero de las cartas náuticas y con anchos de solera del orden de 100 metros, los volúmenes de mantenimiento medios anuales son del orden de 5000000 m³/año. Considerando la densidad de los depósitos, ello equivale a 5500000 toneladas de sedimento seco cada año.

De todo lo expuesto surge que para el mantenimiento de los canales navegables del Río de la Plata resulta necesario remover aproximadamente 23 millones de toneladas de sedimento cada año. Esta cifra representa, en términos globales, el 23 % del peso total de los sedimentos aportados por el Bermejo.

El 77 % restante se repartiría entre depósitos en la zona del Delta, lecho del Río de la Plata fuera de la zona de canales, y el Océano. Este último porcentaje representa en términos de volumen unos 56000000 m³/año. Si se lo considera uniformemente distribuido sobre el Río de la Plata Superior (aproximadamente 3340 km²), daría una tasa de crecimiento del lecho del río de 1.7 cm/año, mientras que si se considera el total del Río de la Plata (aproximadamente 21320 km²) la tasa se reduce a 0.26 cm/año. Cualesquiera de los valores que se considere, el cálculo realizado permite confirmar los análisis efectuados, ya que en líneas generales el lecho del Río de la Plata mantiene aproximadamente

constante su cota de fondo salvo en la zona de la Barra del Indio, y además, como se indicara, parte del material fino queda en la zona del Delta y en el Océano.

c.3) Análisis global del transporte de sedimentos en el sistema Bermejo - Paraguay - Paraná -Río de la Plata, con acciones en la Alta Cuenca.

En este punto se efectúan los análisis tendientes a determinar la afectación que los distintos escenarios de acciones en la Alta Cuenca del río Bermejo estudiados, generarían en la carga sedimentaria tanto del Bermejo Inferior, como de los demás ríos del sistema.

Como ya se expresara en el punto c.2), los escenarios de aplicación previstos (situación actual; situación con los aprovechamientos proyectados de Las Pavas, Arrazayal y Cambarí; y con políticas de manejo de cuencas que disminuyan la carga sólida) sufrieron algunas modificaciones, tal como se desarrolla en los párrafos siguientes.

1. Cuenca del río Bermejo Superior.

Todo lo referente al modelo morfológico del río Bermejo Superior se presenta en el punto b.3) 2..

En este caso los escenarios estudiados fueron:

† Situación con las presas proyectadas. * Situación con intervenciones de mitigación en las subcuencas de los ríos Iruya y Pescado.

En el primer caso, se consideró la construcción de los aprovechamientos de Las Pavas y Arrazayal, sobre el río Bermejo, y Cambarí, sobre el río Tarija. Para los cálculos se asumió que, por efecto de la sedimentación en el embalse, las presas atrapan la totalidad de los sedimentos provenientes desde aguas arriba de la cuenca.

El proceso de sedimentación en los embalses genera una mayor tendencia a la erosión del cauce en los tramos aguas abajo de las mismas. El aumento del proceso erosivo genera una incorporación mayor de sedimento en el flujo líquido, de modo de equilibrar la menor alimentación de sedimento desde la zona aguas arriba de la cuenca. En síntesis, el resultado final obtenido es de una ligera disminución de los volúmenes transportados, efecto que desaparece por completo después de recibir los aportes de los afluentes Iruya y Pescado.

El proceso erosivo que se desplaza hacia aguas abajo tiende a una situación de equilibrio a largo plazo con una menor pendiente longitudinal del cauce, que se traducirá en una disminución de la capacidad de transporte sólido.

En el otro escenario analizado se consideró la reducción del aporte sólido del sistema Iruya-Pescado al Bermejo Superior, en tres condiciones: a un 75 %, 50 % y 25 % del volumen de aporte total anual actual (de arenas).

Estas disminuciones del aporte sólido se consideran producidas por efecto de potenciales intervenciones en el territorio, tales como acciones difusas (como prácticas agropecuarias especiales, de reforestación, etc) o construcción de obras de retención de sedimentos en la red fluvial (como protecciones de márgenes, obras transversales de interceptación, cuencas de depósito, etc). La falta de asociación de los escenarios a obras concretas se basa en la ya señalada dificultad para identificar políticas factibles de manejo de cuencas que afecten significativamente la carga sólida de los ríos de la cuenca del Bermejo, lo que motivó que los escenarios de análisis efectivamente utilizados consideren directamente disminuciones porcentuales en las cargas sólidas aportadas, para cada caso de interés, de modo de conocer cuál es la respuesta del sistema a tal sollicitación, independientemente de la potencial causa que pueda generarla (Brea, J.D.; Spalletti, P.D.; Spalletti, L.; Rafaelli, S., 1999). Lo expresado vale también para la cuenca del río San Francisco.

La reducción del aporte sólido del sistema Iruya - Pescado a un 75 % del valor actual, puede asociarse a una hipótesis de intervención difusa en el territorio, con prácticas especiales de protección contra la erosión del suelo. El resultado obtenido en este caso indica que una eventual reducción del 25 % en el aporte sólido del sistema Iruya - Pescado produciría una reducción del 6 % en Pozo Sarmiento, y del 3 % de las arenas transportadas en la Junta de San Francisco.

La reducción del aporte sólido a un 50 % del valor actual, por su magnitud, puede asociarse, además de a una intervención difusa en el territorio, a la construcción de obras de retención de sedimentos en la red fluvial secundaria. El resultado obtenido en este caso indica que una eventual reducción del 50 % en el aporte sólido del sistema Iruya - Pescado produciría una reducción del 9 % en Pozo Sarmiento, y del 4 % de las arenas transportadas en la Junta de San Francisco.

Finalmente, la reducción del aporte sólido a un 25 % del valor actual, supone, además de una intervención difusa en el territorio y a la construcción de obras de retención de sedimentos en la red fluvial secundaria, la construcción de obras importantes en el cauce principal del río Iruya (protecciones de márgenes, grandes obras transversales de retención de sedimento, deflectores de sedimento y/o generación de cuencas de sedimentación, etc). El resultado obtenido en este caso indica que una eventual reducción del 75 % en el aporte sólido del sistema Iruya - Pescado produciría una reducción del 11 % en Pozo Sarmiento, y del 6 % de las arenas transportadas en la Junta de San Francisco.

Es de resaltar la poca influencia que tienen fuertes reducciones del aporte de arenas en la cuenca más productora de sedimentos, en la morfología del tramo de río Bermejo Superior aguas abajo, y en los aportes de arena hacia la Cuenca Inferior del río Bermejo.

Sobre la influencia del corte en el aporte de materiales finos (limos y arcillas) deben hacerse algunos comentarios. Como ya se expresara, el modelo numérico utilizado no simula el sedimento fino en suspensión. Dadas las características de los ríos de la red, puede afirmarse que el transporte de finos se realiza como carga de lavado en todo el río Bermejo Superior. En estas condiciones, dicho río no «sentiría» reducciones en el aporte de finos, quedando determinada la concentración de limos y arcillas por la cantidad de estos materiales aportada a la corriente y no por la capacidad de ésta para transportarla.

Lo expresado estaría indicando que reducciones de las cantidades de sedimento fino aportadas, por ejemplo, en el sistema Iruya - Pescado, se reflejarían casi sin alteraciones a la salida de la cuenca, en la Junta de San Francisco. Si bien esto es cierto en teoría, en la práctica la situación es más compleja, entrando en juego otros factores, tales como cambios morfológicos, reincorporación de finos de las planicies inundables y de las márgenes, que hacen que exista una recuperación de materiales finos.

En el caso del Bermejo Superior, la disponibilidad de finos en el lecho resulta escasa (a partir de los análisis granulométricos efectuados), mientras que el aporte puede ser mayor desde las márgenes barrancosas del último tramo.

Puede apreciarse el alto grado de dificultad que presenta intentar cuantificar cuál es el grado de recuperación de finos en el río, en relación con potenciales cortes en el suministro de los mismos en las cuencas de aporte. No obstante, los balances de transporte en la red realizados permiten afirmar que dicho grado es mínimo en relación a los escenarios de reducción analizados, y teniendo en cuenta además la escala de análisis y los objetivos del estudio.

Por otro lado, se puede asumir de todos modos que existe una reducción del sedimento fino en suspensión, asociada a la reducción del sedimento grueso en suspensión, pero cuya relación no es fácil de predecir, dependiendo de las medidas adoptadas y de la reacción morfológica del sistema fluvial a tales cambios de aporte sólido.

Obras de mitigación del tipo difuso (prácticas agropecuarias adecuadas, reforestación) actúan más sobre la reducción de la fracción fina, mientras que las medidas estructurales (protección de laderas, obras transversales en la red fluvial), lo hacen más sobre la fracción gruesa. De todos modos, en ambos tipos de intervención, se tendrá una reducción en ambas fracciones.

2. Cuenca del río San Francisco.

Todo lo referente a las corridas de producción del modelo morfológico del sistema Grande - Lavayén - San Francisco se presenta en el punto b.3) 1. iii..

A los fines de evaluar cómo se comporta el sistema ante una variación de la carga sólida aportada, se realizó una corrida considerando una reducción del aporte sólido grueso en la sección de inicio del río Grande, del 30 % del aporte total (ver punto b.3) 1 iii.4). Una reducción del monto mencionado puede asociarse acciones difusas en la cuenca, como prácticas agropecuarias especiales de protección del suelo.

Los resultados obtenidos resultan coincidentes a lo observado en el río Bermejo Superior. La disminución del caudal sólido grueso ingresante al río Grande se traduce en una erosión en las primeras secciones, con menores deposiciones en la zona anastomosada que las verificadas en la situación actual. Al incorporarse los tributarios, el río toma las mismas características que en la modelación del escenario actual, por lo que se concluye que la reducción del caudal sólido modelada es recuperada casi en su totalidad en el mismo río Grande, y parte en el San Francisco, sin afectar al resto del sistema, esto es, sin variaciones en el aporte al río Bermejo Inferior en la Junta de San Francisco.

Es oportuno resaltar las limitaciones de datos básicos disponibles en este sistema, ya descriptas a lo largo del informe, que hacen que los resultados obtenidos de la modelación deban considerarse cualitativamente. Este hecho, sumado al considerablemente menor aporte sólido del río San Francisco frente al del Bermejo Superior (20 % vs 80 % del total ingresante al Bermejo Inferior), motivó no analizar otros escenarios.

Sobre el comportamiento de los limos y arcillas en suspensión, valen las mismas consideraciones efectuadas sobre el particular en el punto c.3)1..

3. Incidencia en el Bermejo Inferior.

En el marco del PEA se ha implementado el modelo morfológico del río Bermejo Inferior, desde la Junta de San Francisco hasta la Ruta N° 11, en la cercanía de las localidades de L.V.Mansilla (Formosa) y Colonia Vélaz (Chaco).

En base a una intensa búsqueda y recopilación de antecedentes, y a una realización de tareas de campo específicas para lograr los objetivos buscados, se obtuvo un importante avance en el conocimiento del funcionamiento fluviomorfológico del sistema, fundamental para el desarrollo de un modelo que diera resultados confiables (Brea, J.D.; Busquets, M.S.; 1999 (2)).

En consecuencia, se logró una excelente representación del comportamiento fluviomorfológico del río Bermejo Inferior, más aún si se tiene en cuenta la alta complejidad del sistema, que combina fuertes procesos de erosión/deposición en el lecho, con materiales de diferentes características, desbordes en diferentes puntos del curso de agua, y escasa información básica específica.

Se ha identificado que el sistema en sus condiciones actuales parece encontrarse en equilibrio, desde el punto de vista del transporte sólido (Brea, J.D.; 1999). Como se expresara en el punto c.3) 2., se verificó una concordancia entre el aporte sólido en suspensión aportado al Bermejo Inferior desde la Alta Cuenca (Bermejo + San Francisco), y el transporte medido en El Colorado, cerca del final del tramo estudiado (unos 100 millones de toneladas anuales en cada caso).

Parte del material ingresado en la Junta de San Francisco es depositado en el tramo, y es compensado con la erosión del lecho y márgenes del río en épocas de crecida, lo que da la equivalencia entre el material que entra y sale del sistema. En el informe de referencia se presentan gráficos, análisis y corridas del modelo en los que se fundamentan estos comentarios (Brea, J.D.; 1999).

Tanto las erosiones del lecho durante los picos de las crecidas, como las deposiciones en las mismas secciones en las zonas de recesión de los hidrogramas, son bien explicadas utilizando ecuaciones que calculan el transporte total de arenas. Esto permite concluir que en situación de crecida el Bermejo inferior se comporta como un río de arenas muy finas (d_{50} entre 80 y 100 micrones), con una carga de limos y arcillas en suspensión que se comporta como carga de lavado. Los limos encontrados en abundancia en los muestreos superficiales durante aguas bajas, son depositados en los meses posteriores al período de aguas altas, y son los que dan la configuración definitiva a las secciones hasta el siguiente período de crecidas.

Los escenarios de cambio en el aporte sólido al Bermejo Inferior en la Junta de San Francisco analizados fueron:

† Reducción del aporte de arenas a un 70 % del actual. * Reducción del aporte de arenas a un 30 % del actual.

Cabe consignar que la situación con las presas proyectadas en la Alta Cuenca, de acuerdo a los re-

sultados presentados del modelo del Bermejo Superior, no genera cambios en el aporte de arenas a la Cuenca Inferior, razón por la cual no fue considerada esa hipótesis.

Las reducciones del aporte sólido en el sistema Iruya - Pescado analizadas, producen como máximo una disminución del transporte de arenas en la Junta de San Francisco del 6 % con respecto a la situación actual. Esta pequeña variación resultó imperceptible al ser analizado su impacto en la morfología del Bermejo Inferior.

Esto motivó la selección de los dos escenarios consignados, que constituyen reducciones del aporte sólido grueso más severas. De esta manera pudo analizarse la respuesta del sistema ante tales solicitaciones, aunque las disminuciones estudiadas no puedan ser asociadas a obras o políticas de manejo concretas en la Alta Cuenca.

Como resultado se obtuvo que, en ambas condiciones, la recuperación de las arenas se produce rápidamente. Aguas abajo de la Junta de San Francisco, existe un amplio tramo de río anastomosado (aproximadamente hasta el Paraje El Colgado), en el que se produce el depósito de gran parte de las arenas transportadas en la situación actual, y de donde se recuperan las arenas en los escenarios de reducción analizadas.

También en este caso resultan válidas las consideraciones realizadas sobre los impactos de las reducciones de finos en la Alta Cuenca. En este caso, las posibilidades de recuperación de limos es mayor en el Bermejo Inferior, debido a las características del lecho y márgenes de este río. También en este caso resulta imposible cuantificar dicha recuperación, lo que sólo podrá lograrse con mediciones de campo una vez efectivizadas obras de retención aguas arriba. Los balances del transporte sólido en suspensión en el sistema, ya presentados, estarían indicando la escasa significación de las recuperaciones de limos de lecho y márgenes.

4. Incidencia en el Delta del Paraná y Río de la Plata.

233

En cuanto a la incidencia que cambios en los aportes sólidos del río Bermejo puedan tener en la conformación del Delta del río Paraná, es conveniente, tal como se explicara en el punto c.2.) 3., analizar separadamente el comportamiento de las arenas y el de los finos.

Puede afirmarse que el volumen anual de arenas que ingresan al Delta no será afectado por eventuales variaciones de aporte de arenas del Bermejo al río Paraguay por las siguientes razones:

† El lecho de los cauces principales del río Paraná es de arena, y, como ya se expresara, el transporte de arena se produce a una tasa correspondiente a la capacidad de saturación del transporte.

Por lo tanto, la capacidad de transporte del Paraná, en el supuesto caso de que se produzca un déficit en un aporte del sistema superior, será completada siempre por aportes sólidos tomados del lecho del río. La longitud de recarga del transporte a partir de las existencias de arena en el lecho se produce en longitudes reducidas (orden de magnitud 1 km) frente a la longitud de desarrollo del río Paraná desde Corrientes hasta el Río de la Plata (del orden de 1000 km).

† Más allá de que el río Bermejo no se caracteriza por tener un importante aporte de arenas al sistema, quedó demostrado en los puntos anteriores que las reducciones del monto de dicho material analizadas en los escenarios descriptos, quedan recuperadas dentro de la cuenca del Bermejo.

Como consecuencia, se concluye que la formación de bancos y depósitos de arena en el Delta seguirá con su ritmo normal, no siendo afectadas por posibles políticas de manejo en la Alta Cuenca del Bermejo que generen reducciones del aporte de arenas.

En cuanto a la deposición de limos y arcillas, ya se analizó en el punto c.2.) 3. la conveniencia de estudiar el comportamiento en condición de aguas bajas y de aguas altas.

Resumiendo, en el caso de aguas bajas, las aguas se mantienen encauzadas, sin desbordes, y los limos son transportados como carga de lavado, con una alta eficiencia hasta la desembocadura de los cauces en el Río de la Plata. En aguas altas, se verifican desbordes en planicies y zonas de islas, que generan deposiciones de limos en las mismas, contribuyendo de este modo al crecimiento del Delta.

Se concluye que una reducción de la concentración de sedimentos de la carga de lavado del Paraná tendría el efecto de atenuar la velocidad de crecimiento del delta por deposición de limos. Desde el punto de vista de la infraestructura, dicha reducción implicaría menores tasas de sedimentación en recintos portuarios laterales del sistema (fuera del cauce principal) y una disminución del volumen de sedimento a procesar en plantas de tratamiento de aguas.

Por otro lado, no son dables de esperar procesos erosivos en el Delta del Paraná por esta causa.

La tasa de avance del frente del Delta, que en la situación actual es del orden de 100 metros/año, resultará evidentemente afectada, siendo su reducción aproximadamente proporcional a la de la concentración de limos en las aguas del Paraná.

Puede decirse, simplificando el funcionamiento del sistema, que las arenas tienen más peso en el crecimiento del Delta en longitud, y que los limos lo tienen en el crecimiento en cota. En efecto, en el frente del Delta se forman depósitos de arena que determinan zonas de baja velocidad, donde existen condiciones favorables para la deposición de los finos. La complejidad del fenómeno descripto y la ausencia de datos específicos, impiden tanto cuantificar cada uno de los procesos, como, y en consecuencia, la incidencia que tendrían reducciones del aporte de limos.

El comportamiento fluviomorfológico del Río de la Plata en la situación actual, se explicó en el punto c.2) 3..

Como se ha expresado, el Río de la Plata Superior constituye la zona de mayor actividad fluviomorfológica, produciéndose el relleno del lecho por deposición de limos en el estuario y la formación de bancos de materiales limosos en el frente del Delta.

Como consecuencia de una reducción del aporte de limos del Río Paraná es esperable también en este caso una reducción de la tasa de crecimiento del lecho del Río de la Plata Superior. Dado que, en términos generales, tanto el crecimiento del Delta como el relleno progresivo de esta zona del Río de la Plata causan inconvenientes en la infraestructura y usos del sistema (en particular la navegación comercial y deportiva), puede concluirse que una reducción de la tasa de estos procesos no presentará inconvenientes prácticos.

Como ya se señalara, en el Río de la Plata Medio no existe gran actividad fluviomorfológica, no siendo en consecuencia esperables efectos de eventuales acciones de control de finos en el Bermejo.

Finalmente, también en el Río de la Plata Exterior reducciones del aporte de finos del Paraná redundarán en disminuciones de las tasas de sedimentación.

En el punto c.2) 3. se concluyó que para el mantenimiento de los canales navegables del Río de la Plata resulta necesario remover aproximadamente 23 millones de toneladas de sedimento cada año, lo que representa, en términos globales, el 23 % del peso total de los sedimentos aportados por el Bermejo.

En términos prácticos esto significa que sería necesario retener una proporción de 10 toneladas anuales de material fino en el sistema del Bermejo para lograr una reducción de 2.3 toneladas de sedimento dragado en los canales navegables del Río de la Plata.

En la misma línea de análisis, y siempre considerando un aporte de finos del Bermejo de 100 millones de toneladas anuales, debería retenerse todo ese aporte en la Alta Cuenca, para lograr una potencial eliminación total de los dragados de mantenimiento de los canales. Esta hipótesis, imposible de llevar a la práctica, permite descartar la posibilidad de prescindir de los dragados a partir de obras de retención en la Alta Cuenca.

A modo de ejemplo del impacto de una obra concreta, puede decirse que la construcción de las presas proyectadas en la Alta Cuenca (Las Pavas y Arrazayal, sobre el Bermejo, y Cambarí, sobre el Tarija) genera un corte del aporte de finos del orden de los 15 millones de toneladas anuales, valor obtenido homogeneizando las series de registros de aforos sólidos en suspensión en Balapuca (Bermejo) y Astilleros (Grande de Tarija). Este número será menor en la práctica debido a que se ha considerado, como simplificación, que las presas retienen todo el fino (en realidad las arcillas pasan), y a Cambarí afectando a todo el Grande de Tarija, cuando sólo cortará el aporte del Tarija.

Teniendo en cuenta lo analizado en puntos an-

teriores acerca de la posibilidad de recuperación de materiales finos del lecho y márgenes del río Bermejo Superior e Inferior, puede estimarse a los fines de este cálculo expeditivo de recuperación del 10 %. De este modo, el río Bermejo estaría aportando al sistema unos 87 millones de toneladas anuales, en lugar de los 100 millones actuales.

Esto significa que la retención de finos generada por las presas del Bermejo se reflejaría en una reducción del dragado de unos 3 millones de toneladas de sedimento en los canales navegables del Río de la Plata. Este valor fue calculado teniendo en cuenta que la proporción de los depósitos de finos en el Delta del Paraná y en el Río de la Plata se mantiene como en la actualidad.

FIGURAS | CAPÍTULO C

- Figura N° 1 a 21: Granulometría material del lecho. Sistema Paraná - Paraguay - de La Plata. (*)
- Figura N° 22: Sistema Bermejo - Paraguay - Paraná - Río de la Plata. Ubicación de las estaciones de aforo utilizadas (*).
- Figura N° 23: Río Paraguay en Puerto Pilcomayo: relación $h-QI$.
- Figura N° 24: Río Paraná en Ita-Cuá: relación $h-QI$.
- Figura N° 25: Río Paraná en Itatí: relación $h-QI$.
- Figura N° 26: Río Paraná en Corrientes: relación $h-QI$.
- Figura N° 27: Río Paraná en Timbúes: relación $h-QI$.
- Figura N° 28: Río Paraná en Chapetón: relación $h-QI$.
- Figura N° 29: Río Paraná en Túnel Subfluvial: relación $h-QI$.
- Figura N° 30: Río Paraguay en Puerto Pilcomayo: relación $QI-Qs$.
- Figura N° 31: Río Paraná en Ita-Cuá: relación $QI-Qs$.
- Figura N° 32: Río Paraná en Itatí: relación $QI-Qs$.
- Figura N° 33: Río Paraná en Túnel Subfluvial: relación $QI-Qs$.
- Figura N° 34: Esquema Delta del Río Paraná.
- Figura N° 35: Esquema Río de la Plata.

(*) No se dispone de esta información en formato digital. En soporte papel esta disponible en las oficinas del PEA Bermejo en Buenos Aires.

Río Paraguay en Puerto Pilcomayo: relación h-QI

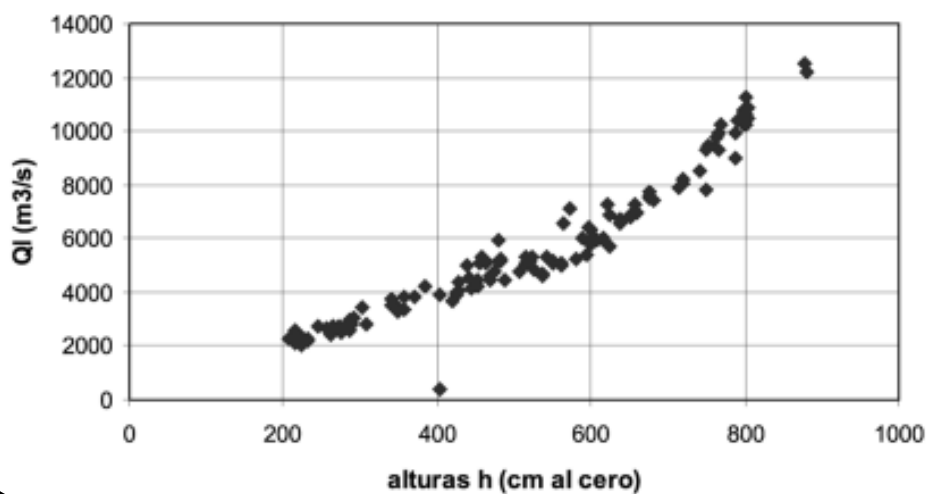
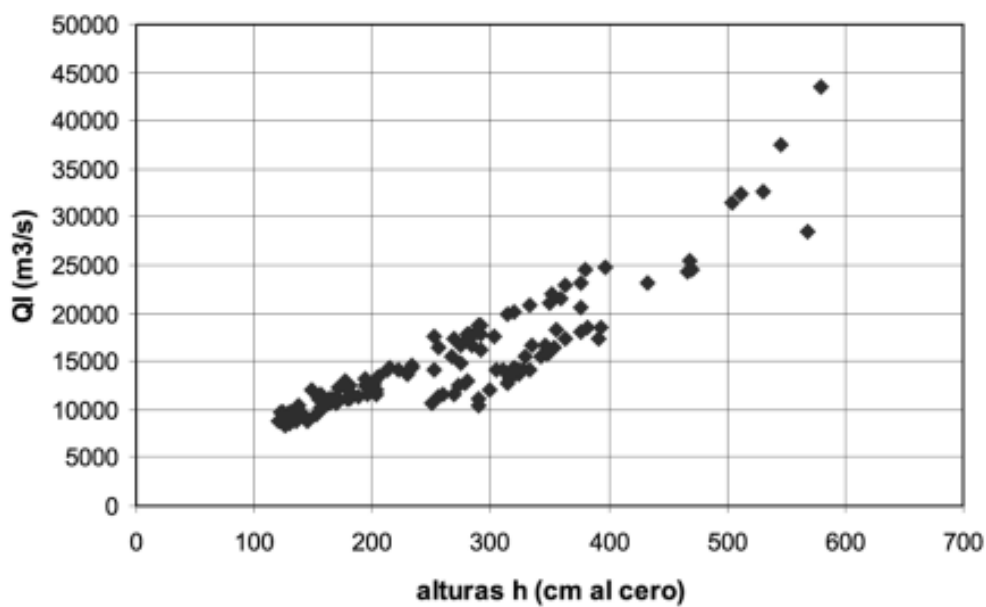


Figura nº 23

/ Figura nº 24

Río Paraná en Ita-Cuá: relación h-QI



Río Paraná en Itatí: relación h-QI

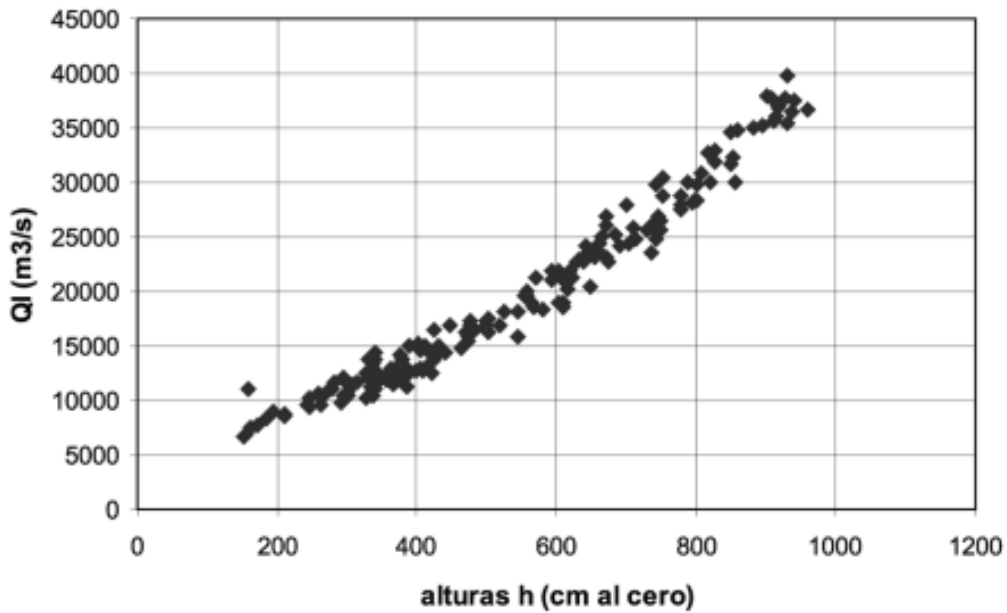
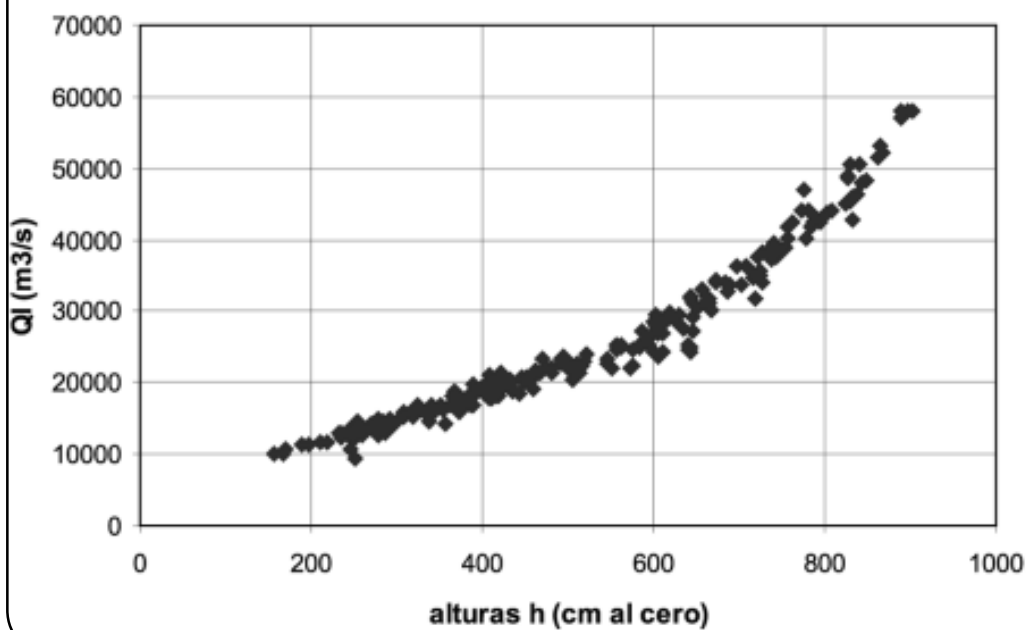


Tabla n° 25

/ Tabla n° 26

Río Paraná en Corrientes: relación h-QI



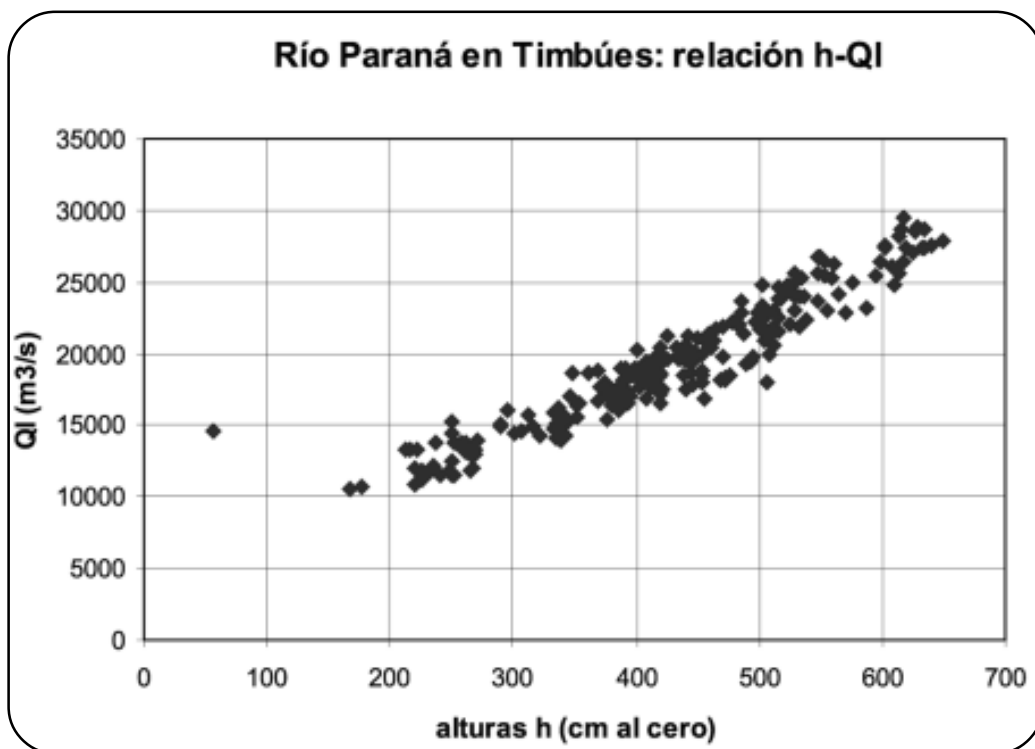
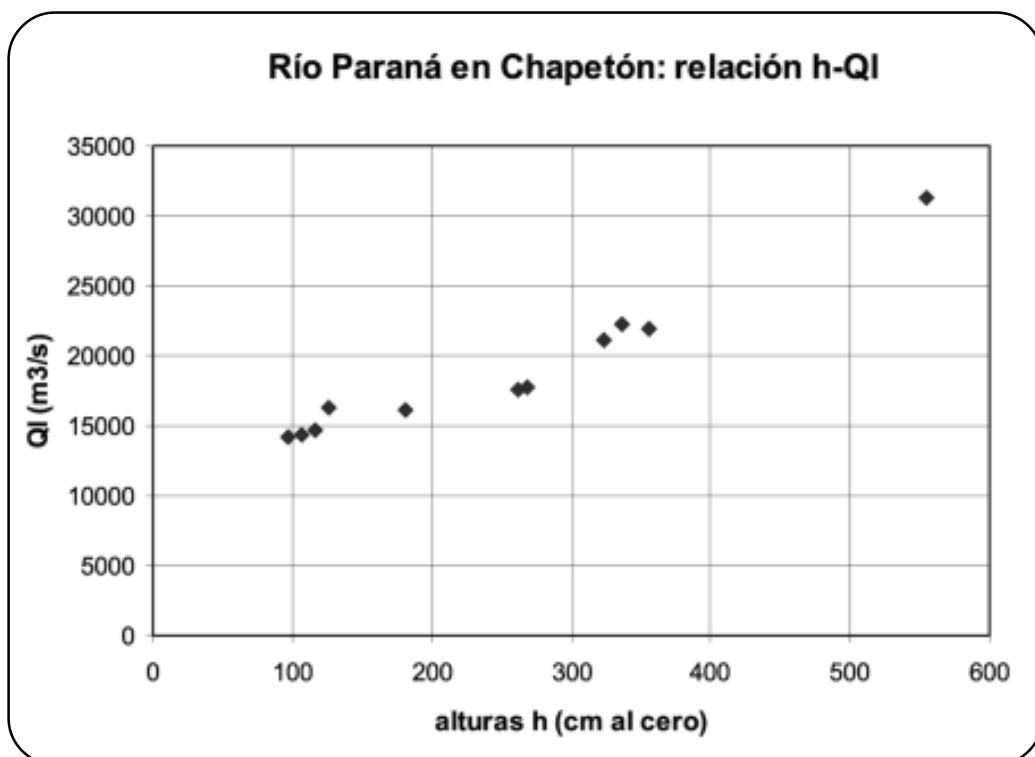


Tabla n° 27

/ Tabla n° 28



Río Paraná en Túnel Subfluvial: relación h-QI

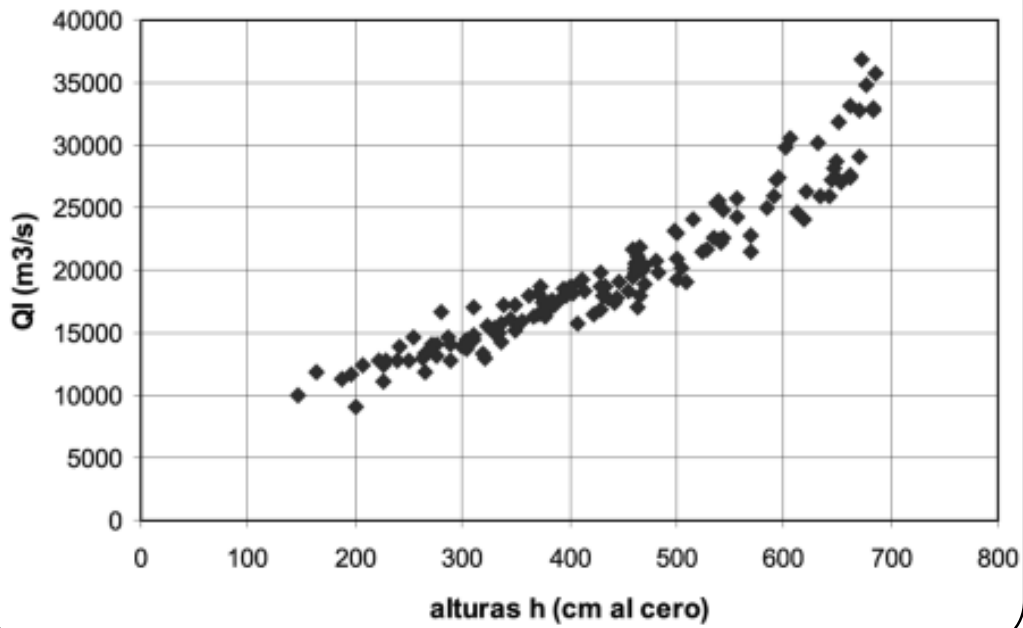
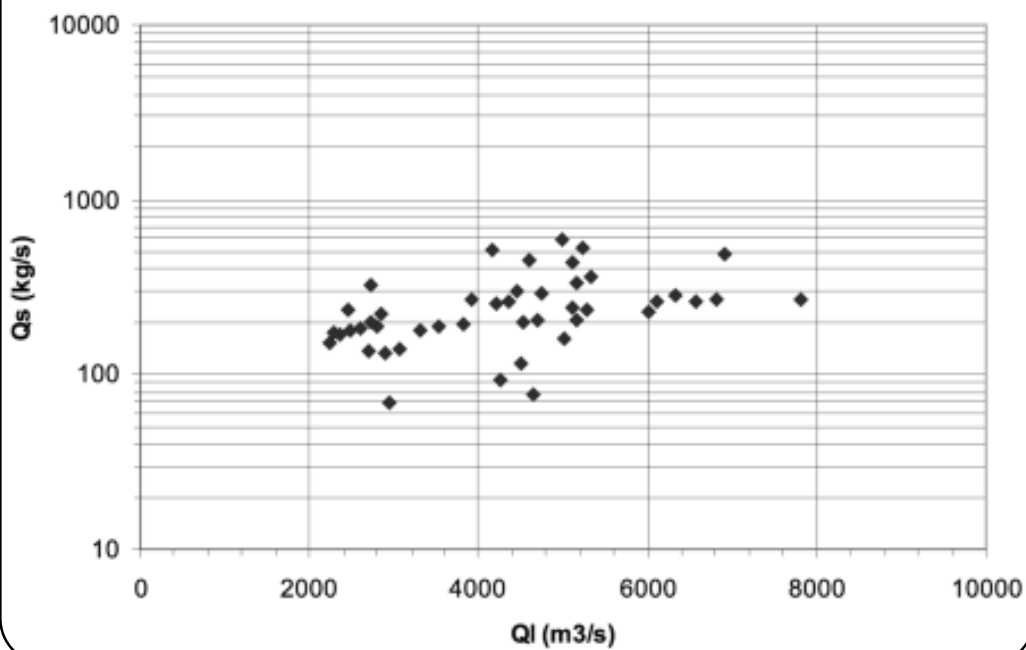


Tabla n° 29

/ Tabla n° 30

Río Paraguay en Puerto Pilcomayo: relación QI-Qs



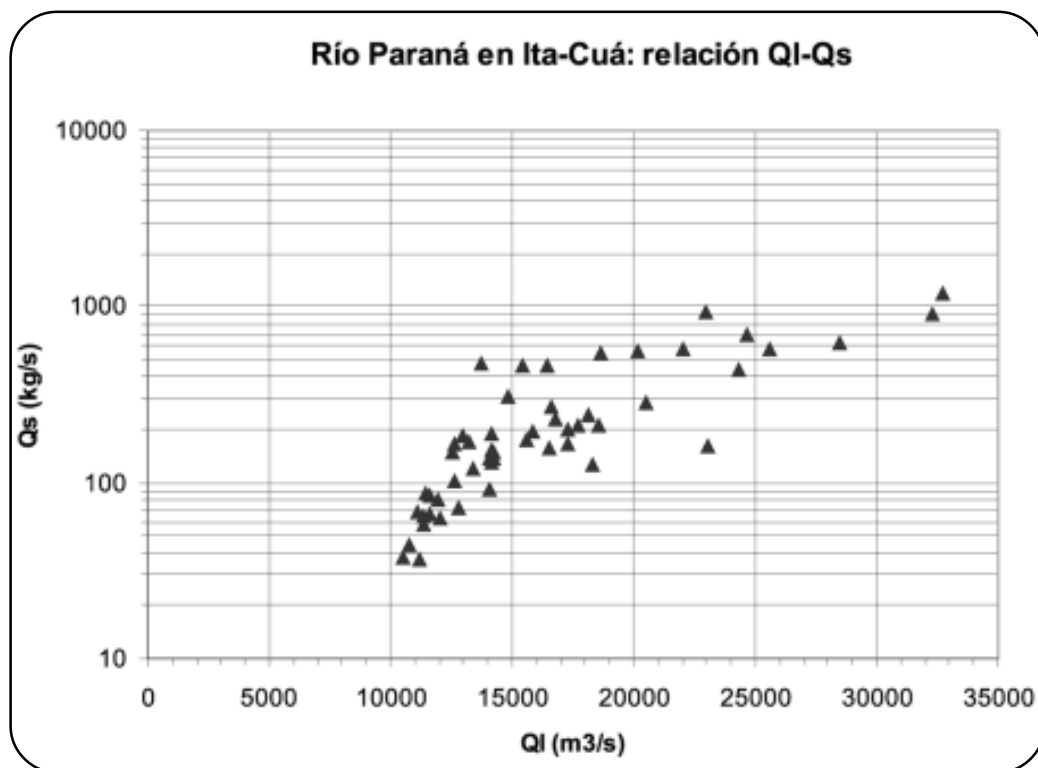
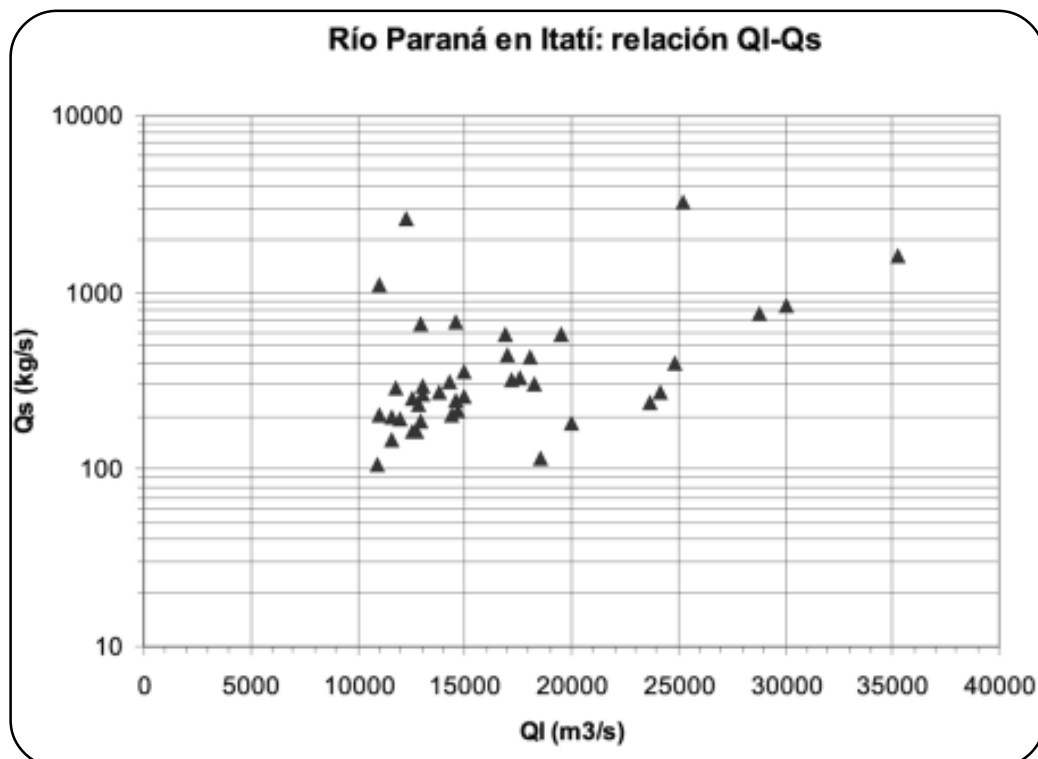


Tabla n° 31
/ Tabla n° 26

/ Tabla n° 32 Tabla n° 25



Río Paraná en Túnel Subfluvial: relación QI-Qs

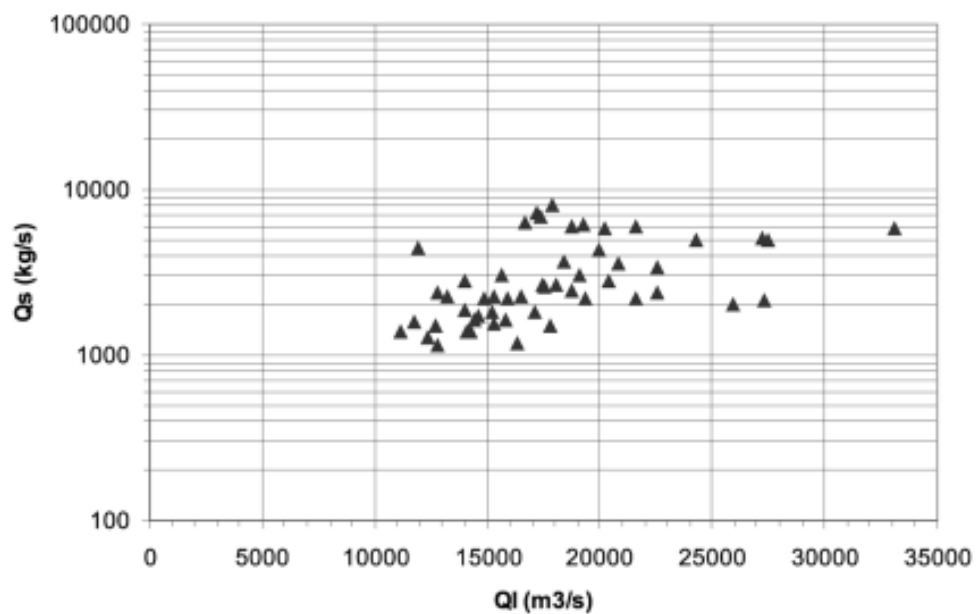


Tabla n° 33

**Tabla nº 34**



Tabla n° 35

Generación y transporte de sedimentos

CONCLUSIONES

Se efectuaron las tareas necesarias tendientes al cumplimiento de los objetivos generales del estudio, que fueron los siguientes:

† Evaluar la dinámica fluviomorfológica de los principales ríos de la Alta Cuenca (AC) del río Bermejo.

† Evaluar la importancia relativa, localización y características de los distintos mecanismos de producción de sedimentos en las distintas subcuencas, a partir de la caracterización de unidades de paisaje y la zonificación ambiental de la AC, desde este punto de vista. Determinar la incidencia en la generación de sedimentos de posibles propuestas de manejo de subcuencas que se consideren viables.

† Analizar y simular con técnicas de modelación el transporte de sedimentos en la AC para distintos escenarios de acciones, estructurales y no estructurales, y determinar la afectación que las mismas generarían en la carga sedimentaria del Bermejo aguas abajo. En particular, analizar la incidencia de los aprovechamientos de Arrazayal y Las Pavas, sobre el río Bermejo, y Cambarí, sobre el río Tarija, cuyo proyecto está siendo llevado adelante por la Comisión Binacional para el Aprovechamiento de los Recursos de la Alta Cuenca del Río Bermejo y del Río Grande de Tarija. Analizar además la incidencia de los escenarios de manejo de cuencas que surjan del punto anterior.

† Determinar el efecto que tendrían las alteraciones de la carga sedimentaria de dicho río en los procesos observados del funcionamiento del Delta del Río Paraná, desde el punto de vista fluviomorfológico.

† Evaluar la incidencia que los señalados cambios en la carga sólida del río Bermejo, tendrían en los procesos de sedimentación de los canales de navegación de la Hidrovía Paraguay - Paraná. Análisis de la potencial influencia en la variación de los volúmenes de dragado de mantenimiento en la vía navegable.

Con el fin de cumplir los objetivos mencionados, se generaron los productos previstos, que permitieron conocer el funcionamiento fluviomorfológico del río Bermejo en toda su extensión, y su influencia en el sistema Paraguay - Paraná - Delta - Río de la Plata.

Se ha implementado el modelo de producción de sedimentos en la Alta Cuenca del río Bermejo. El estudio incluyó en primer término la identificación de las unidades de paisaje, para luego pasar a análisis más detallados y específicos de la producción por erosión superficial y por procesos de desmoronamiento, deslizamiento y flujos rápidos de remoción en masa (capítulo a), Brea, J.D.; Spalletti, P.D.; Spalletti, L.; Rafaelli, S., 1999).

Dentro del estudio realizado resulta digno de destacar que el análisis de la potencialidad para el desarrollo de procesos de remoción en masa en la Alta Cuenca del Bermejo, presenta coincidencias con el correspondiente al modelo de generación por erosión superficial. En efecto, para la escala de estudio, existen concordancias entre las zonas susceptibles de producir sedimentos por ambas fuentes. La diferencia radicaría fundamentalmente entonces en características de las precipitaciones que generan cada uno de los fenómenos.

También debe tenerse en cuenta que para evaluar y cuantificar procesos de remoción en masa es necesario contar con cartas topográficas en escala más adecuada que la disponible para el presente

estudio (del orden de 1:5000), integrando el estudio con observaciones directas en la cuenca. El tamaño de la cuenca en estudio no permitió tal análisis. En el capítulo correspondiente, así como en el informe de referencia se recomiendan acciones a seguir en caso de encararse investigaciones sistemáticas de mayor detalle en este tema.

Sobre los resultados obtenidos, merecen destacarse los correspondientes a las subcuencas de los ríos Blanco, Iruya y Pescado, en la cuenca del Bermejo Superior, y Grande de Jujuy, en la del San Francisco.

Una conclusión general que se desprende de los estudios efectuados, citada y utilizada a lo largo de todo el estudio, es que no se identifican medidas de manejo en la Alta Cuenca del Bermejo que afecten sustantivamente el monto de sedimentos generados. Desde este punto de vista, y en las zonas más productoras de sedimento por cualquier fuente, puede decirse que, en el estado actual, la Alta Cuenca del Bermejo no está afectada por la acción antrópica.

En el caso de las medidas de manejo no estructurales, no se aprecia ninguna que tenga factibilidad y que permita reducir significativamente el volumen de sedimento producido en la cuenca. Tampoco se ha encontrado ninguna en los 194 proyectos presentados en el PEA por las provincias involucradas. Basta apreciar fotografías de la cuenca del Iruya, por ejemplo, para tener una visión de la envergadura del problema, y de la imposibilidad de atacarlo mediante medidas de mitigación factibles.

De este modo, sólo quedarían las medidas estructurales como factibles técnicamente de controlar la producción de sedimentos en la cuenca a nivel global, tanto evitando que la erosión se produzca como almacenando los sedimentos producidos. En cambio, desde el punto de vista económico y ambiental, a priori, estas medidas no parecen factibles.

Estas conclusiones deben asociarse a las expresadas anteriormente, sobre la afectación que cambios en el aporte sólido al Bermejo, puedan tener en el sistema Paraguay - Paraná - Delta - Río de la Plata.

Al respecto, lo expresado sobre las medidas de control debe tomarse en el contexto de la influencia de los sedimentos del Bermejo en el sistema citado. Lo dicho no implica que problemas puntuales, de alcance local, relacionados con procesos de producción de sedimentos en cualquier punto de la cuenca, no puedan resolverse mediante medidas estructurales y/o no estructurales factibles desde todo punto de vista, que cumplan su objetivo local específico.

En tal sentido, se recomienda investigar con mayor detalle las posibilidades técnicas y económicas de intervenciones estructurales en la red de drenaje de las cuencas afluentes al río Bermejo, así como posibles técnicas de mitigación de la erosión de carácter difuso.

Se han implementado los modelos morfológicos de los ríos Bermejo Superior y San Francisco, hasta la Junta de San Francisco.

En el caso del río Bermejo Superior, las conclusiones se presentan en el informe respectivo (Peviani, M.: 1999). Las principales indican que el tramo superior del río Bermejo presenta una situación actual del cauce bastante estable, con probable tendencia a la erosión. En el tramo inferior, se observa una situación actual del cauce opuesta, con tendencia a la deposición, condicionada por el fuerte aporte de sólidos de sus afluentes, los ríos Grande de Tarija, Iruya - Pescado y Blanco, en el tramo inicial y central, y los ríos Santa María - Colorado y San Francisco, en el tramo final.

El río Grande de Tarija presenta una situación general de equilibrio actual del cauce, pero probablemente tal resultado está fuertemente influenciado por las hipótesis que se han asumido para suplir la escasa información disponible sobre las características morfo-sedimentológicas.

En cuanto a los escenarios analizados para evaluar el impacto de la afectación de los aportes sólidos en el resto del sistema, se encontró que el proceso de sedimentación en los embalses de presas proyectadas en la Alta Cuenca (Las Pavas, Arrazayal y Cambarí) genera una mayor tendencia a la erosión del cauce en los tramos aguas abajo de las mismas. El resultado final obtenido es de una ligera disminución de los volúmenes transportados, efecto que desaparece por completo después de recibir los aportes del sistema Iruya - Pescado.

Por otra parte se analizaron distintos escenarios de reducción del aporte sólido de arenas hacia el río Bermejo, provenientes del sistema Iruya - Pescado. El resultado obtenido en la condición analizada más desfavorable (reducción del 75 % en el aporte sólido del sistema citado) fue que se produciría una reducción del 11 % en Pozo Sarmiento, y del 6 % de las arenas transportadas en la Junta de San Francisco. Es de resaltar la poca influencia que tienen fuertes reducciones del aporte de arenas en la cuenca más productora de sedimentos, en la morfología del tramo de río Bermejo Superior aguas abajo, y en los aportes de arena hacia las cuencas Media y Baja del río Bermejo.

En cuanto a los limos y arcillas, dadas las características de los ríos de la red, puede afirmarse que el transporte de los mismos se realiza como carga de lavado en todo el río Bermejo Superior. En estas condiciones la concentración de limos y arcillas queda determinada por la cantidad de estos materia-

les aportada a la corriente y no por la capacidad de ésta para transportarla.

Lo expresado indica que reducciones de las cantidades de sedimento fino aportadas, se reflejarían casi sin alteraciones a la salida de la cuenca, en la Junta de San Francisco. Si bien esto es cierto en teoría, en la práctica la situación es más compleja, entrando en juego otros factores, tales como cambios morfológicos, reincorporación de finos de las planicies inundables y de las márgenes, que hacen que exista una recuperación de materiales finos.

En el caso del Bermejo Superior, la disponibilidad de finos en el lecho resulta escasa (a partir de los análisis granulométricos efectuados), mientras que el aporte puede ser mayor desde las márgenes barrancosas del último tramo.

También se hace notar la falta de información básica específica, tal como se detallara en el caso del modelo del río San Francisco. Se recomienda en el futuro encaminar campañas de mediciones que permitan un mayor conocimiento de las características de los ríos de la Alta Cuenca del río Bermejo.

En este caso debe resaltarse que gran parte de la información básica imprescindible para la realización del presente estudio, fue relevada en el marco del PEA, a partir de campañas de mediciones realizadas en conjunto con las provincias involucradas en toda la cuenca del río Bermejo.

En el caso del modelo del río San Francisco, y en relación con lo antes expresado, se ha implementado el modelo prácticamente a partir de la información básica recopilada en el marco del PEA, con una marcada ausencia de datos existentes. Como ya se conocía, el total de información disponible resultó escaso para realizar un modelo del sistema que permitiera obtener resultados cuantitativos confiables.

El objetivo del estudio fue entonces conocer conceptualmente el funcionamiento morfológico de los ríos Lavayén, Grande y San Francisco, identificando a partir del mismo las necesidades mínimas de información básica, necesarias para llegar a mejores resultados. El modelo permitió definir cómo es el comportamiento actual del sistema, y cómo será su respuesta frente a alteraciones en la carga sólida aportada.

Es destacar en este caso que el modelo ANDES utilizado, fue especialmente desarrollado en el marco del PEA por el INA, con el asesoramiento del experto ing. Máximo Peviani.

A los fines de evaluar cómo se comporta el sistema ante una variación de la carga sólida aportada, se consideró una reducción del aporte sólido grueso en la sección de inicio del río Grande, del 30 % del aporte total. Los resultados obtenidos resultaron coincidentes a los observados en el río Bermejo Superior: la reducción del caudal sólido

analizada es recuperada casi en su totalidad en el mismo río Grande, y parte en el San Francisco, sin afectar al resto del sistema, esto es, sin variaciones en el aporte al río Bermejo Inferior en la Junta de San Francisco. Sobre lo materiales finos, también valen las mismas consideraciones que en el caso del Bermejo.

Se ha implementado el modelo morfológico del río Bermejo Inferior, desde la Junta de San Francisco hasta la Ruta N° 11, en la cercanía de las localidades de L.V. Mansilla (Formosa) y Colonia Vélaz (Chaco). Si bien dicho modelo fue desarrollado para otro proyecto del PEA (Análisis de la Dinámica Fluviomorfológica del Río Bermejo Inferior), sus resultados fueron aquí utilizados para el estudio del comportamiento del sistema.

Se ha identificado que el sistema en sus condiciones actuales parece encontrarse en equilibrio, desde el punto de vista del transporte sólido (Brea, J.D.; 1999). Como se expresara en el punto c.3) 2., se verificó una concordancia entre el aporte sólido en suspensión aportado al Bermejo Inferior desde la Alta Cuenca (Bermejo + San Francisco), y el transporte medido en El Colorado, cerca del final del tramo estudiado (unos 100 millones de toneladas anuales en cada caso).

Los escenarios de cambio en el aporte sólido al Bermejo Inferior en la Junta de San Francisco analizados fueron reducciones del aporte de arenas a un 70 % y un 30 % del actual. Como resultado se obtuvo que, en ambas condiciones, la recuperación de las arenas se produce rápidamente. Aguas abajo de la Junta de San Francisco, existe un amplio tramo de río anastomosado, en el que se produce el depósito de gran parte de las arenas transportadas en la situación actual, y de donde se recuperan las arenas en los escenarios de reducción analizadas.

Sobre los impactos de las reducciones de finos en la Alta Cuenca, en este caso las posibilidades de recuperación de limos es mayor en el Bermejo Inferior, debido a las características del lecho y márgenes de este río. También en este caso resulta imposible cuantificar dicha recuperación, lo que sólo podrá lograrse con mediciones de campo una vez efectivizadas obras de retención aguas arriba. Los balances del transporte sólido en suspensión en el sistema, ya presentados, estarían indicando la escasa significación de las recuperaciones de limos de lecho y márgenes.

Se estudió finalmente la influencia de la variación de la carga sedimentaria del río Bermejo en el Sistema Paraguay - Paraná - Delta - Río de la Plata. A tal fin se analizó globalmente el transporte de sedimentos y su evolución a lo largo de todo el sistema, teniendo como base la información básica hidrosedimentológica en todas las estaciones

disponibles de la red, así como los resultados de los estudios de la evolución morfológica del río Bermejo en toda su extensión. Se trabajó sobre el funcionamiento del sistema en la situación actual y con obras en la Alta Cuenca.

A partir del balance efectuado se obtuvieron conclusiones de interés. En primer lugar se observa que la suma del aporte del Bermejo Superior y del San Francisco resulta en la práctica coincidente con el correspondiente al Bermejo Inferior en El Colorado. Esta igualdad resulta de suma importancia pues permite confirmar los resultados obtenidos en el análisis de la dinámica fluviomorfológica del río Bermejo Inferior (Brea, J.D.; 1999), acerca de que parte del material ingresado en la Junta de San Francisco es depositado en el Bermejo Inferior, y es compensado con la erosión del lecho y márgenes del río en épocas de crecida, lo que da una equivalencia entre el material que entra y sale del sistema.

Analizando el nudo Paraguay - Paraná para el período de estudio (1969-89), se obtiene que el aporte del primero es el 94 % del total, y el del segundo el 6 % restante. En el porcentaje correspondiente al río Paraguay, el 87 % del total corresponde al Bermejo.

Comparando estos resultados con estudios antecedentes y otros cálculos efectuados en el presente informe, se observa un incremento de la incidencia del aporte del Bermejo en relación al total, a expensas del aporte del río Paraná Superior, lo que también en este caso coincide con lo indicado en las referencias citadas (Brea, J.D.; Busquets, M.S.; Spalletti, P.D.; 1996; Anderson, R.; da Franca Ribeiro, N.; Diaz, H.; 1993).

Es de resaltar la influencia que tiene el período de registros analizado en las cantidades de sedimentos aportados. A partir de la utilización de todos los registros de la serie de cada estación disponibles, el aporte del Bermejo resulta del orden de 90000000 t/año, mientras que para el período 1969-89, se obtiene un valor de casi 123000000 t/año. Se considera que entre estos órdenes de magnitud se encuentra el aporte anual del río Bermejo al sistema Paraguay - Paraná - Río de la Plata. Sobre la base del período 1969-89, puede considerarse que alrededor de 100 millones de toneladas anuales constituyen el aporte de fracción fina (fundamentalmente limos) del río Bermejo al sistema.

Sobre la incidencia de los sedimentos aportados por el Bermejo en la conformación del Delta del Paraná y Río de la Plata, se realizaron análisis a partir de la información básica disponible.

Entre las conclusiones obtenidas puede afirmarse que el volumen anual de arenas que ingresan al Delta del Paraná no será afectado por eventuales variaciones de aporte de dicho material del Bermejo al río Paraguay. Esto es así porque, como la capacidad de transporte de arenas del río Paraná es la correspondiente a la de saturación, en caso de producirse un déficit de aporte este será cubierto siempre por sólidos tomados del lecho del río. Además, el río Bermejo no produce un importante aporte de arenas al sistema (si de finos).

En cuanto al comportamiento de los finos, una reducción de la concentración de sedimentos de la carga de lavado del Paraná tendría el efecto de atenuar la velocidad de crecimiento del delta por deposición de limos. La tasa de avance del frente del Delta, que en la situación actual es del orden de 100 metros/año, resultará evidentemente afectada, siendo su reducción aproximadamente proporcional a la de la concentración de limos en las aguas del Paraná.

La complejidad del fenómeno de formación del Delta descrito en el informe, y la ausencia de datos específicos, impiden cuantificar con exactitud cada uno de los procesos en juego, y en consecuencia, la incidencia específica que tendrían reducciones del aporte de limos.

En base a los análisis efectuados sobre la sedimentación en el Río de la Plata, se concluyó que el Río de la Plata Superior es la zona de mayor actividad fluviomorfológica. Como consecuencia de una reducción del aporte de limos del Río Paraná es esperable también en este caso una reducción de la tasa de sedimentación, al igual que el Río de la Plata Exterior.

En base a la información recopilada, puede decirse que para el mantenimiento de los canales navegables del Río de la Plata resulta necesario remover aproximadamente 23 millones de toneladas de sedimento cada año, lo que representa, en términos globales, el 23 % del peso total de los sedimentos aportados por el Bermejo.

En términos prácticos esto significa que sería necesario retener una proporción de 10 toneladas anuales de material fino en el sistema del Bermejo para lograr una reducción de 2.3 toneladas de sedimento dragado en los canales navegables del Río de la Plata. A partir de esta proporción, pueden hacerse análisis de la influencia de distintas obras de control. A modo de ejemplo, puede decirse que la retención de finos generada por las presas proyectadas en la Alta Cuenca del Bermejo se reflejaría en una reducción del dragado de unos 3 millones de toneladas de sedimento en los canales navegables del Río de la Plata.

REFERENCIAS

- Adams J.; 1979. Gravel size analysis from photographs. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 105, No. HY10, pag 1247-1255.
- Agua y Energía Eléctrica; 1983. Estudio Sedimentológico del Sistema Iruya - Pescado. División Recursos Hídricos. Sedimentología fluvial.
- Agua y Energía Eléctrica; 1984. Análisis Cuantitativo de los Parámetros Geomorfológicos en la Cuenca del Río Iruya. División Recursos Hídricos. Sedimentología fluvial. B. Arenas.
- Agua y Energía Eléctrica, 1991. Estadística hidrológica hasta 1990. Tomo I: Fluiometría. Tomo II: Sedimentología. Nivología. Argentina.
- Agua y Energía Eléctrica; 1991. Relevamiento Angosto de San Isidro - Río Iruya: Etapa preparatoria. Informe preliminar.
- Amsler, M.; 1995. Carga de lavado del río Paraná en sus tramos medio e inferior.
- Amsler, M.; Drago, E.; Bertoli de Pomar, H.; 1984. Estudios limnológicos de una sección transversal del tramo medio del río Paraná. II: Características y variaciones temporales de la granometría de los sedimentos suspendidos. III: Componentes sólidos transportados en suspensión. *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*.
- Anderson, R.; da Franca Ribeiro, N.; Diaz, H.; 1993. An analysis of Flooding in the Paraná/Paraguay River Basin. The World Bank.
- Basile, P.; Bellos, C.; Peviani, M.A.; 1998. Morphodynamic mathematical model for non-uniform grain-size sediments: an application to the exceptional flood event of 1987 in the Malero river (Italy). *Journal of Hydraulic Research (IAHR)*.
- Blair, T., 1987. Sedimentary processes, vertical stratification sequences and geomorphology of the Roaring River alluvial fan, Rocky Mountain National Park, Colorado. *Journal of Sedimentary Petrology* 57: 1-18.
- Bombardelli, F.; Lapetina, M.; Menéndez, A.; Brea, J.D.; Uriburu Quirno, M.; 1996. Un modelo matemático en red de canales del Delta Bonaerense del Río Paraná. XVI Congreso Nacional del Agua. San Martín de los Andes.
- Bombardelli, F.; Menéndez, A.; Brea, J.D.; 1997. A mathematical model for the lower Paraná river delta. 3rd International Conference on River Flood Hydraulics. Stellenbosch, South Africa.
- Brea, J.D.; Busquets, M.S., 1999 (1). Generación y transporte de sedimentos en la Alta Cuenca del río Bermejo. Impacto en la Hidrovía, Delta del Paraná y Río de La Plata. Informe de Avance N° 1. Informe LHA-177-01-99. PEA-FMAM-OEA-PNUMA. INA. Ezeiza, Argentina. Brea, J.D.; Busquets, M.S., 1999 (2). Análisis de la dinámica fluiomorfológica del río Bermejo Inferior. Informe de Avance N° 1. Informe LHA-178-01-99. PEA-FMAM-OEA-PNUMA. INA. Ezeiza, Argentina.
- Brea, J.D.; Busquets, M.S.; Spalletti, P.D.; 1996. Estudio sedimentológico preliminar de la Cuenca Inferior del río Bermejo. Evaluación del impacto de las presas de la Alta Cuenca del río Bermejo en la morfología del tramo inferior. Informe LHA 131-01-96. INCYTH-COREBE.

Brea, J.D.; Busquets, M.; Spalletti, P.; Pérez Ayala, P.; 1996. Consideraciones sobre los sedimentos transportados por el río Bermejo. XVI Congreso Nacional del Agua. San Martín de los Andes.

Brea, J.D.; Loschacoff, C.S.; Spalletti, P.; Busquets, M.; Rafaelli, S.; 1998. Funcionamiento hidrosedimentológico del río Bermejo. Taller Regional sobre tópicos básicos y aplicados de la Hidráulica Fluvial. Santa Fe, Argentina.

Brea, J.D.; Spalletti P.; 1997. Producción de sedimentos en cuencas de ríos de montaña. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente - Laboratorio de Hidráulica y del Ambiente, Informe LHA 150-02-97.

Brea, J.D.; 1999. Análisis de la dinámica fluviomorfológica del río Bermejo Inferior. Informe Final. Informe LHA-178-02-99. PEA-FMAM-OEA-PNUMA. INA. Ezeiza, Argentina.

Brea, J.D.; Spalletti, P.D.; Spalletti, L.; Rafaelli, S.; 1999. Generación y transporte de sedimentos en la Alta Cuenca del río Bermejo. Impacto en la Hidrovía, Delta del Paraná y Río de La Plata. Producción de sedimentos en la Alta Cuenca del Río Bermejo. Informe LHA-177-02-99. INA. PEA-FMAM-OEA-PNUMA. Ezeiza, Argentina.

Bull, W.; 1972. Recognition of alluvial-fan deposits in the stratigraphic record. En Rigby, J. & Hamblin, M. (Eds.) Recognition of Ancient Sedimentary Environments. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 16: 63-83.

Busquets, M.; 1997. Modelación de la evolución morfológica de ríos de montaña. Informe LHA 150-02-97. Ezeiza, Argentina.

Cadore, Peviani, M.; Baldin, M.; 1994. Quantificazione del trasporto solido in bacini pilota mediante formule geomorfologiche. ISMES, Bérgamo, Italia.

Collinson, J.; 1996. Alluvial sediments. En Reading, H. (Ed.) Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy (3rd. Edition), Blackwell Science: 37-82.

Comisión Binacional para el Desarrollo de la Alta Cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija; 1998. Licitación Pública Nacional e Internacional. Concesión del Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento, Explotación y Administración de los Proyectos de Propósito Múltiple «Las Pavas», «Arrazayal», «Cambari» y «Camino Km. 19/Desemboque». Documentos producidos por la Unidad Técnica de Licitación.

CONCAP - IOVIF; 1972. Estudio de la Erosión Hídrica y Manejo de los Recursos Agua, Suelo y Vegetación en Áreas Piloto de la Cuenca del Río Iruya. Facultad de Agronomía. UNLP.

COREBE; 1992. Angosto de San Isidro. Cuenca del río Iruya. Prediseño de la Presa para Retención de Sedimentos. Informe Final.

COREBE; 1993. Aprovechamiento del Río Bermejo. Eje de la Integración. Una política en Marcha. Comisión regional del río Bermejo.

COREBE; 1998. Sistema de información hidrológica de la Cuenca del Río Bermejo. 1996-1998.

Culot, J.Ph.; Grubinger, H.; Schmid, W.A.; 1984; Erosión y transporte de sedimentos. Río Iruya. Informe Final, FAO-PNUD.

Denny, C.; 1967. Fans and pediments. American Journal of Science 265: 81-105.

Depetris, P.J.; 1968. Mineralogía de algunos sedimentos fluviales de la Cuenca del Río de la Plata. Revista de la Asociación Geológica Argentina. Tomo XXIII.

Diplas, P.; Sutherland, A.J.; 1988. Sampling techniques for gravel sized sediments. Journal of the Hydraulics Engineering - Vol. 114, n. 5, pag. 484-501.

Di Silvio, G.; Peviani, M.A.; 1989. Modelling Short- and Long-term Evolution of Mountain Rivers: an Application to the Torrent Mallero (Italy). Publicado en el International Workshop on Fluvial Hydraulics of Mountains Regions - Trento - Italia.

Di Silvio, G. and Peviani, M.; 1991. Transport of a mixture of sand and gravel in suspension and as bedload: Experiments and mathematical modelling. Symposium on «The transport of suspended sediments and its mathematical modelling», Florence. Italy.

Drago, E.; Amsler, M.; 1988. Suspended sediment at a cross section of the Middle Paraná River: concentration, granulometry and influence of the main tributaries. IAHS Publ. N° 174.

Ethridge, F.; 1985. Modern alluvial fans and fan deltas. En Recognition of Fluvial Depositional Systems and Their Source Potential. Lecture Notes Course 19, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists: 101-126.

EVARSA, 1994. Estadística hidrológica hasta 1994. Secretaría de Energía. Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos, Buenos Aires.

Ferreiro, Vicente; Abril 1983. El mapa hidrogeomorfológico. Su utilización en el estudio de los recursos hídricos superficiales en regiones con insuficiente información de base. La cuenca hídrica superficial del Río Bermejo. Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras, Olavarría.

Ferro, V., 1999; Modellistica matematica e verifica sperimentale dell'apporto distribuito dei processi di sediment delivery. La gestione dell'erosione. Scienza tecnica e strumenti a confronto per il controllo dei fenomeni torrentizi. Trento e Bolzano, Italia.

Gavrilovic S., 1959; Methode de la classification des bassins torrentiels et equations nouvelles pour le calcul des hautes eaux et du debit solide. Vado-privreda, Belgrado.

Gavrilovic Z., 1988; The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. Wallingford, England.

Gentile, F.; Puglisi, S.; Trisorio-Liuzzi, G., 1999; Verifica sperimentale di modelli empirici per la valutazione della perdita di suolo in un piccolo bacino molisano. La gestione dell'erosione. Scienza tecnica e strumenti a confronto per il controllo dei fenomeni torrentizi. Trento e Bolzano, Italia.

Guichón, M.; 1992. Informe Geológico - Geomorfológico vinculado al cierre el Angosto de San Isidro, Quebrada del río Iruya.

Halcrow & Partners, 1973. Estudio de navegabilidad del río Paraguay al sur de Asunción. Volumen II: Estudios hidráulicos e hidrológicos.

Halcrow & Partners, 1994. Estudio de regulación del valle aluvial de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay para el control de las inundaciones. Informe Final.

Harrington, H., 1946. Las corrientes de barro (mud-flows) de «El Volcán», quebrada de Humahuaca, Jujuy. Sociedad Geológica Argentina Revista I: 149-166.

HIDROPROYECTOS S.A., CONSASRL Consultores Asociados, Consultoría Oscar Grimaux y asoc. SAT, 1995. Estudios de Factibilidad para el Aprovechamiento de los Recursos Hídricos de la Alta Cuenca del Río Bermejo y del Río Grande de Tarija. Informe final, Fase 1.

Hidroproyect - Servingen S.A.; 1992. Prediseño de la Presa para Retención de Sedimentos (Variante con presa de voladura).

Hooke, R., 1967. Processes on arid-region alluvial fans. Journal of Geology 75: 438-460.

Hopwood, H.; Menéndez, A.; Chividini, M.; Cavaliere, M.; Brea, J.D.; 1991. Informe de diagnóstico sobre navegación en la Ruta Rosario-Océano. Informe LHA-114-0-91.

INCyTH, 1991. Estudio de prefactibilidad Navegación de Ultramar Ruta Rosario - Océano. Informe INCyTH - LHA, 114-02-91.

INCy TH - COREBE; 1994. Determinación de las alteraciones en los hidrogramas del Río Bermejo como consecuencia de la operación de los aprovechamientos de la Alta Cuenca de los ríos Bermejo y Grande de Tarija.

IOVIF; 1975. Estudio de la Erosión Hídrica y Manejo de los Recursos Agua, Suelo y Vegetación en Áreas Piloto de la Cuenca del Río Iruya. Tomo D, Aspectos del uso de la tierra. UNLP.

Konzewitsch, Nicolás; 1958. Cantos rodados y material en suspensión de los Ríos Bermejo, Pescado e Iruya. Agua y Energía Eléctrica..

Lopardo, Raúl A.; 1995. Algunas observaciones sobre elementos hidráulicos del Río Pescado en Abra Grande. INCy TH. Ezeiza.

Manfredi, J; 1959. Reconocimiento Geológico Preliminar en la Zona del Río Iruya hasta la Confluencia de los Ríos Cañas y Astilleros. Comisión Nacional del río Bermejo.

Mazzoni, M., 1986. Procesos y depósitos piroclásticos. Asociación Geológica Argentina, Serie B Didáctica y Complementaria 14, 115 pp.

Mazzoni, M. & Spalletti, L., 1972. Sedimentología de las arenas del río Grande de Jujuy. Revista Museo de La Plata, nueva serie, Geología VIII: 35-117.

Nemec, W. & Postma, G., 1993. Quaternary alluvial fans in southwestern Crete: sedimentation processes and geomorphic evolution. En Marzo, M. & Puigdefabregas, C. (Eds.) Alluvial Sedimentation. Special Publication International Association of Sedimentologists: 235-276.

O.E.A., 1973. Estudios de los recursos hídricos de la Alta Cuenca del Río Bermejo y programación para su desarrollo. Departamento de desarrollo regional de O.E.A. Washington D.C., U.S.A.

O.E.A., 1975. Estudio de la Cuenca Inferior del Río Bermejo y programación para su desarrollo. Departamento de desarrollo regional de O.E.A. Washington D.C., U.S.A.

Orfeo, O.; 1995. Sedimentología del río Paraná en el área de su confluencia con el río Paraguay. Tesis doctoral.

Pérez, Antelo; 1989. Migraciones Temporarias en el Área del Río Iruya. El Bermejo y el país. Revista trimestral de COREBE, Salta.

Pérez Ayala, F.; Bignone, R.; Bazán, J.M.; 1994. Sistema de información hidrológica de la Cuenca del Río Bermejo. Anuario 1993-1994. COREBE.

Pérez Ayala, F.; Rafaelli, S.; Brea, J.D.; Peviani, M.; 1998. Programa de Manejo Integrado de la Cuenca del Río Iruya. Metodología para su Desarrollo. XVII Congreso Nacional del Agua. II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Santa Fe. Argentina.

Peviani, M.; 1993. Long Term Evolution of Mountain Streams: Influence of Hydrological and Sediment Feeding Fluctuations. International Conference on Hydrosience and Engineering. Washington D.C.

Peviani, M.A.; 1994. Un Sistema Integrado para Manejo de Cuencas y Análisis de Intervención Antrópica. Publicado en el XVI Congreso Latinoame-

ricano de Hidráulica, Santiago, Chile.

Peviani, M.; 1999. Modelo Morfológico del río Bermejo Superior. PEA-FMAM-OEA-PNUMA. Bér-gamo, Italia.

Peviani, M.; Baldin, M.; Crepaldi L.; 1994. Application of a sediment yield model to an East Alpine Basin. *Man and Mountain* '94. Ponte di Legno (BS), Italia.

Peviani, M.A.; Basile, P.; 2000. Transporte de sedimentos en ríos con lechos de granulometría ex-tendidas. A ser presentado en el XIX IAHR Latin - American Congress, Córdoba, Argentina.

Peviani, M.A.; Carrara, A.; 1990. The Extreme Load Floods on the Mallerio Basin: a Geomorphologi-cal and Hydraulic Approach. Publicado en el International Conference on Water Resources in Moun-tainous Regions, Lausanne - Lausanne - Suiza.

Peviani, M.A.; Rafaelli, S.; 1994. Cambios Morfológicos y Sedimentológicos del Álveo durante Even-tos de Crecida. Publicado en el XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile.

Polanski, J.; 1966. Flujos rápidos de escombros rocosos en zonas áridas y volcánicas. *Manuales de EUDEBA*, 67 pp.

Rafaelli, S.; Pérez Ayala, F.; 1999. Programa de Manejo Integrado de la Cuenca del Río Iruya. COREBE.

Rafaelli, S.; Peviani, M.; Brea, J.D.; 1996. Programa Estratégico de Acción en la Cuenca del Río Ber-mejo. Plan de manejo integrado de la Cuenca del Río Iruya.

Rafaelli, S.; Peviani, M.A.; Pérez Ayala, F.; 1998. Estudio de producción de sedimentos en la cuenca montañosa del río Iruya (Argentina). Presentado en el XVIII IAHR Latin -American Congress, Oaxa-ca, México.

Siegel, F.; Pierce, J.; Urien, C.; Stone Jr., I.; 1968. Clay Mineralogy in the Estuary of the Río de la Plata, South America. XXIII International Geological Congress. Vol II.

Spalletti, L.; 1972. Sedimentología de los cenoglomerados de Volcán, provincia de Jujuy. *Revista Museo de La Plata, nueva serie, Geología VIII*: 137-225.

Spalletti, L.; 1980. Paleoaambientes sedimentarios en secuencias silicoclásticas. *Asociación Geoló-gica Argentina, Serie B Didáctica y Complementaria* 8, 175 pp.

Spalletti, P.; Brea J.D.; 1998; Producción de sedimentos en cuencas de ríos de montaña. XVIII Con-greso Latinoamericano de Hidráulica, Oaxaca, México.

Taylor-Golder-Consular-Connal, 1996. Evaluación del Impacto Ambiental del Mejoramiento de la Hidrovía Paraguay-Paraná. Diagnóstico Integrado Preliminar. UNOPS/PNUD/BID/CIH. UNITAR, 1995; *Explorations in Geographic Information Systems Technology. Volume 5. GIS and Mountain En-vironments*.

Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, 1995. Estudio de las con-diciones de navegabilidad de los ríos Paraná y Paraguay, al norte de Santa Fe en territorio argentino.

Vanoni, V.; 1975. *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice-No. 54. New York.

Van Rijn, L.; 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and costal seas. Aqua Publications.Amsterdam. The Netherlands.

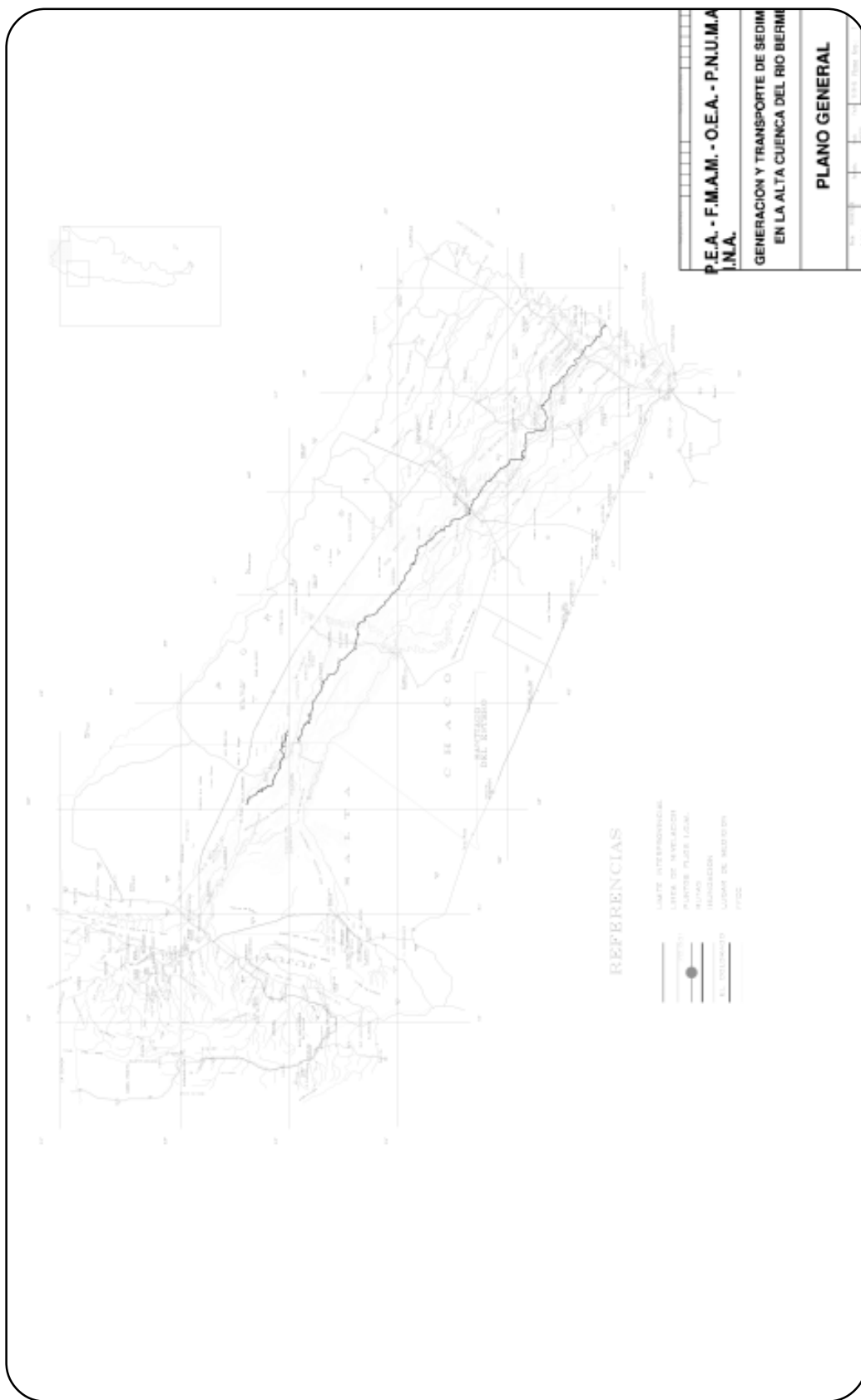
Viera y Menéndez Consultores, 1981; Estudio geológico - geomorfológico y de vegetación de los ríos Nazareno, Iruya e Izcuya en la Provincia de Salta.

Viera, O. y Menéndez, M.; 1982. Mapas Informe Geológico, Geomorfológico y de Vegetación de las Subcuencas de los Ríos Nazareno, Iruya, Izcuya. Comité de Cuenca Hídrica del río Bermejo.

Zemljic M.; 1971; Calcul du debit solide - Evaluation de la vegetation comme un des facteurs antie-rosif. International Symposium Interpraevent, Villach, Austria.

ÍNDICE DE PLANOS

Plano N° 1:	Plano General - Cuenca del río Bermejo.
Plano N° 2:	Alta Cuenca del río Bermejo.
Plano N° 3:	Imagen General de la cuenca Alta del río Bermejo.
Plano N° 4:	Ubicación de las secciones transversales - Río Grande - Lavayén - San Francisco (modelo ANDES).



37°

60°

62°

64°

35°

33°

31°

29°

27°



0 50 100 Km
ESCALA GRAFICA

REFERENCIAS

- LÍNEA INTERNACIONAL
 LÍMITE DE PROVINCIAS
 ESTACIÓN HIDROGRÁFICA
 ESTACIÓN HIDROGRÁFICA

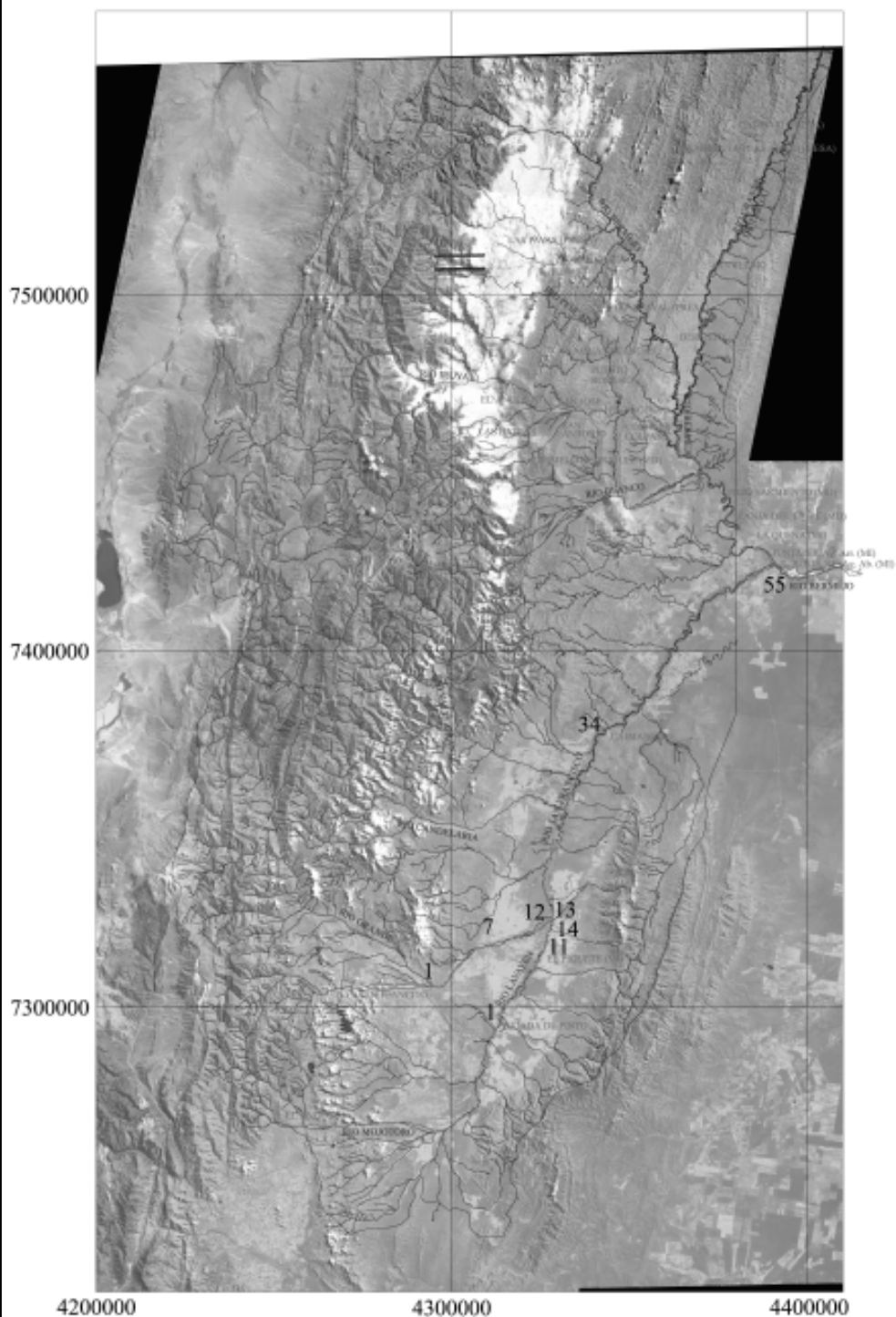
EST. N°	NOMBRE
1	ACHRALES
2	AGUAS BLANCAS
3	ALARACHE
4	ARRAZAYAL (PRESA)
5	BALAPUGA
6	BERMEJO
7	CAMBARI (AGUAS ABAJO PRESA)
8	PANPA GRANDE
9	CAMBARI (PRESA)
10	CHIGUACA
11	CONCHAS
12	EL ANOSTO
13	LAS PAÑAS (PRESA)
14	LIPED
15	SAJUNAS
16	SAN TELMO
17	TARJA
18	CUATRO CEDROS
19	SAN JOSÉ
20	POZO SARMENTO
21	CAMANCITO
22	SAN JUANITO
23	BAJADA DE PINTO

Generación y transporte de sedimentos

CUENCA ALTA DEL RÍO BERMEJO

PLANO N°

IMAGEN GENERAL DE LA CUENCA



Plano N° 3



Plano N° 4: Ubicación de las secciones transversales - Rio Grande - Lavayén - San Francisco.

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía N°1:	nacientes del río Bermejo (Bolivia).
Fotografía N°2:	río Bermejo en Alarache.
Fotografía N°3:	río Bermejo en Balapuca.
Fotografía N°4:	río Bermejo en Aguas Blancas.
Fotografía N°5:	río Grande de Tarija, aguas arriba de Junta de San Antonio.
Fotografía N°6:	río Bermejo en finca C. Rodríguez.
Fotografía N°7:	río Bermejo en zona «Chanco Frito».
Fotografía N°8:	río Bermejo en Pozo Sarmiento.
Fotografía N°9:	río Bermejo en Pozo Sarmiento.
Fotografía N°10:	río Bermejo en Zanja del Tigre.
Fotografía N°11:	río Bermejo en puente RN N° 34.



Generación y transporte de sedimentos



Foto n° 2

/Foto n° 3





Generación y transporte de sedimentos



Foto n° 5

/Foto n° 6



Foto n° 7



Generación y transporte de sedimentos

Foto nº 8



Foto n° 9



Generación y transporte de sedimentos

Foto n° 10



Foto n° 11



Generación y transporte de sedimentos

Este libro fue editado durante los meses de abril y mayo del 2000, en la ciudad de Buenos Aires de la República Argentina.
Se utilizaron las familias tipográficas Tarzana™ y Filosofía™ de Emigre Fonts.

diseñoibáñez: Felipe Augusto Ibáñez (dirección de diseño y arte), Valeria Safatle y Luciana Rondolini (compaginación).

fin



Comisión Binacional para el Desarrollo de la
Alta Cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija
www.cbbermejo.org.ar

Fondo para el Medio Ambiente Mundial
www.gef.org

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
www.unep.org

Organización de los Estados Americanos
www.oas.org

