



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“ESTIMACIÓN DE CURVAS DE SÓLIDO EN
SUSPENSIÓN Y COMPARACIÓN CON EXPRESIONES
EMPÍRICAS DE FLEMING; DENDY Y BOLTON”

Por

Mariela Paz Vicencio Pérez

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y título de Ingeniero Civil

Prof. Guía Pedro Kamann Chacana

Julio, 2012

Vamos que se puede!!!

Agradecimientos

Quiero agradecer sinceramente:

A mis papas, Liliam y Julio, las dos más grandes personas que me han apoyado y entregado su cariño a lo largo de mi vida. Ellos son los responsables de este logro, dándome siempre su apoyo y comprensión. Gracias eternas para ellos.

Al profesor Pedro Kamann, por ser mi profesor guía. Gracias por todo el tiempo puesto en este estudio, la confianza, las excelentes ideas y buena onda.

A Leandro, Kako, Lau, Diego, Ale, Cristian y tantos otros más, que espero me disculpen si se quedan en el tintero. Por representar parte de los mejores años de mi vida. Entregando su amistad, apoyo, relajo, buena onda o lo que tuvieran a mano, por hacer de estos años de universidad, un buen momento.

A mis amigas Isa, Dani, Sandra, Fran, Pao. Por creer en mi incondicionalmente y entregar su apoyo, amistad y comprensión en todos estos años.

A mi hermano, tíos, primos, abuelitas a todos por apoyarme siempre en las buenas y en las malas, todos aportaron con un granito de arena para poder lograr la meta.

Finalmente, quiero agradecer a todos los profesores que tuve a lo largo de este camino, por la entrega de sus conocimientos y hacer de mi persona un profesional.

Índice

Ítem	pág.
Glosario	6
Lista de abreviaturas o siglas.....	7
Lista de símbolos.....	8
Lista de Figuras	9
Lista de Tabla	13
Resumen de la memoria.....	15
1. Introducción	17
2. Planteamiento del problema	18
3. Objetivos.....	19
3.1.- General.....	19
3.2.- Específicos.....	19
4. Alcances de la investigación.....	20
5. Marco teórico	21
5.1.- Sedimentos	21
5.2.- El proceso de erosión	22
5.2.1.- Factores que controlan la erosión.....	24
5.3.- Sedimentos en suspensión y arrastre de fondo.....	25
5.4.- Medición del transporte de sedimentos	25
5.5.- Curvas de gasto sólido en suspensión diario	27
5.6.- Curva de duración de caudales	27
5.7.- Curvas de Gasto Sólido en Suspensión medio anual	29
6. Metodología	31
6.1.- Arrastre de sedimentos en suspensión.....	31
7. Obtención de relaciones caudal sólido v/s caudal líquido.	34
7.1 Análisis de estaciones	34
7.1.1 Estación Río Lluta en Tocontasi	34
7.1.2 Estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana.....	41
7.1.3 Estación Río Loa antes Represa Lequena	44
7.1.4 Estación Río Salado en Sifón Ayquina	47
7.1.5 Estación Río Huasco en Algodones.....	50

7.1.6 Estación Río Jorquera en Vertedero	53
7.1.8 Estación Río Choapa en Cuncumén	59
7.1.9 Estación Río Choapa en Salamanca	62
7.1.10 Estación Río Cogotí entrada Embalse Cogotí	65
7.1.11 Estación Río Grande en Puntilla San Juan	68
7.1.12 Estación Río Hurtado en Angostura de Pangué	71
7.1.13 Estación Río Turbio en Varillar.	74
7.1.14 Estación Río Blanco en río Blanco	77
7.1.15 Estación Río Putaendo en Resguardo los Patos	80
7.1.16 Estación Río Aconcagua en Chacabuquito	83
7.1.17 Estación Río Colorado antes Junta río Maipo.	86
7.1.18 Estación Río Maipo en el Manzano	89
7.1.19 Estación Río Mapocho en los Almendros	92
7.1.20 Estación Río Mapocho Rinconada de Maipú	95
7.1.21 Estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo.	98
7.1.22 Estación Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes.....	101
7.1.23 Estación Río Tinguiririca Bajo los Briones	104
7.1.24 Estación Río Loncomilla en las Brisas.	107
7.1.25 Estación Río Teno después de junta con Claro	110
7.1.26 Estación Río Ñuble en San Fabián	113
8. Análisis y comparación con expresiones empíricas.....	118
8.1 Análisis y comparación de gasto sólido en suspensión medido con curvas de Fleming.	118
8.2 Análisis y comparación de gasto sólido en suspensión medido con método Dendy y Bolton.....	123
9. Proposición de modelos.	126
9.1 Ajuste de modelos tipo Fleming	126
9.2 Ajuste de modelos tipo Dendy y Bolton.	133
9.3 Modelo de gasto sólido específico para cuencas chilenas.....	136
10. Conclusiones.....	143
11. Referencias bibliográficas.....	145

Anexo 1: Relación Muestreos Rutinario y Muestreo Integrado.

Anexo 2: Tablas - Curvas de Duración de caudales; Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual y Caudal Medio Anual.

Anexo 3: Curva de Duración de Caudales.

Anexo 4: Gastos sólido en suspensión teóricos y errores.

Anexo 5: Dendy y Bolton 1976.

Glosario

Prognosis: Conocimiento anticipado del acaecimiento de un hecho.

Escorrentía: Agua de lluvia que discurre por un terreno.

Sedimentométrica: estadística de sedimentos.

Hidrogeológica: relación entre la geología y las aguas subterráneas.

Correlación: relación recíproca entre dos o más cosas, ideas, personas, datos, etc.

Aforado: Medir la cantidad de agua que lleva una corriente.

Pluviométrica: estadística de precipitaciones.

Adimensional: toda aquella magnitud que carece de una magnitud física asociada.

Lista de abreviaturas o siglas

Fig. = Figura.

Pág. = Página.

D.G.A = Dirección General de Agua.

D.O.H = Dirección de Obras Hidráulicas.

M.O.P = Ministerio de Obras Públicas.

G_{sd} = Gasto sólido en suspensión medio diario (ton/día).

Q_d = Caudal medios diarios (m^3/s).

G_{sma} = Gasto sólido en suspensión medio anual (ton/año).

Q_{ma} = Caudal medio anual (m^3/s).

g_{sma} = Gasto sólido en suspensión específico medio anual (ton/ $km^2/año$)

q_{ma} = Caudal medio anual específico ($m^3/km^2/s$)

C_i = Concentración muestreo integrado (mg/l).

C_r = Concentración muestreo rutinario (mg/l).

C = Concentración medida en (mg/l).

S_R = Gasto sólido en suspensión medio anual referencial de 635 en ton/ $km^2/año$.

Q_R = Escorrentía media anual referencial de 50,8 en mm/año.

A_R = Área de drenaje de cuenca referencial de 2,59 en Km^2 .

S = Volumen de sedimentos producidos en ton/ $km^2/año$.

Q = Escorrentía media anual en mm/año.

A = Área de drenaje de cuenca en Km^2 .

T = Segundo en un día.

Log-log = logaritmo-logaritmo.

mm = milímetros.

Kms = Kilómetros.

Km^2 = Kilómetros cuadrados.

Ton = Toneladas.

m^3/s = metros cúbicos por segundos.

mg/l = miligramos por litro.

l/s = litros por segundo.

Ton/día = toneladas en un día.



Ton/año = toneladas en un año.

mm/año = milímetros en un año.

Prob. = Probabilidad.

Ln = Logaritmo natural.

Lista de símbolos

-  Ubicación de la estación.
- Δ Diferencia entre valores.
- % Porcentaje.
-  Ubicación de ciudades.

Lista de Figuras

Figura 5.1- Muestreador de sedimentos de bombeo manual sostenido por cable (Hydraulics Research 1990)	22
Figura 5.2- Transporte colina-abajo de las partículas de suelo por impacto de la lluvia [5].	23
Figura 5.3 - Perfil típico de una cárcava [5].	23
Figura 5.4 - Perfil río, fuente [6].....	24
Figura 5.5 - Toma muestras manual integrador de profundidad DH-48 para uso en cauces pequeños.	26
Figura 5.6 - Curva de gasto de sedimentos para el río Powder en Arvada, Wyoming, Estados Unidos.....	27
Figura 5.7 - Curva de duración.....	28
Figura 7.1 - Ubicación de estación río Lluta en Tocontasi.	34
Figura 7.2 - Relación entre concentraciones obtenidas de muestreos integrales y rutinarios en la estación Lluta en Tocontasi.	36
Figura 7.3 - Relación Gasto sólido en suspensión y caudal medio diario de Lluta en Tocontasi.	37
Figura 7.4 - Curva de duración de caudales medio diarios de la Estación Río Lluta en Tocontasi.	39
Figura 7.5 – Ubicación estación Q. Tarapacá en Laonsana	41
Figura 7.6 - Modelo de curva sólido en suspensión de la estación Q. Tarapacá en Laonsana.	43
Figura 7.7 - Ubicación estación río Loa antes represa en Lequena.	44
Figura 7.8 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Loa antes Represa Lequena.	46
Figura 7.9 – Ubicación río Salado en Sifón Ayquina.	47
Figura 7.10 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Salado en Sifón Ayquina.....	49
Figura 7.11- Ubicación estación río Huasco en Algodones.....	50
Figura 7.12 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Huasco en Algodones.	52
Figura 7.15 - Ubicación estación río Jorquera en Vertedero.	53
Figura 7.16 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Jorquera en Vertedero.....	55
Figura 7.17 - Ubicación estación río Pulido en Vertedero.....	56

Figura 7.18 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Pulido en Vertedero.....	58
Figura 7.19 - Ubicación estación río Choapa en Cuncumén.	59
Figura 7.20 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Choapa en Cuncumén.	61
Figura 7.21 - Ubicación estación río Choapa en Salamanca.	62
Figura 7.22 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Choapa en Salamanca.	64
Figura 7.23 – Ubicación río Cogotí entrada Embalse Cogotí.	65
Figura 7.24 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Cogotí entrada Embalse Cogotí.	67
Figura 7.25 – Ubicación estación Grande en Puntilla San Juan.	68
Figura 7.26 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Grande en Puntilla San Juan.	70
Figura 7.27 – Ubicación estación Río Hurtado en Angostura de Pangué.....	71
Figura 7.28 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Hurtado en Angostura de Pangué.....	73
Figura 7.29 - Ubicación estación río Turbio en Varillar	74
Figura 7.30 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Turbio en Varillar.	76
Figura 7.31 – Ubicación estación Río Blanco en río Blanco	77
Figura 7.32 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Blanco en río Blanco.....	79
Figura 7.33 - Ubicación estación río Putaendo en Resguardo Los Patos.	80
Figura 7.34 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Putaendo en Resguardo los Patos.....	82
Figura 7.35 – Ubicación estación Río Aconcagua en Chacabuquito.....	83
Figura 7.36 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Aconcagua en Chacabuquito.....	85
Figura 7.37 - Ubicación estación río Colorado antes Junta río Maipo.	86
Figura 7.38 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Colorado antes Junta río Maipo.	88
Figura 7.39 - Ubicación estación río Maipo en el Manzano.....	89
Figura 7.40 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Maipo en el Manzano.	91
Figura 7.41 - Ubicación estación Río Mapocho en los Almendros	92

Figura 7.42 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Mapocho en los Almendros.	94
Figura 7.43 - Ubicación estación Río Mapocho Rinconada de Maipú.	95
Figura 7.44 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Mapocho Rinconada de Maipú.	97
Figura 7.45 - Ubicación estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo.	98
Figura 7.46 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo.	100
Figura 7.47 - Ubicación estación río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes.	101
Figura 7.48 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes.	103
Figura 7.49 - Ubicación estación Río Tinguiririca Bajo los Briones.	104
Figura 7.50 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Tinguiririca Bajo los Briones.	106
Figura 7.51 - Ubicación estación Río Loncomilla en las Brisas.	107
Figura 7.52 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Loncomilla en las Brisas.	109
Figura 7.53 – Ubicación estación río Teno después de junta con Claro.	110
Figura 7.54 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Teno después de junta con Claro.	112
Figura 7.55 - Ubicación estación río Ñuble en San Fabián.	113
Figura 7.56 - Relación Gasto sólido en suspensión y caudal medio diario de Río Ñuble en San Fabián.	115
Figura 8.1 - Curva de gasto sólido en suspensión media anual diferenciando zonas.	118
Figura 8.2 - Curvas de gasto sólido en suspensión medio anual medida y empírica de Fleming.	121
Figura 8.3 - Relación gasto sólido en suspensión medidos y curva n° 3 Fleming.	122
Figura 8.4 - Relación gasto sólido en suspensión medidos y curva n° 4 Fleming.	123
Figura 8.5 - Curvas de gasto sólido en suspensión por unidad de área y método Dendy y Bolton.	124
Figura 8.6 - Relación gasto sólido en suspensión medido y método Dendy y Bolton.	125
Figura 9.1 - Relación gasto sólido en suspensión media anual medido tipo Fleming.	126
Figura 9.2 - Relación gasto sólido en suspensión medido tipo Fleming.	127
Figura 9.3 - Relación gasto sólido en suspensión medido y modelo propuesto.	129
Figura 9.4 - Relación gasto sólido en suspensión media anual zona Norte-Centro.	131

Figura 9.5 - Relación gasto sólido en suspensión medido Zona Norte-Centro y modelo ajustado.	133
Figura 9.6 - Relación gasto sólido en suspensión media anual medido y modelo tipo Dendy y Bolton.	134
Figura 9.7 - Relación gasto sólido en suspensión medido y modelo propuesto tipo Dendy y Bolton.	135
Figura 9.8 - Relación gasto sólido en suspensión medio anual específico medido.	136
Figura 9.9 - Relación gasto sólido en suspensión medio anual específico medido.	137
Figura 9.10 - Relación gasto sólido en suspensión específico medido y modelo propuesto gasto sólido específico.	139
Figura 9.11 - Gasto sólido en suspensión medio anual específico Zona Norte-Centro	140
Figura 9.12 - Relación gasto sólido en suspensión específico medido y modelo propuesto gasto sólido en suspensión específico.....	142

Lista de Tabla

Tabla 5.1 - Valores de a y n en la ecuación (5.1) para varios tipos de cobertura.	29
Tabla 7.1 - Registros sedimentométricos Lluta en Tocontasi.	35
Tabla 7.2- Curva de Duración de Caudales de la Estación Río Lluta en Tocontasi, Cálculo del promedio anual del Gasto Sólido en Suspensión.....	38
Tabla 7.3 - Curva de Duración de Caudales de la Estación Río Lluta en Tocontasi, Calculo Caudal Medio Anual.	40
Tabla 7.4 - Registros sedimentométricos Q. Tarapacá en Laonsana	42
Tabla 7.5 - Registros sedimentométricos Río Loa antes Represa Lequena	45
Tabla 7.6 - Registros sedimentométricos Río Salado en Sifón Ayquina.....	48
Tabla 7.7 - Registro sedimentométricos disponibles Río Huasco en Algodones	51
Tabla 7.9 - Registros sedimentométricos Río Jorquera en Vertedero.....	54
Tabla 7.10 - Registros sedimentométricos Río Pulido en Vertedero.....	57
Tabla 7.11 - Registro sedimentométricos disponibles Río Choapa en Cuncumen.	60
Tabla 7.12 - Registro sedimentométricos disponibles Río Choapa en Salamanca.	63
Tabla 7.13 - Registros sedimentométricos Río Cogotí entrada Embalse Cogotí.	66
Tabla 7.14 - Registros sedimentométricos Río Grande en Puntilla San Juan.....	69
Tabla 7.15 - Registro sedimentométricos disponibles Río Hurtado en Angostura de Pangué. ...	72
Tabla 7.16 - Registros sedimentométricos Río Turbio en Varillar.....	75
Tabla 7.17- Registro sedimentométricos disponibles Río Blanco en río Blanco.	78
Tabla 7.18 - Registros sedimentométricos río Putaendo en Resguardo Los Patos.....	81
Tabla 7.19 - Registros sedimentométricos Río Aconcagua en Chacabuquito.	84
Tabla 7.20 - Registros sedimentométricos río Colorado antes Junta río Maipo.	87
Tabla 7.21 - Registros sedimentométricos río Maipo en el Manzano.....	90
Tabla 7.22 - Registro sedimentométricos disponibles Río Mapocho en los Almendros.	93
Tabla 7.23 Registro sedimentométricos disponibles Río Mapocho Rinconada de Maipú.	96
Tabla 7.24 - Registros sedimentométricos Estero Chimbarongo en Convento Viejo.....	99
Tabla 7.25 - Registros sedimentométricos Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes. 102	
Tabla 7.26 - Registro sedimentométricos disponibles Río Tinguiririca Bajo los Briones.	105
Tabla 7.27 - Registros sedimentométricos Río Loncomilla en las Brisas.	108
Tabla 7.28 - Registros sedimentométricos río Teno después de junta con Claro.	111
Tabla 7.29 - Registros sedimentométricos disponibles río Ñuble en San Fabián.....	114

Tabla 7.30 - Resumen de resultados de cada estación.....	116
Tabla 7.31 - Resumen de resultados de cada estación. Continuación.....	117
Tabla 8.1 – Estaciones enumeradas.....	119
Tabla 8.2 - Parámetros para distintas coberturas.	120
Tabla 8.3 - Resultados de errores cuadráticos Fleming 3 y 4	122
Tabla 8.4 - Resultados de errores relativos Fleming 3 y 4.....	122
Tabla 8.5 - Resultado de error cuadrático del método Dendy y Bolton.	125
Tabla 8.6 - Resultado de error relativo del método Dendy y Bolton.	125
Tabla 9.1 - Resultados de errores cuadráticos modelo ajustado tipo Fleming.	128
Tabla 9.2 - Resultados de errores relativos modelo ajustado tipo Fleming.	128
Tabla 9.3 - Resultados de errores cuadráticos modelo ajustado tipo Fleming Zona Norte-Centro.	132
Tabla 9.4 - Resultados de errores relativos modelo ajustado tipo Fleming Zona Norte-Centro.	132
Tabla 9.5 - Resultados de errores cuadráticos modelo propuesto gasto sólido específico.	138
Tabla 9.6 - Resultados de errores relativos modelo propuesto gasto sólido específico.....	138
Tabla 9.7 - Resultados de errores cuadráticos modelo propuesto gasto sólido en suspensión específico Zona Norte-Centro.	141
Tabla 9.8 - Resultados de errores relativos modelo propuesto gasto sólido en suspensión específico Zona Norte-Centro.	141

Resumen de la memoria

Los sedimentos que arrastra o transporta un cauce de río requieren del estudio, pues una gran gama de obras hidráulicas, como canales, abovedamientos de quebradas, bocatomas y principalmente embalses, necesitan de dichos estudios, pues es un factor determinante para el cálculo de volumen muerto de estas. El objetivo principal del presente trabajo de título es obtener un mayor conocimiento de las curvas de gasto sólido en suspensión medio anual en las cuencas chilenas. El estudio se basa en la recopilación de los datos de sedimento y caudal de distintas estaciones seleccionadas desde la Decimaquinta región de Arica y Parinacota hasta la Octava región del Bío-Bío, determinando las curvas de gasto sólido en suspensión medio diario de cada una de ellas, para luego integrar la curva de duración de caudales, consiguiendo el gasto sólido en suspensión y caudal medio anual de cada una de las estaciones.

El estudio se basa en comparar los resultados obtenidos de las estaciones con dos métodos empíricos que se utilizan para la estimación de gasto sólido en suspensión medio anual en cuencas cuando no existe información sedimentométrica, la primera de estas son las curvas de Fleming, teoría que se basa en el estudio de 250 cuencas alrededor del mundo, donde distingue cuatro curvas, modelos que dependen del caudal medio anual de la cuenca, diferenciándose por el tipo de cobertura vegetal de esta. El segundo método empírico es el de Dendy y Bolton, cuya teoría se basa en el estudio de 800 cuencas de Estados Unidos de Norteamérica, el cual relaciona el gasto sólido en suspensión medio anual por unidad de área con la escorrentía media anual y el área de drenaje de la cuenca.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la comparación entre las expresiones empíricas y los datos medios en las cuencas chilenas en estudio, se ajustaron tres modelos distintos tipo Fleming, tipo Dendy y Bolton, y Gasto Sólido Específico; debido a que los métodos empíricos estudiados no son representativos de las estaciones seleccionadas. El objetivo de los modelos propuestos es proporcionar el gasto sólido en suspensión medio anual en cuencas donde no existe información.

Expresiones de modelos ajustados.

- Modelo tipo Fleming

$$G_{sma} = 11.384 Q_{ma}^{0,986} \text{ (ton/año)}$$

Con un error cuadrático de 216.422 (ton/año) y error relativo de 41,6 %, por lo tanto para minimizar el error se clasifico en dos zonas según la cobertura vegetal de la cuenca, obteniendo el siguiente modelo para la zona Centro-Norte:

- Modelo tipo Fleming zona Centro-Norte

$$G_{sma} = 8.728 Q_{ma}^{1,167} \text{ (ton/año)}$$

Con un error cuadrático de 156.702 (ton/año) y error relativo de 38,3%.

- Modelos tipo Dendy y Bolton

Para una escorrentía menor a 50,8 mm:

$$\frac{S}{S_R} = 1,23 \left(\frac{Q}{Q_R} \right)^{0,72} \times \left(0,088 - 0,023 \log \left(\frac{A}{A_R} \right) \right) \quad (\text{ton/km}^2/\text{año})$$

Para una escorrentía igual o mayor a 50,8 mm:

$$\frac{S}{S_R} = 1,19 e^{(0,019 Q/Q_R)} \times \left(1,42 + 0,35 \log \left(\frac{A}{A_R} \right) \right) \quad (\text{ton/km}^2/\text{año})$$

Con un error cuadrático de 215.016(ton/año) y error relativo de 41,3%.

- Modelo gasto sólido específico

$$g_{sma} = 7.821,1 q_{ma}^{0,935} \quad (\text{ton/Km}^2/\text{año})$$

Con un error cuadrático de 216.157 (ton/año) y error relativo de 41,6%.

- Modelo gasto sólido específico zona Centro-Norte

$$G_{sma} = 19.419 Q_{ma}^{1,072} \quad (\text{ton/Km}^2/\text{año})$$

Con un error cuadrático de 198.215 (ton/año) y error relativo de 38,1%.

Palabras claves: Sedimento, estaciones sedimentométricas, Fleming, Dendy y Bolton.

1. Introducción

El tema de investigación para optar al título de Ingeniero Civil es la estimación de las curvas de descarga del caudal sólido en suspensión en las cuencas de Chile comparando los resultados obtenidos con las curvas empíricas de Fleming, donde relacionan el caudal sólido y líquido mediante constantes dependientes del tipo de cubierta de la cuenca, además del método de Dendy y Bolton el cual relaciona escorrentía, área de drenaje de la cuenca y volumen de sedimento depositado.

Este estudio se realiza en base a los antecedentes de estadísticas sedimentométricas proporcionadas por la Dirección General de Aguas perteneciente al Ministerio de Obras Públicas.

Además se han utilizados antecedentes sedimentológico, obtenidos en estudios de embalses que se encuentran a lo largo de Chile

2. Planteamiento del problema

En primer lugar se debe buscar y encontrar la estadística de caudal y gasto de sólido en las cuencas de Chile [3], provenientes de las estaciones que pertenecen a la Dirección General de Aguas, las cuales miden la concentración de sólidos en el agua y además los caudales del cauce.

Posteriormente se ajusta una curva representativa de la información, obteniendo una curva de gasto sólidos en suspensión diarios, con este modelo se podrá integrar la curva de duración de caudales diarios y obtener finalmente el gasto sólido en suspensión medio anual [4].

El objetivo final del estudio es procesar esos resultados para generar información que resulte de utilidad para quién debe tomar decisiones estratégicas y a la vez compararlos con los métodos empíricos de las curvas de Fleming y de Dendy y Bolton.

3. Objetivos

3.1.- General

- Desarrollar curvas de gastos de sólidos en suspensión medio anual para las cuencas chilenas y comparar con modelos empíricos de Fleming y Dendy y Bolton.
- Ajustar y proponer modelos tipo teóricos para las cuencas chilenas.

3.2.- Específicos

- Buscar estadística de caudal y gasto sólido en estaciones sedimentométricas.
- Obtener curva de gasto sólido en suspensión diario, de la estadística encontrada.
- Obtener curva de gasto sólido en suspensión media anual.
- Comparar las curvas obtenidas con las empíricas de Fleming.
- Comparar el gasto sólido en suspensión medio anual con método de Dendy y Bolton.
- Ajustar modelos teóricos para las cuencas chilenas.

4. Alcances de la investigación

La búsqueda de modelos analíticos que relacionen la descarga del caudal sólido, con el caudal líquido.

Además se realizará el estudio dentro de la zona Norte y Centro Sur que comprenden a estaciones ubicadas desde la Decimaquinta Región de Arica Parinacota hasta la Octava Región del Bío-Bío, pues la estadística de sedimentos es accesible en esta zona.

5. Marco teórico

5.1.- Sedimentos

El régimen de crecidas de un río implica el tránsito de agua, junto con sedimento y nutrientes, y otros arrastres. En general, la interacción entre el agua y el sedimento es la que determina los cambios morfológicos de los cauces y, por extensión, la evolución del sustrato físico de los hábitats fluviales.

Según el Dr. J. J. Victoria [6], los sedimentos fluviales forman parte de los procesos naturales que contribuyen a los cambios morfológicos en general. Los sedimentos en suspensión o arrastrados son un fenómeno común en los ríos de todo el mundo.

Las cantidades de sedimentos arrastradas por los ríos dependen del efecto independiente o combinado de varios fenómenos naturales y de la actividad humana, tales como:

- Régimen de precipitaciones
- Morfología
- Uso de la tierra
- Actividad sismotectónica

Desde su creación, todas las lagunas y lagos están condenados a desaparecer a medida que son llenados por los sedimentos transportados por los ríos que desembocan en ellos. En condiciones naturales, este es un proceso irreversible.

Por otro lado, el efecto de sedimentos generalmente se considera en la estimación de la vida útil de embalses estacionales. Esto por lo regular se hace de acuerdo a estimaciones de masas anuales determinadas en base al análisis de registros históricos. Los sedimentos transportados por los ríos han sido subestimados en más de una ocasión, obligando a reducir la vida útil esperada de los embalses.

La sedimentación se produce cuando disminuye la pendiente y, por tanto, la intensidad de la corriente es menor. Los materiales son depositados por orden de tamaños: primero los grandes bloques, luego los cantos rodados, después, la grava, y, por último, las arenas y los limos.

Obviamente, los sedimentos transportados por los ríos tienen un origen o fuente. Generalmente estas fuentes están asociadas con la actividad sismotectónica, erupciones volcánicas, uso de la tierra, erosión del cauce, etc.

La actividad sismotectónica constituye uno de los mecanismos más importantes en el origen de los sedimentos. En los Himalaya, así como en los Andes se ha podido establecer que en las zonas con mayor actividad sismotectónica también se observan los mayores aportes de sedimentos fluviales. Estos llegan a los cauces de los ríos a través de avalanchas, derrumbes, deslizamientos, etc.

Las áreas cubiertas por glaciares aportan regularmente, en especial en el verano cuando la temperatura del aire asciende, grandes cantidades de sedimentos en suspensión y carga de fondo. Las partículas cuyo diámetro es de 0.2 mm. o inferior son transportadas en suspensión a lo largo de grandes distancias. Estas únicamente se sedimentan cuando la velocidad de flujo del agua es muy baja, como es el caso de embalses y lagos. Por otro lado, dependiendo de la pendiente del cauce, la carga de fondo se mueve muy lentamente.

Las cenizas volcánicas constituyen una importante fuente de sedimentos en América Central en general y en las faldas de los volcanes activos especialmente. Después de depositarse en el

terreno, estas son transportadas durante la temporada lluviosa, azolvando los cauces y provocando desbordes de los ríos, aun cuando los caudales no son extremadamente altos.

Las lluvias extraordinarias asociadas con las altas precipitaciones provocadas por el fenómeno del Niño causan estragos no solamente por los caudales líquidos sino también por los caudales sólidos transportados [6].

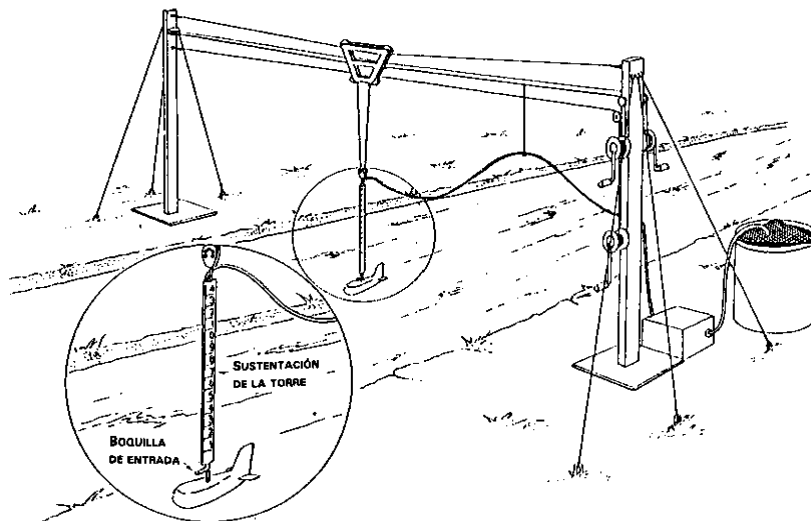


Figura 5.1- Muestreador de sedimentos de bombeo manual sostenido por cable (Hydraulics Research 1990)

5.2.- El proceso de erosión

El suelo es removido constantemente de la superficie de la tierra y transportado aguas abajo por los ríos hasta que se deposita finalmente en los lagos, estuarios y océanos. Dado que el agua es uno de los principales agentes de la erosión y el vehículo principal de transporte del material enrodado, este proceso es de gran interés para el hidrólogo. El interés principal en hidrología son las tasas de transporte y las tasas de deposición en embalses, puertos y estuarios, así como los medios para controlar la erosión en los sitios donde se produce, tanto para conservar el suelo en su sitio, como para minimizar la acumulación en embalses y puertos [5].

La erosión puede ser analizada comenzando por el despegue de las partículas del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia [7]. En suelos a nivel, las partículas se dispersan más o menos uniformemente en todas las direcciones, pero en un terreno con pendiente habrá un transporte neto hacia abajo (Figura 5.2 - Transporte colina-abajo de las partículas de suelo por impacto de la lluvia [5]).

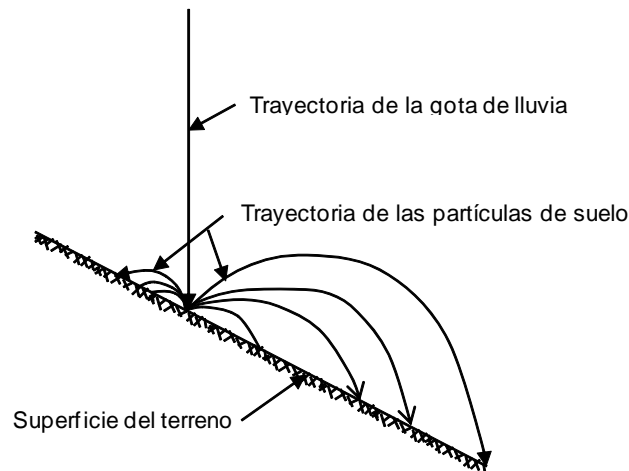


Figura 5.2- Transporte colina-abajo de las partículas de suelo por impacto de la lluvia [5].

Si durante el proceso ocurre flujo superficial, las partículas removidas serán incorporadas en el flujo y serán transportadas aún más abajo antes de ser depositadas de nuevo en la superficie.

El poder erosivo de las gotas más grandes puede ser 10.000 veces mayor que el de las más pequeñas. Esto es compatible con el hecho de que unas pocas tormentas fuertes son las causantes de la mayor parte de la erosión en una cuenca. Este efecto es aumentado en razón de que el flujo superficial ocurre con mayor frecuencia durante tormentas de gran intensidad.

En algún sitio de la pendiente, ocurrirá suficiente acumulación de flujo superficial para causar una pequeña socavación, y si la turbulencia del flujo en las vecindades de esta perturbación es suficiente para sacar partículas del fondo y las bancas del pequeño canal formado, se iniciará un proceso de erosión en cárcava (Figura 5.3 Perfil típico de una cárcava [5]).

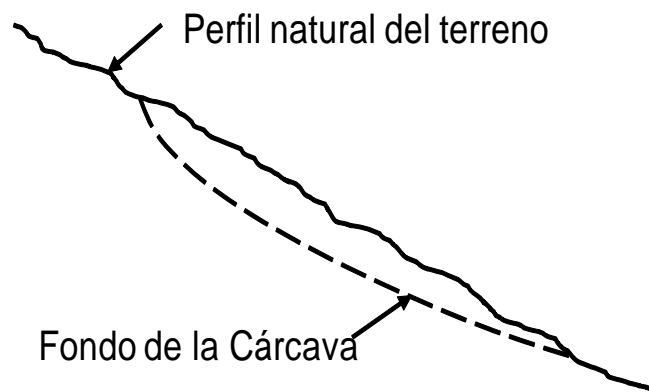


Figura 5.3 - Perfil típico de una cárcava [5].

El tercer factor que ayuda a la erosión es el movimiento de masas de suelo, que puede tomar la forma de un lento movimiento de arrastre, o de un colapso masivo rápido, como un deslizamiento.

5.2.1.- Factores que controlan la erosión

Hay un gran número de factores que controlan las tasas de erosión. Los más importantes son:

- el régimen de lluvias,
- la cobertura vegetal,
- el tipo de suelos y
- la pendiente del terreno.

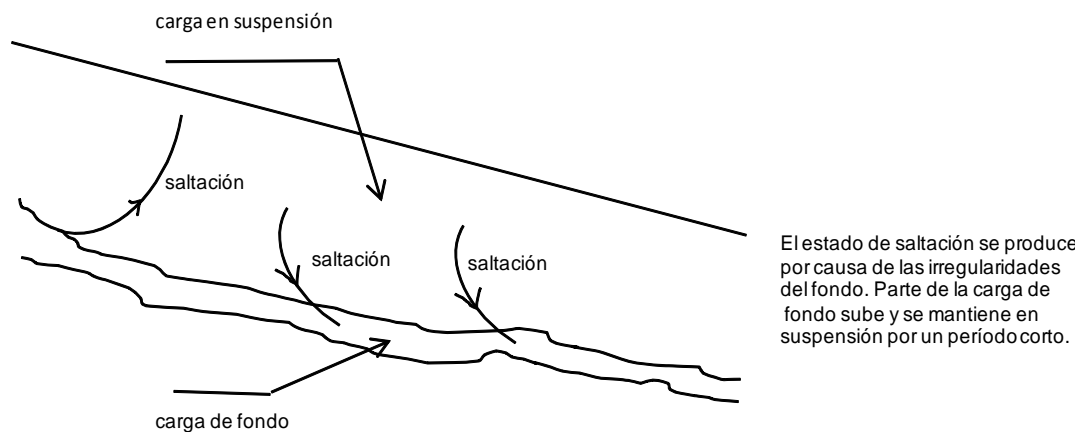
Dado el importante papel del impacto de las gotas de agua en el proceso de erosión, la vegetación da una protección muy significativa absorbiendo la energía de las gotas que caen y reduciendo en general el tamaño de las gotas que alcanzan el suelo [5].

Un suelo bien cementado resistirá la erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia más fácilmente que un suelo suelto. En general la erosión por impacto de lluvia aumenta con el contenido de arena de un suelo debido a la pérdida de cohesión.

Las tasas de erosión son mayores en pendientes altas que en pendientes suaves. Entre más pendiente tenga un talud, más efectiva será la acción del agua lluvia en erodar y transportar el sedimento pendiente abajo. La longitud de la pendiente también es importante; entre más corta sea la pendiente, más pronto llegarán los sedimentos al cauce natural.

En una corriente natural el transporte de los sedimentos se compone de carga de fondo, carga en suspensión y carga en saltación (Fig 5.4 - Perfil río, fuente [6]); la última componente es una combinación de las dos primeras. La suma de las tres se denomina carga total.

Los sedimentos en suspensión son finos que llegan a la corriente por procesos de erosión pluvial de la cuenca vertiente o por lavado de material suelto. Se mantienen en suspensión mientras la fuerza ascensional que se genera por la velocidad del flujo sea mayor que su peso propio



La carga de fondo está comprendida por el material sólido que se mueve en proximidades del lecho de la corriente. Es alimentada por los sedimentos que conforman el lecho y por los materiales gruesos que son transportados desde la cuenca por procesos de remoción en masa.

Figura 5.4 - Perfil río, fuente [6]

Se pueden distinguir dos tipos de sedimentación, atendiendo al movimiento de las partículas que sedimentan:

- a) En suspensión
- b) Arrastre de fondo

5.3.- Sedimentos en suspensión y arrastre de fondo.

El transporte sólido es un aspecto clave en los procesos fluviales y se relaciona directamente con la dinámica morfométrica de los ríos [8]. Los aportes de los sedimentos generados desde las laderas de las cuencas durante los periodos de tormentas son transportados en los cauces en suspensión, mientras que los provenientes de las erosiones en la red de drenaje o desde las laderas adyacentes a la misma son movilizados principalmente como transporte de fondo o acarreo [9,10]. Esta clasificación es más bien conceptual pues no existe un límite exacto para separar la fuente de origen y forma de transporte de los sedimentos [8].

El transporte sólido de fondo en cursos de agua con lecho de grava ha sido descrito [11, 12] como un fenómeno de diferentes fases y en particular con dos condiciones del movimiento de los sedimentos. Superado el estado crítico del inicio del movimiento, en una primera fase el transporte de sedimentos se manifiesta con una intensidad moderada junto a un determinado umbral del caudal líquido, mientras que en la segunda fase la intensidad de arrastre de fondo aumenta. El umbral del caudal líquido que define el límite entre las dos fases del transporte sólido correspondería al caudal de cauce lleno [13, 14], aun cuando [12] asocia el inicio de la segunda fase con la ruptura del acorazamiento del lecho y [15] lo relaciona a un caudal igual al 80% del correspondiente al cauce lleno. La intensidad de transporte es mucho mayor en la segunda fase, que se manifiesta sólo durante intervalos de tiempos breves, sobre todo en pequeños cursos de agua de lecho de grava y alta pendiente, por lo que la mayor parte de la producción anual de los sedimentos se produciría durante la primera fase [16, 17].

El transporte sólido en suspensión estaría más influenciado por la disponibilidad de sedimentos finos que por las características energéticas o hidrodinámicas del torrente [18]. El aporte del transporte sólido en suspensión al transporte sólido total es bastante variable y se sitúa en un rango de un 70 a 95% para ríos fluviales [10, 18] y entre 10-90% para torrentes en zonas de montaña [19-21]. Este amplio rango se debe principalmente a las variaciones espaciales y temporales del suministro y disponibilidad de materiales finos originados por los procesos de erosión en la cuenca, siendo los procesos de transporte en suspensión en ríos de montaña generalmente relacionados con crecidas aisladas o con periodos de derretimiento nival o glacial [18, 22, 23].

5.4.- Medición del transporte de sedimentos

Las primeras mediciones de sedimentos en suspensión se hicieron por medio de botellas abiertas o trampas complejas para atrapar las partículas, las cuales no cumplieron su cometido de obtener datos adecuados por varias razones. Un buen muestreador debe producir un mínimo de perturbaciones en el flujo, debe evitar errores producidos por las fluctuaciones a corto plazo de las concentraciones, y debe dar resultados que puedan relacionarse con las mediciones de velocidad del flujo.

Una serie de medidores [24] diseñados en el laboratorio de hidráulica de Iowa, como muestra la figura 5.5, cuya construcción se ve que consiste en un cuerpo aerodinámico con una botella de vidrio que permite contener las muestras; un conducto permite la salida del aire a

medida que el agua llena la botella y controla la velocidad de entrada de modo que sea aproximadamente igual a la velocidad de flujo local [5]. Los modelos de medidores más grandes tienen la botella completamente encerrada y están equipados con aletas de cola para mantener el aparato de cabeza al fluido cuando éste se halla suspendido por medio de un cable.

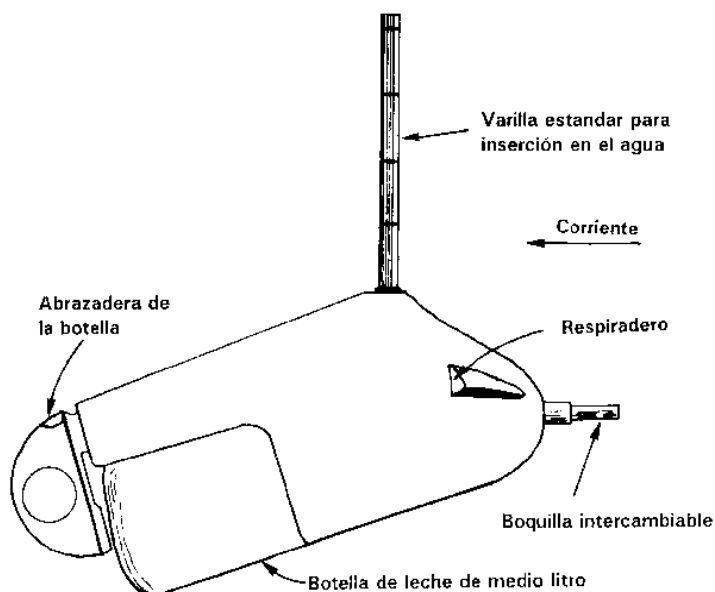


Figura 5.5 - Toma muestras manual integrador de profundidad DH-48 para uso en cauces pequeños.

Según R. Linsley [5], el manejo del medidor requiere su descenso vertical a lo largo de la profundidad del río a una velocidad constante, hasta alcanzar el fondo, inmediatamente después asciende a la superficie, también a velocidad constante.

La duración del viaje del medidor está determinada por el tiempo necesario para llenar la botella, y se puede calcular a partir de curvas particulares para cada boquilla, una vez conocida la velocidad de la corriente. Un cierto número de verticales debe ser muestreado a lo largo de cada sección transversal con el objeto de determinar la carga total en la sección; de esta manera no existe el problema de si una muestra puntual es o no representativa de la carga total en la sección. Los muestreadores puntuales se utilizan solamente cuando es imposible usar los aparatos integradores debido a grandes profundidades o altas velocidades, o cuando se están haciendo mediciones de la distribución de sedimentos en la sección. Debido a la forma de la boquilla los medidores no pueden descender hasta el fondo del río el cual puede causar errores bastantes grandes en cauces de poca profundidad [25].

Las muestras de sedimentos recogidas se filtran y el sedimento se seca. La relación entre el peso seco de sedimentos y el peso total de la muestra es la concentración de sedimentos, que se expresa generalmente en partes por millón.

5.5.- Curvas de gasto sólido en suspensión diario

Las medidas del transporte de sedimentos, producen solamente lecturas ocasionales de la tasa de transporte. Las curvas de gasto de sedimentos, que relacionan las tasas de transporte en suspensión con los caudales (Figura 5.6 - Curva de gasto de sedimentos para el río Powder en Arvada, Wyoming, Estados Unidos.), se utilizan frecuentemente para obtener estimativos del transporte en días para los cuales no se hicieron mediciones [5]. La figura indica claramente que estas relaciones son muy aproximadas; un caudal dado puede ser el resultado de la fusión de nieves, o de lluvias de diferente intensidad, y cada uno de estos fenómenos puede causar una tasa de transporte completamente diferente de las otras.

La distribución espacial de la precipitación puede ser también una causa de las diferencias, ya que las distintas partes de la cuenca tienen diferentes sedimentos y diferentes tasas de producción de los mismos. Las curvas de gasto se deben utilizar solamente en cuencas relativamente pequeñas y homogéneas [5]. Cuando las curvas se utilizan sólo para estimar la producción media anual de sedimentos, los errores tienden a compensarse y la respuesta es razonablemente satisfactoria si existe un registro suficientemente largo.

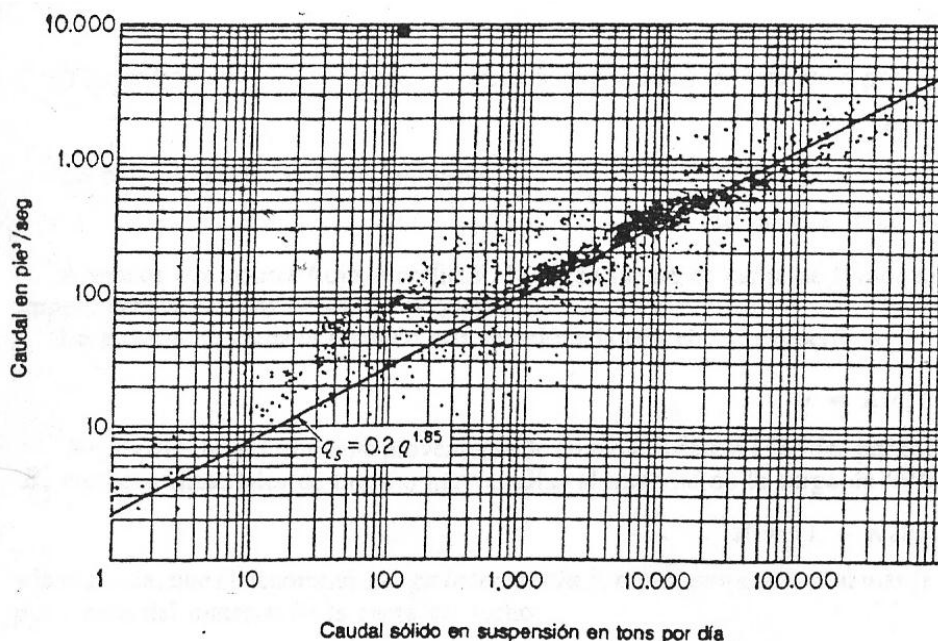


Figura 5.6 - Curva de gasto de sedimentos para el río Powder en Arvada, Wyoming, Estados Unidos.

5.6.- Curva de duración de caudales

Una curva de duración es una distribución de frecuencia acumulada que indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales (diarios, mensuales o anuales) han sido igualados o excedidos. Este tipo de curvas permite combinar en una sola figura las características fluviométricas de un río en todo su rango de caudales independientemente de su secuencia de ocurrencia en el tiempo.

Para dibujar una curva de duración los gastos medios diarios, semanales, mensuales o cualquier otro intervalo de tiempo se ordenan de acuerdo a su magnitud y luego se calcula el porcentaje de tiempo durante el cual ellos fueron igualados o excedidos. Mientras mayor sea el período de tiempo que cubren los datos con los cuales se construye la curva de duración más representativa será ésta de las condiciones medias. Si se dibuja el caudal contra el porcentaje de tiempo en que éste es excedido o igualado se tiene una gráfica como la mostrada en la figura 5.7- Curva de duración.

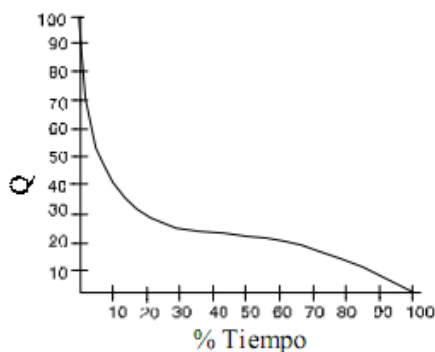


Figura 5.7 - Curva de duración.

Las curvas de duración permiten estudiar las características fluviométricas de los ríos, comparar diferentes cuencas, se puede hacer estudios económicos sobre la factibilidad de construcción de un punto de estudio u operación de un balseadero en los días de crecidas. Este tipo de curvas permite también hacer estudios preliminares sobre capacidades de plantas hidroeléctricas y también estudios de calidades de agua.

Las características más importantes de la curva de duración, del punto de vista hidrológico son:

- La pendiente depende del tipo de datos, para caudales diarios producen una curva con más pendiente que una calculada con caudales mensuales, debido a que los picos se suavizan con registros mensuales.
- En caso que las pendientes sean altas indican caudales muy variables, en pendientes bajas indican respuestas lentas a la lluvia y variaciones pequeñas del caudal.

Los dos métodos más comúnmente usados para construir curvas de duración son el “método del año calendario” y el “método del período total”.

En el primero de estos métodos se ordenan los valores para cada año de acuerdo con su magnitud y se les asigna un número de orden. Luego se promedian los caudales para un mismo número de orden y se llevan a un gráfico, los caudales en las ordenadas, y número de orden o probabilidad de excedencia en abscisas. El método del año calendario da valores menores para los caudales altos y valores mayores para los caudales bajos, que el método del período total.

El método del período total, que se considera más preciso que el anterior, agrupa los caudales en clases de acuerdo con su magnitud. Los totales para cada año se acumulan y se les calcula una probabilidad de excedencia.

Las curvas de duración de caudales se usan en la planeación de recursos hidráulicos, para evaluar el potencial hidroeléctrico de un río, para estudios de control de inundaciones, en el diseño de sistemas de drenaje, para calcular las cargas de sedimento y para comparar cuencas cuando se desea trasladar registros de caudal.

5.7.- Curvas de Gasto Sólido en Suspensión medio anual

La curva de gasto sólido en suspensión anual es obtenida con la integración de la curva de duración de caudales propia de cada cuenca y la curva de gasto sólido en suspensión diario antes mencionada, con esto se logra tener un registro de la producción anual de sólidos en suspensión para una cuenca y un caudal determinado, antecedente importante para la evaluación de embalses u obras hidráulicas.

La producción anual de sedimentos de una cuenca depende de muchos factores tales como el clima, el tipo de suelos, el uso de la tierra, la topografía y la existencia de embalses. Generalmente es difícil obtener datos adecuados para análisis completo de todos los factores. Langbein y Schumm [26] utilizaron datos de numerosas cuencas para construir la curva que relaciona la producción media anual de sedimentos por unidad de área con la precipitación media anual.

Fleming [27] utilizó datos de más de 250 cuencas alrededor del mundo para obtener las ecuaciones [Ecuación (5-1) y tabla 5-1] para la tasa media anual de transporte en suspensión G_s en toneladas/año, como una función del caudal medio anual en pies cúbicos por segundo para varios tipos de cobertura vegetal:

$$G_s = a Q^n \quad (5.1)$$

Para cuencas sin registros de sedimentos, las relaciones presentadas anteriormente pueden interpretarse como un orden de magnitud de transporte esperado. Si es posible, estos estimativos deben ser comparados con datos de transporte de cuencas similares en la misma región.

Tabla 5.1 - Valores de a y n en la ecuación (5.1) para varios tipos de cobertura.

Cobertura vegetal	n	a	
		Para Qs en ton	Para Qs en ton métricas
Variada, de hoja ancha y coníferas	1,02	117	106
Floresta Conífer y pastos altos	0,82	3.523	3.196
Pastos bajos y arbustos	0,65	19.260	17.472
Desierto y arbustos	0,72	37.730	34.228

Fuente: Adaptado de [27]

Dendy y Bolton [28] relaciona proporcionalmente las características de la cuenca de interés a las de otra de referencia. La cuenca de referencia fue desarrollada basándose en información de 800 cuencas ubicadas en Estados Unidos. En las ecuaciones [ecuación 5.2 y 5.3] propuestas expresan la relación entre volumen de sedimentos producidos, escorrentía y superficie:

Para escorrentía inferior a 50,8 mm/año:

$$\frac{S}{S_R} = 1,07 \left(\frac{Q}{Q_R}\right)^{0,46} \times \left(1,43 - 0,26 \log\left(\frac{A}{A_R}\right)\right) \quad (5.2)$$

Para escorrentía superior a 50,8 mm/año:

$$\frac{S}{S_R} = 1,19 e^{(-0,11 Q/Q_R)} \times \left(1,43 - 0,26 \log\left(\frac{A}{A_R}\right)\right) \quad (5.3)$$

Donde

- S_R = Gasto sólido en suspensión medio anual referencial de 635 en ton/km²/año.
- Q_R = Escorrentía media anual referencial de 50,8 en mm/año.
- A_R = Área de drenaje de cuenca referencial de 2,59 en Km².
- S = Volumen de sedimentos producidos en ton/km²/año.
- Q = Escorrentía media anual en mm/año.
- A = Área de drenaje de cuenca en Km².

6. Metodología

Los datos requeridos para el desarrollo de la memoria, se obtuvieron en la búsqueda de los estudios realizados a embalses existentes en el país desde la región de Arica y Parinacota hasta el Bío-Bío, en la Dirección de Obras Hidráulicas (D.O.H) perteneciente al Ministerio de Obras Públicas (M.O.P), para poder obtener la estadística fluviométrica y sedimentométrica necesaria, también se seleccionaron estaciones pertenecientes a la Dirección General de Aguas (D.G.A), en las cuales se miden concentraciones y caudales.

6.1.- Arrastre de sedimentos en suspensión

Para conocer el arrastre de sedimento en suspensión que llega a la estación sedimentométrica, donde se toman muestras rutinarias diarias e integradas.

Para determinar el gasto sólido en suspensión medio anual esperado afluente a la estación:

- En primer lugar se efectuó una correlación entre los valores de las concentraciones obtenidas de los muestreos integrados y rutinarios en la estación, ello por cuanto los muestreos integrados entregan una información más precisa de la concentración de sólido en suspensión que los muestreos rutinarios.
- Con la correlación entre concentraciones obtenidas, se corrigió las concentraciones rutinarias generándose de esta forma una estadística de concentraciones equivalente a muestreos integrados en la estación.
- Posteriormente, multiplicando la estadística de concentraciones equivalentes generada con la serie de caudales medios diarios de la estación, de acuerdo a la ecuación 6.1, se generó una estadística de gastos sólidos en suspensión.

$$G_{sd} = C \times Q_d \times T \times 10^{-6} \quad (6.1)$$

Donde:

- G_{sd} = Gasto sólido en suspensión (ton/día)
- C = Concentración medida (mg/l=gr/m³)
- Q_d = Caudal medio diario en (m³/s)
- T = Segundos en un día
- 10^{-6} = Factor de conversión de gramos a tonelada

- Obtención de la curva de descarga del sólido en suspensión representada por la relación.

$$G_s = f(Q)$$

La relación se estableció en un gráfico log-log correlacionando el gasto sólido en suspensión obtenido y los caudales. Los puntos representan cada dato de los muestreos rutinarios de las estaciones formando una nube de puntos, a la que, después se le ajustó una recta, que representará la tendencia media de la nube.

Posteriormente, se calculará la ecuación de la recta, cuya ecuación tendrá la forma

$$G_s = a Q^b \quad (\text{ton/día})$$

- Posteriormente, integrando de manera discreta (a intervalos) la Curva de duración de caudales, se obtuvo el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual esperado.
- Por último en un gráfico tipo logaritmo se correlaciona el gasto sólido en suspensión medio anual con el caudal medio anual de cada estación, formando una nube de puntos, a los cuales se ajusto una recta, que muestra la tendencia de los datos.

A continuación se muestra la ecuación tipo potencial que tendrá la siguiente forma:

$$G_{sma} = a Q_{ma}^b \quad (\text{ton/año})$$

- Comparar modelo obtenido en función de datos medidos con curvas empíricas de Fleming, el cual relaciona el caudal medio anual con gasto sólido en suspensión medio anual. Las distintas curvas y los datos medidos, se muestran en un gráfico tipo logaritmo para visualizar la curva que tiene mayor ajuste a los datos de las estaciones, para entonces sacar el error cuadrático (ecuación 6.2) y relativo (ecuación 6.3) de cada modelo. Además se grafican los datos medidos versus el gasto sólido en suspensión medio anual obtenido de las curvas de Fleming que tienen menor error.

Error cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \hat{x})^2}}{(n-2)} \quad (6.2)$$

Error relativo

$$e_r = \frac{\sqrt{\sum(x - \hat{x})^2}}{(n-2)} \frac{1}{\hat{\bar{x}}} \times 100 \quad (6.3)$$

Donde:

X : Gasto sólido en suspensión medio anual modelado (ton/año)

\hat{x} : Gasto sólido en suspensión medio anual medido (ton/año)

n : Número de datos medidos.

$\hat{\bar{x}}$: Promedio de los gastos sólidos en suspensión medio anual medidos (ton/año)

- Posteriormente con el método de Dendy y Bolton se obtienen el gasto sólido en suspensión por área de cada estación, con las expresiones 5.2 y 5.3, con los que se comparan con los datos medidos, calculando el error cuadrático (ecuación 6.4) y relativo (ecuación 6.5) de cada punto.

Error cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \hat{x})^2}}{(n - 3)} \quad (6.4)$$

Error relativo

$$e_r = \frac{\sqrt{\sum(x - \hat{x})^2}}{(n - 3)} \frac{1}{\hat{\bar{x}}} \times 100 \quad (6.5)$$

Donde:

X : Gasto sólido en suspensión medio anual modelado (ton/año)

\hat{x} : Gasto sólido en suspensión medio anual medido (ton/año)

n : Número de datos medidos.

$\hat{\bar{x}}$: Promedio de los gastos sólidos en suspensión medio anual medidos (ton/año)

- Finalmente se ajustan modelos a los datos medidos tipo Fleming, tipo Dendy y Bolton y tipo Gasto Sólido Específico obteniendo el error cuadrático (ecuación 6.2) y relativo (ecuación 6.3).

7. Obtención de relaciones caudal sólido v/s caudal líquido.

7.1 Análisis de estaciones

A continuación se muestra la metodología antes descrita para cada estación que se seleccionó para el desarrollo del trabajo:

7.1.1 Estación Río Lluta en Tocontasi

Ubicación de la estación

La estación se encuentra ubicada en el río Lluta al norte de la ciudad de Arica, donde su cuenca se clasifica como preandina. En Figura 7.1 se muestra la ubicación.



Figura 7.1 - Ubicación de estación río Lluta en Tocontasi.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con el estudio de caudales medios diarios observados en la estación río Lluta en Tocontasi para el período 01/2001 - 01/2008, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de las estaciones río Lluta en Tocontasi, en la siguiente tabla 7.1 se muestran los antecedentes.

Tabla 7.1 - Registros sedimentométricos Lluta en Tocontasi.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Lluta en Tocontasi	01 - 1994	12 - 2008	09 - 1994	10 - 1995
			02 - 1997	11 - 2009

Tal como se señala en la metodología, para cuantificar el arrastre de sólidos en suspensión, se utilizó la información fluviométrica y sedimentométrica existente en la estación.

Primeramente se comparó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes medidos en la estación sedimentométrica, en la Figura 7.2 se muestra el gráfico de la correlación, encontrándose que existe una clara relación de potencia entre ambos.

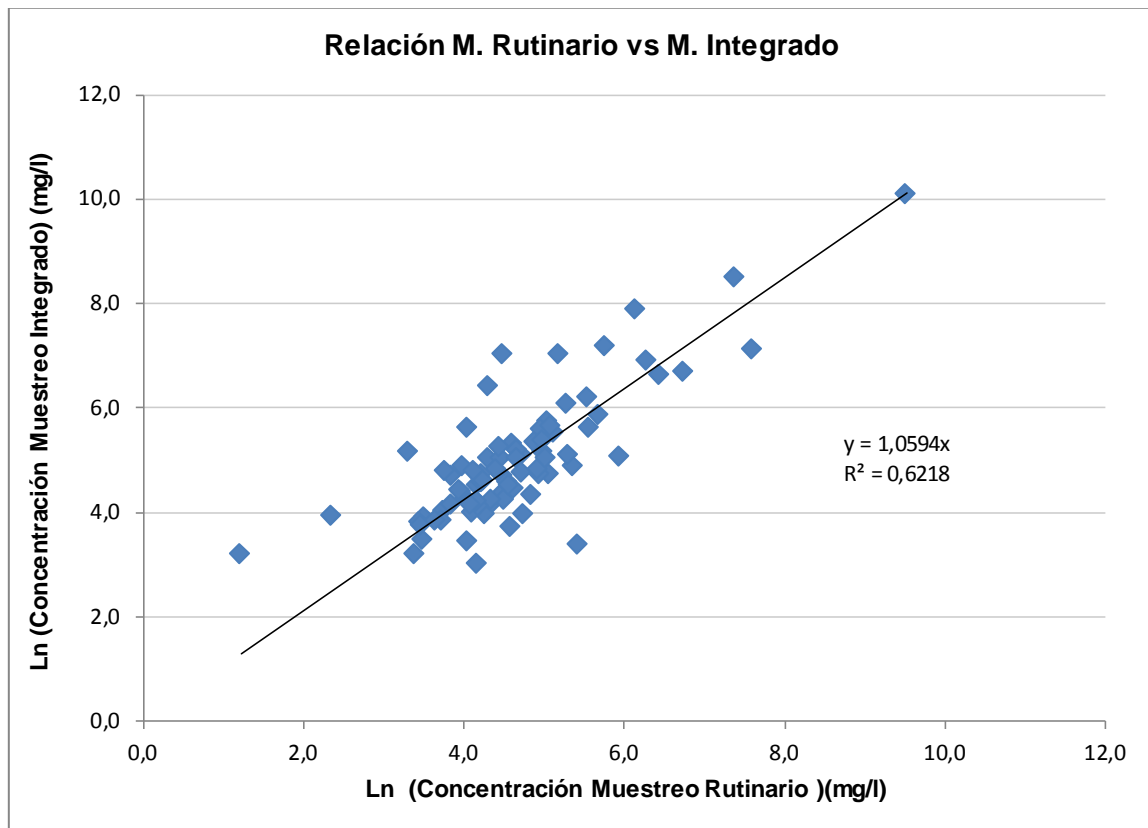


Figura 7.2 - Relación entre concentraciones obtenidas de muestreos integrales y rutinarios en la estación Lluta en Tocontasi.

La relación obtenida en el gráfico es $C_i = C_r^{1,059}$, donde C_i es la concentración de muestreos integrados (mg/l) y C_r corresponde a concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente, con la relación encontrada y la estadística de concentraciones obtenida de muestreos rutinarios se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados.

Luego, al multiplicar de estadística de caudales medios diarios con la estadística de concentraciones equivalentes a muestreos integrados, se generó una estadística de gastos sólidos en suspensión medios diarios.

Finalmente, se determinó la curva de gasto de sólido en suspensión con la estadística de caudales medios diarios y gasto sólido en suspensión medios diarios, donde resulta una relación de potencia del tipo $Q_s = a Q^n$, el cual a y n son constantes que se establecieron por correlación del modelo, en la Figura 7.3 se muestra la relación.

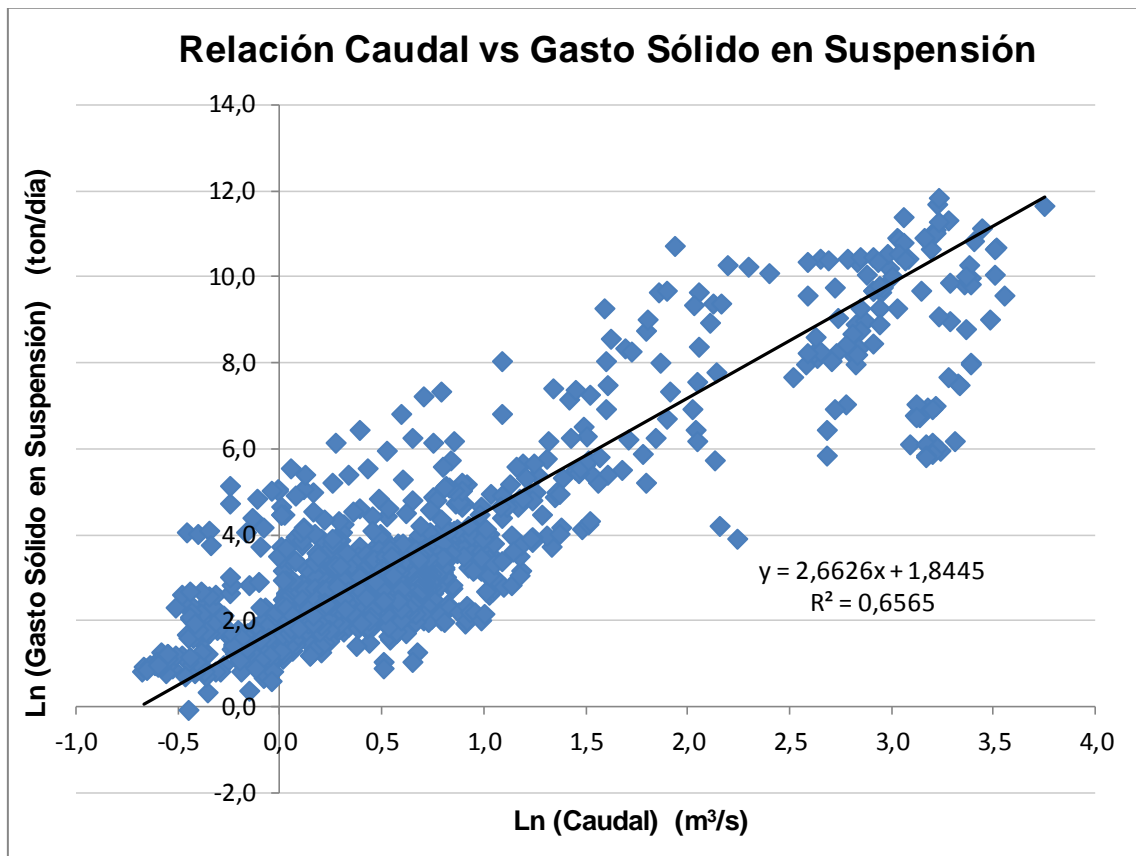


Figura 7.3 - Relación Gasto sólido en suspensión y caudal medio diario de Lluta en Tocontasi.

La relación de gasto sólido en suspensión y caudal medio diario es de $G_{sd} = 6,325 Q_d^{2,663}$ donde G_{sd} esta en (ton/día) y Q_d esta en (m^3/s).

Luego, se confeccionó la curva de duración de caudales, con base en la estadística de caudales medios diarios, en las siguientes Tablas 7.2, 7.3 y Figura 7.4 se aprecia la gráfica, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales, generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación.

Tabla 7.2- Curva de Duración de Caudales de la Estación Río Lluta en Tocontasi, Cálculo del promedio anual del Gasto Sólido en Suspensión.

Prob. (%)	Q _d (m ³ /s)	G _{sd} (ton/día)	Prom (G _{sd}) (ton/día)	ΔProb. (%)	Prom (G _{sd})*Δprob (ton/día)	Acum.(G _{sd}) (ton/día)
	69	497939				
0,003	69	497939	497939	0,003	13,44	13,44
0,01	43,5	145780	321859	0,007	23,50	36,94
0,02	41,15	125741	135761	0,01	13,58	50,52
0,05	36,13	88927	107334	0,03	32,20	82,72
0,10	31,31	60738	74833	0,05	37,42	120,13
0,15	27,91	44724	52731	0,05	26,37	146,50
0,20	26,14	37564	41144	0,05	20,57	167,07
0,30	23,43	28068	32816	0,10	32,82	199,89
0,40	21,04	21076	24572	0,10	24,57	224,46
0,50	17,1	12135	16606	0,10	16,61	241,06
0,60	12,46	5224	8679	0,10	8,68	249,74
0,80	9,03	2217	3720	0,20	7,44	257,18
1,00	6,59	958	1587	0,20	3,17	260,36
1,50	5,02	464	711	0,50	3,56	263,91
2,00	4,46	339	402	0,50	2,01	265,92
3,00	4,09	269	304	1,00	3,04	268,96
4,00	3,57	187	228	1,00	2,28	271,24
5,00	2,37	63	125	1,00	1,25	272,49
6,00	1,93	36	50	1,00	0,50	272,99
8,00	1,55	20	28	2,00	0,57	273,56
10,0	1,44	17	19	2,00	0,37	273,93
15,0	1,2	10,3	13	5,00	0,67	274,60
20,0	1,07	7,6	8,9	5,00	0,45	275,05
30,0	0,98	6,0	6,8	10,00	0,68	275,73
40,0	0,92	5,1	5,5	10,00	0,55	276,28
50,0	0,82	3,7	4,4	10,00	0,44	276,72
60,0	0,74	2,8	3,3	10,00	0,33	277,05
80,0	0,54	1,2	2,0	20,00	0,41	277,46
90,0	0,43	0,7	0,9	10,00	0,09	277,55
95,0	0,35	0,4	0,5	5,00	0,03	277,58
100,0	0,02	0,0002	0,2	5,00	0,01	277,59

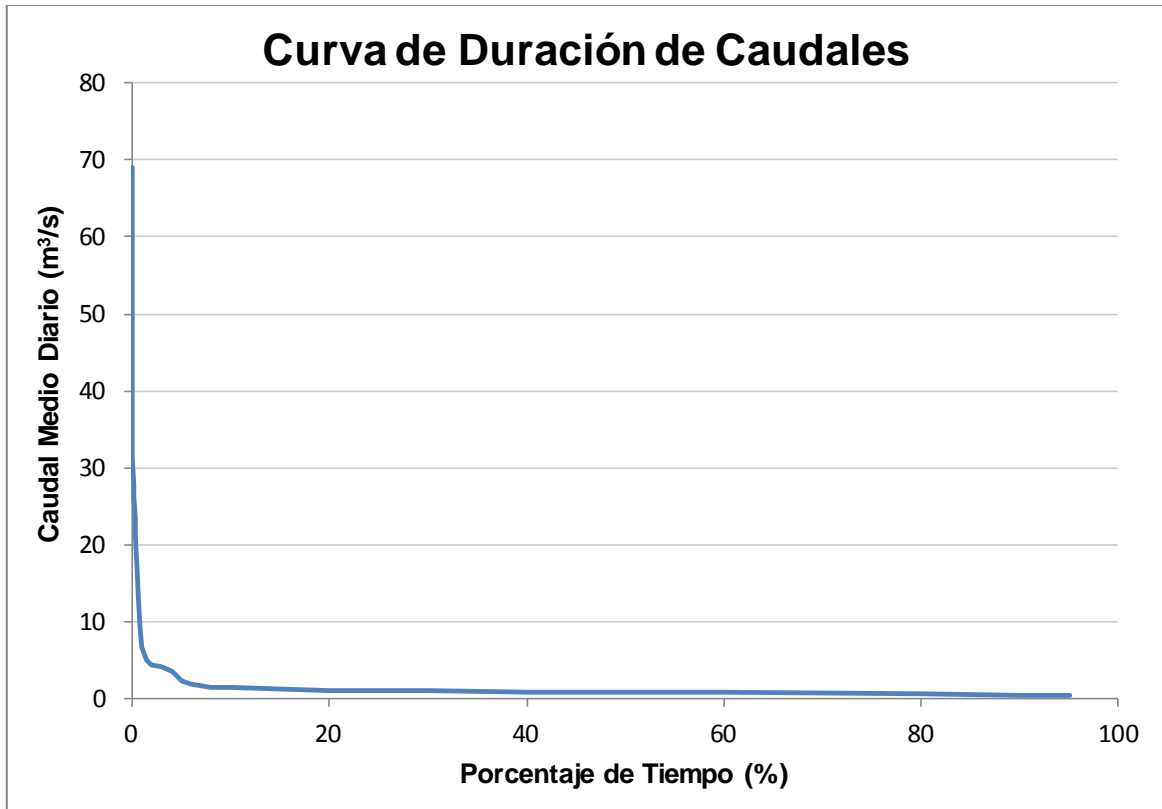


Figura 7.4 - Curva de duración de caudales medio diarios de la Estación Río Lluta en Tocontasi.

7.1.2 Estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana

Ubicación de la estación

La cuenca hidrogeológica de la Quebrada de Tarapacá, se encuentra en el sector centro de la I Región de Tarapacá, en la provincia de Iquique, la quebrada forma parte de una estructura hidrogeológica mayor, la Pampa del Tamarugal. En años húmedos los mayores caudales ocurren en Febrero, mientras que los menores lo hacen entre Agosto y Octubre. En años secos los caudales son más uniformes, presentando leves aumentos en los meses de verano, entre Enero y Marzo, y bajos caudales entre Septiembre y Diciembre. La Figura 7.5 muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.5 – Ubicación estación Q. Tarapacá en Laonsana

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la Q. Tarapacá en Laonsana para el período 03/2003- 01/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Q. Tarapacá en Laonsana. En la tabla 7.4 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.4 - Registros sedimentométricos Q. Tarapacá en Laonsana

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Q. Tarapacá en Laonsana	02 - 1994	01 - 2009	08 - 1994	12 - 2009

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en la quebrada.

Inicialmente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes, descubriendo que existe una marcada relación potencial entre ambos. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana corresponde a $C_i = C_r^{0,870}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados.

Finalmente al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. Con ello se formó la curva del gasto sólido en suspensión de la estación mostrado en la Figura 7.6.

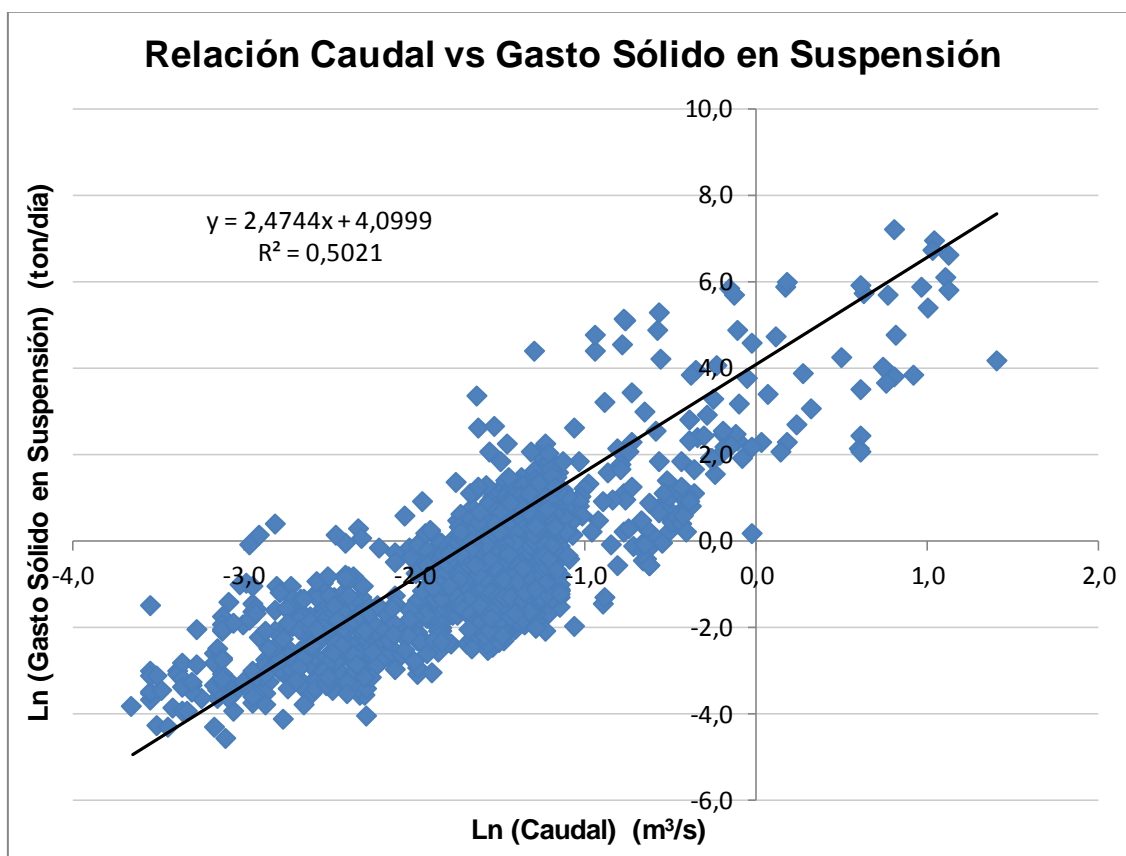


Figura 7.6 - Modelo de curva sólido en suspensión de la estación Q. Tarapacá en Laonsana.

La relación de gasto sólido en suspensión y caudal medio diario es de $G_{sd} = 60,334 Q_d^{2,474}$ donde G_{sd} está en (ton/día) y Q_d está en (m^3/s).

Posteriormente, se confeccionó la curva de duración de caudales, con base en la estadística de caudales medios diarios, para después integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	4.671 (ton/año)
Caudal Medio Anual	0,24 (m^3/s)

7.1.3 Estación Río Loa antes Represa Lequena

Ubicación de la estación

El río Loa, a lo largo de sus 440 km. de longitud, atraviesa el desierto de Atacama. El régimen del río Loa y el de sus afluentes es pluvial, ya que sus crecidas obedecen a intensas lluvias de verano caídas en la alta cordillera, producto del denominado “Invierno Altiplánico”. Esta estación fluviométrica es la que mide el recurso de cabecera del río Loa. Está ubicada aproximadamente 1 Km. aguas arriba de la Represa Lequena, esta estación fue instalada a principios de 1967 y se encuentra ubicada en el río Loa, aproximadamente a 38 Km. aguas arriba de su confluencia con el río San Pedro. En la Figura 7.7 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.7 - Ubicación estación río Loa antes represa en Lequena.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Loa antes Represa Lequena para el período 01/1985 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Loa antes Represa Lequena. En la tabla 7.5 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.5 - Registros sedimentométricos Río Loa antes Represa Lequena

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Loa antes Represa Lequena	10 - 1990	11 - 2008	11 - 1990	12 - 2009

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Loa.

Primeramente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Loa antes Represa Lequena corresponde a $C_i = C_r^{0,996}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se obtuvo una estadística de concentraciones diarias equivalente, al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. En la Figura 7.8 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

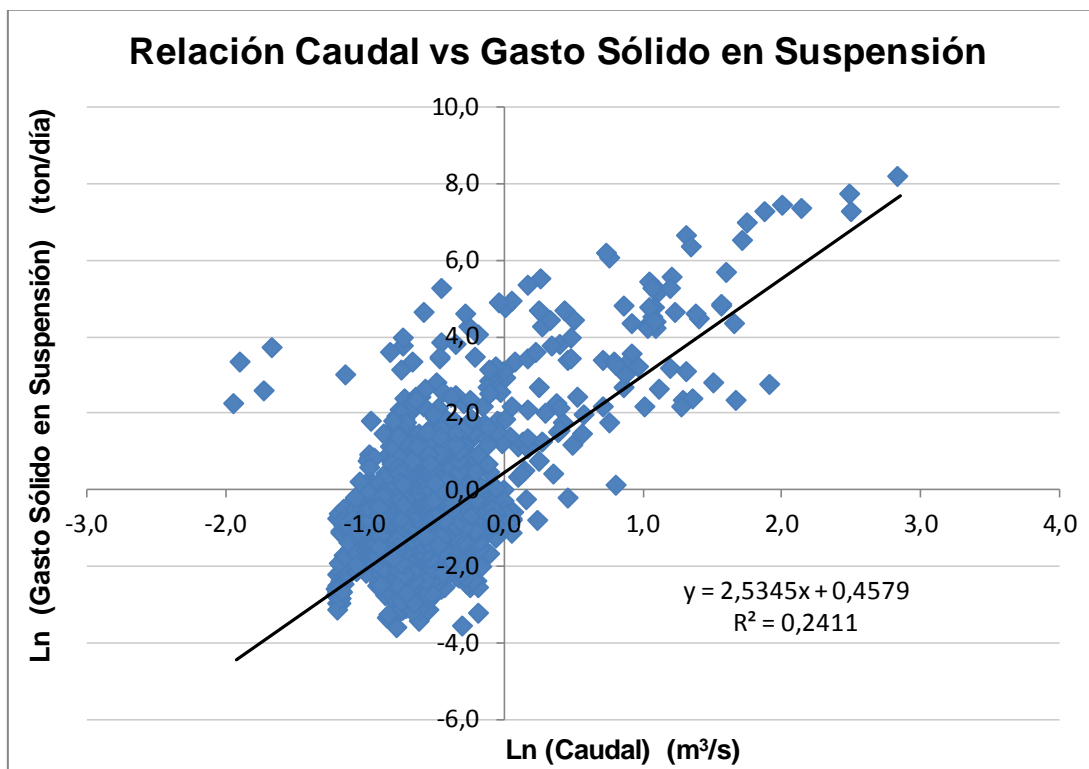


Figura 7.8 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Loa antes Represa Lequena.

El modelo de la curva de sólido en suspensión corresponde a $G_{sd} = 1,581 Q_d^{2,535}$, donde G_{sd} es el gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m³/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Loa antes Represa Lequena es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	496 (ton/año)
Caudal Medio Anual	0,57 (m³/s)

7.1.4 Estación Río Salado en Sifón Ayquina

Ubicación de la estación

La estación se encuentra ubicada aguas abajo de la zona de cultivos de la localidad de Ayquina, en este lugar el río Salado ya ha recibido los aportes de la quebrada Curti y Caspana, además ya se empiezan a notar los aportes subterráneos de las vegas de Turi. En la Figura 7.9 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.9 – Ubicación río Salado en Sifón Ayquina.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Salado en Sifón Ayquina para el período 01/1989 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Salado en Sifón Ayquina. En la tabla 7.6 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.6 - Registros sedimentométricos Río Salado en Sifón Ayquina.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Salado en Sifón Ayquina	10 - 1990	11 - 2008	11 - 1990	12 - 2009

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Salado.

Inicialmente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Loa antes Represa Lequena corresponde a $C_i = C_r^{0,945}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se obtuvo una estadística de concentraciones diarias equivalente. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. En la Figura 7.10 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

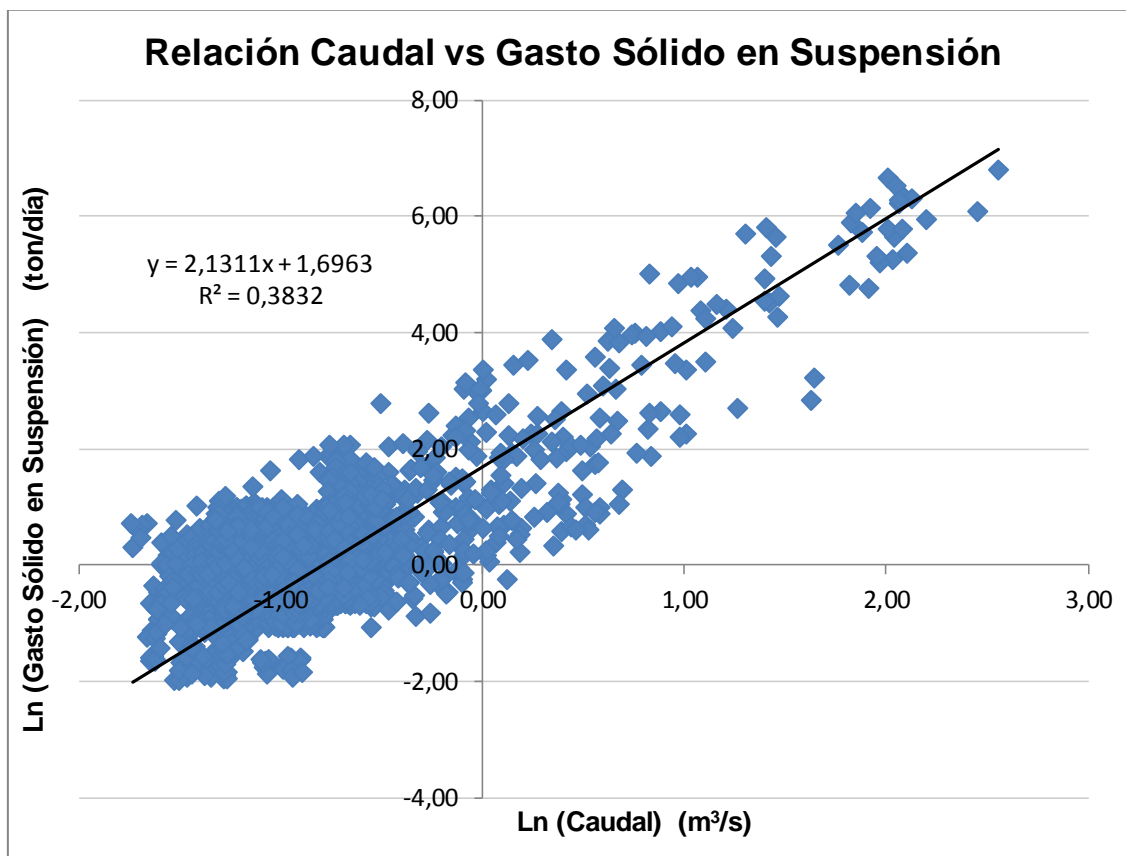


Figura 7.10 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Salado en Sifón Ayquina.

El modelo de la curva de sólido en suspensión corresponde a $G_{sd} = 5,454 Q_d^{2,131}$ donde G_{sd} es el gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Salado en Sifón Ayquina es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	1.407 (ton/año)
Caudal Medio Anual	0,47 (m^3/s)

7.1.5 Estación Río Huasco en Algodones

Ubicación de la estación

Se encuentra en el río Huasco, unos 3 Km. aguas abajo de la junta de los ríos del Carmen y del Tránsito, a 600 m s.n.m. esta estación presenta un régimen nival, muy similar al de la estación río del Tránsito antes de junta con río del Carmen, con sus mayores caudales en Diciembre y Enero, producto de deshielos, y bajos caudales en invierno. En años húmedos los mayores caudales se presentan entre Noviembre y Febrero, mientras que los menores ocurren entre Mayo y Septiembre. En años secos los caudales permanecen bajos durante todo el año, sin mostrar variaciones importantes. En la Figura 7.11 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.11- Ubicación estación río Huasco en Algodones

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con la serie de caudales medios diarios observados en la estación Río Huasco en Algodones para el período 07/1975 - 08/1988 y 02/1994 - 12/2010, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de las estación. En la Tabla 7.7 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.7 - Registro sedimentométricos disponibles Río Huasco en Algodones

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Huasco en Algodones	06 - 1986	11 - 2008	05 - 1987	12 - 1988
			09 - 1995	08 - 2009

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Huasco.

Primeramente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Loa antes Represa Lequena corresponde a $C_i = C_r^{0,996}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se obtuvo una estadística de concentraciones diarias equivalente. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. En la Figura 7.12 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

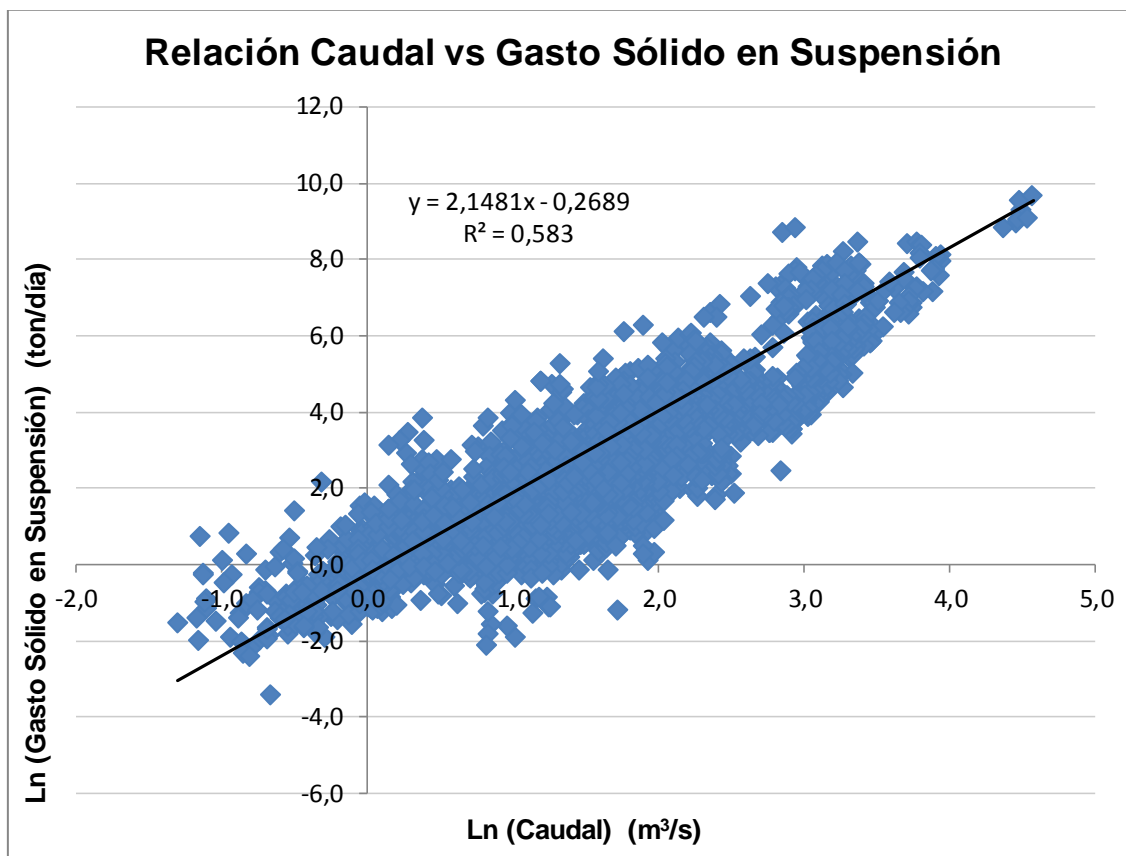


Figura 7.12 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Huasco en Algodones.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Huasco en Algodones corresponde a $G_{sd} = 0,764 Q_d^{2,148}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Huasco en Algodones es:

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual	83.792 (ton/año)
Caudal Medio Anual	7,46 (m^3/s)

7.1.6 Estación Río Jorquera en Vertedero

Ubicación de la estación

Se ubica en el río Jorquera, poco antes de la junta con el río Pulido, a 1250 m.s.n.m. En años muy húmedos los caudales son bastante uniformes a lo largo de la estación, salvo leves aumentos entre Diciembre y Febrero. En años secos se observan caudales muy bajos a lo largo de todo el tiempo, con valores menores a 400 l/s. Los menores caudales se dan entre Diciembre y Marzo. Cabe destacar que aguas arriba de ésta estación existen zonas de riego, por lo que los registros se ven afectados por estas extracciones. En la Figura 7.15 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.13 - Ubicación estación río Jorquera en Vertedero.

Antecedentes básicos

a) Fluiométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Jorquera en Vertedero para el período 01/1967 - 10/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación río Jorquera en Vertedero. En la tabla 7.9 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.8 - Registros sedimentométricos Río Jorquera en Vertedero.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Jorquera en Vertedero	10 - 1967	02 - 1973	05 - 1987	10 - 1989
	02 - 1976	01 - 1990	01 - 1992	08 - 2009
	02 - 1992	11 - 2008		

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Jorquera.

Inicialmente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Jorquera en vertedero corresponde a $C_i = C_r^{0,9621}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se obtuvo una estadística de concentraciones diarias equivalente, al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. En la Figura 7.16 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

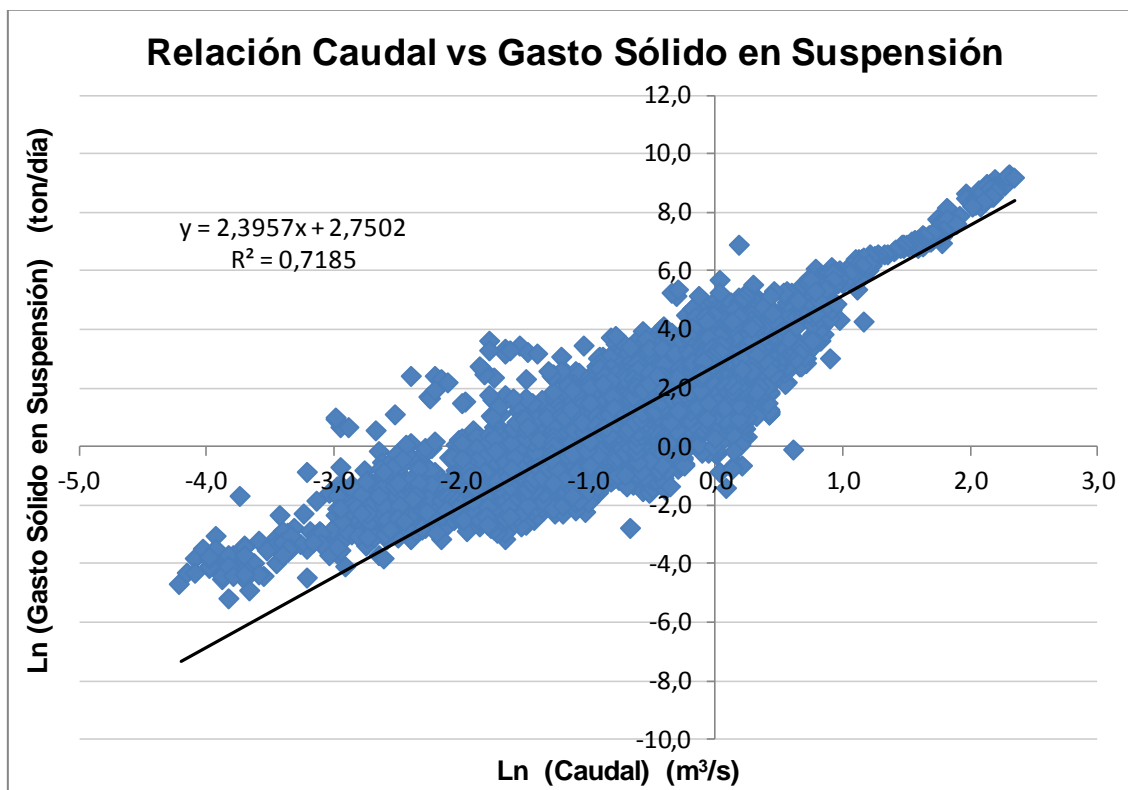


Figura 7.14 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Jorquera en Vertedero.

El modelo de la curva de sólido en suspensión corresponde a $G_{sd} = 15,646 Q_d^{2,396}$, donde G_{sd} es el gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medios diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Jorquera en Vertedero es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	8.310 (ton/año)
Caudal Medio Anual	0,69 (m^3/s)

7.1.7 Estación Río Pulido en Vertedero

Ubicación de la estación

La estación se encuentra en el río Pulido, aguas arriba de la junta con el río Jorquera, a 1310 m s.n.m. En años húmedos los mayores caudales se presentan entre Diciembre y Febrero, mientras que los menores se extienden desde Abril a Octubre. En años secos se observan bajos caudales a lo largo de todo el período, salvo leves aumentos entre Enero y Marzo. En la Figura 7.17 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.15 - Ubicación estación río Pulido en Vertedero

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Pulido en Vertedero para el período 01/1967 - 10/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Pulido en Vertedero. En la tabla 7.10 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.9 - Registros sedimentométricos Río Pulido en Vertedero.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Pulido en Vertedero	11 - 1967	02 - 1973	05 - 1987	10 - 1989
	02 - 1976	07 - 1985	04 - 1991	07 - 2009

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Pulido en Vertedero.

Inicialmente se determinó el gasto de sólido en suspensión de la estación con la concentración de muestreos rutinario y el caudal medio diario, para luego correlacionar los valores del gasto sólido en suspensión y el caudal, manifestando una marcada relación potencial entre ambos. En la Figura 7.18 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

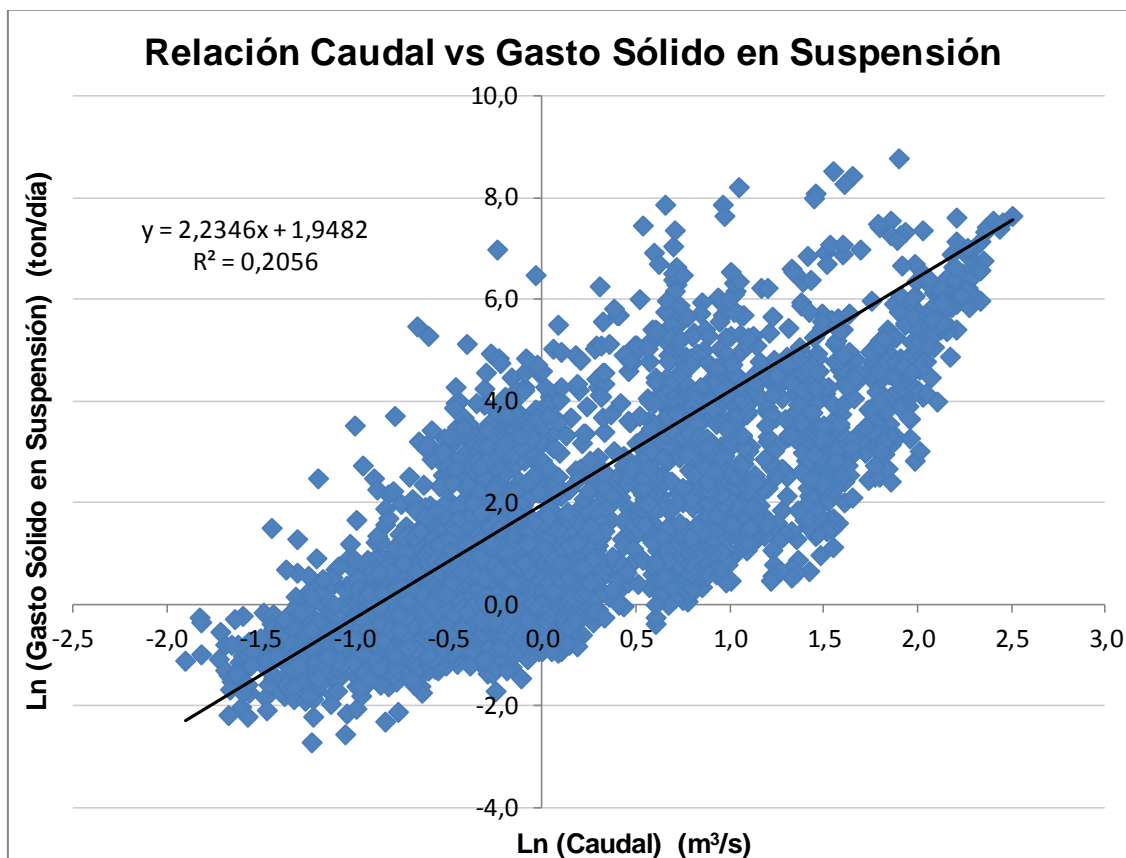


Figura 7.16 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Pulido en Vertedero.

El modelo de la curva de sólido en suspensión corresponde a $G_{sd} = 7,016 Q_d^{2,235}$, donde G_{sd} es el gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medios diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Pulido en Vertedero es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	17.278 (ton/año)
Caudal Medio Anual	1,45 (m^3/s)

7.1.8 Estación Río Choapa en Cuncumén

Ubicación de la estación

Se encuentra en el curso alto del río Choapa, aguas arriba de la mayor parte de las bocatomas de canales de riego, a 960 m.s.n.m. En años húmedos los mayores caudales se presentan entre Noviembre y Enero, producto de importantes deshielos, mientras que los menores se extienden entre Marzo y Julio. En años secos los caudales se distribuyen de manera más uniforme, sin mostrar variaciones importantes durante el año. En la Figura 7.19 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.17 - Ubicación estación río Choapa en Cuncumén.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con la serie de caudales medios diarios observados en la estación Río Choapa en Cuncumen para el período 10/1965 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de las estación. En la Tabla 7.11 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.10 - Registro sedimentométricos disponibles Río Choapa en Cuncumen.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Choapa en Cuncumén	10 - 1986	10 - 2007	10 - 1986	10 - 2007

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Choapa.

Primeramente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Choapa en Cuncumén corresponde a $C_i = C_r^{0,9726}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se obtuvo una estadística de concentraciones diarias equivalente. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. En la Figura 7.20 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

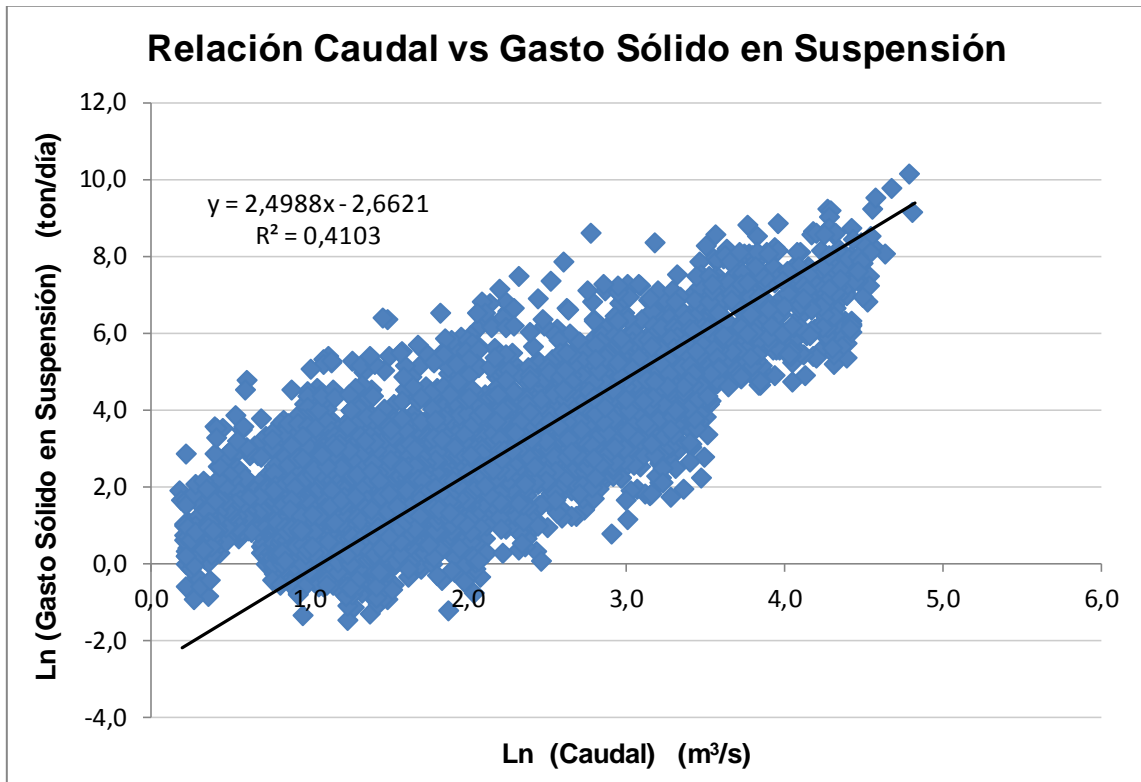


Figura 7.18 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Choapa en Cuncumén.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Choapa en Cuncumén corresponde a $G_{sd} = 0,070 Q_d^{2,499}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Choapa en Cuncumén es:

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual	45.053 (ton/año)
Caudal Medio Anual	9,77 (m^3/s)

7.1.9 Estación Río Choapa en Salamanca

Ubicación de la estación

Se encuentra en el curso medio del río Choapa, entre las juntas de los ríos Cuncumén y Chalinga, a 500 m.s.n.m. En años húmedos los mayores caudales se presentan entre Octubre y Enero, producto de los deshielos, mientras que los menores ocurren entre Marzo y Junio. En años secos los caudales se muestran más uniformes, sin mostrar variaciones considerables a lo largo del año, salvo leves aumentos entre junio y noviembre. En la Figura 7.21 se muestra la ubicación de la estación.

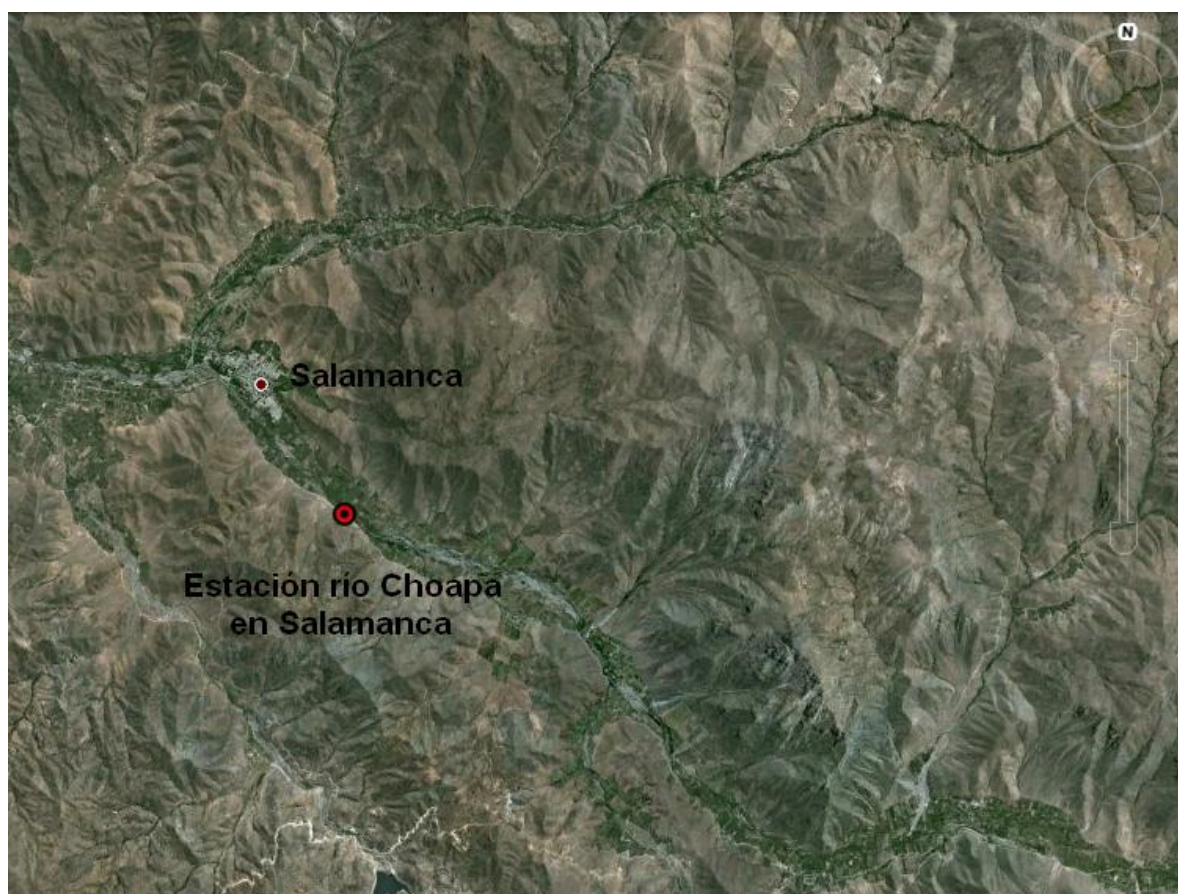


Figura 7.19 - Ubicación estación río Choapa en Salamanca.

Antecedentes básicos

a) Fluiométricos

Se cuenta con la serie de caudales medios diarios observados en la estación Río Choapa en Salamanca para el período 02/1947 - 07/1987 y 06/1994 - 07/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de las estación. En la Tabla 7.12 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.11 - Registro sedimentométricos disponibles Río Choapa en Salamanca.

Nombre Estación	Muestreos	
	Rutinarios	
	Desde	Hasta
Río Choapa en Cuncumén	10 - 1974	12 - 1979
	01 - 1982	09 - 1986

Tal como se señala en la metodología, para determinar el gasto sólidos en suspensión medio anual y el caudal medio anual, se utilizó los antecedentes básicos existentes en la estación Río Choapa en Salamanca.

Para obtener la curva de sólido en suspensión de la estación, inicialmente se determinó el gasto sólido en suspensión de la estación con los caudales medios diarios y la concentración del muestreo rutinario, buscando una relación entre los valores del gasto sólido en suspensión y los caudales, descubriendo que existe una relación potencial entre ambos. En la Figura 7.22 se presenta gráficamente la relación que existe entre ambos.

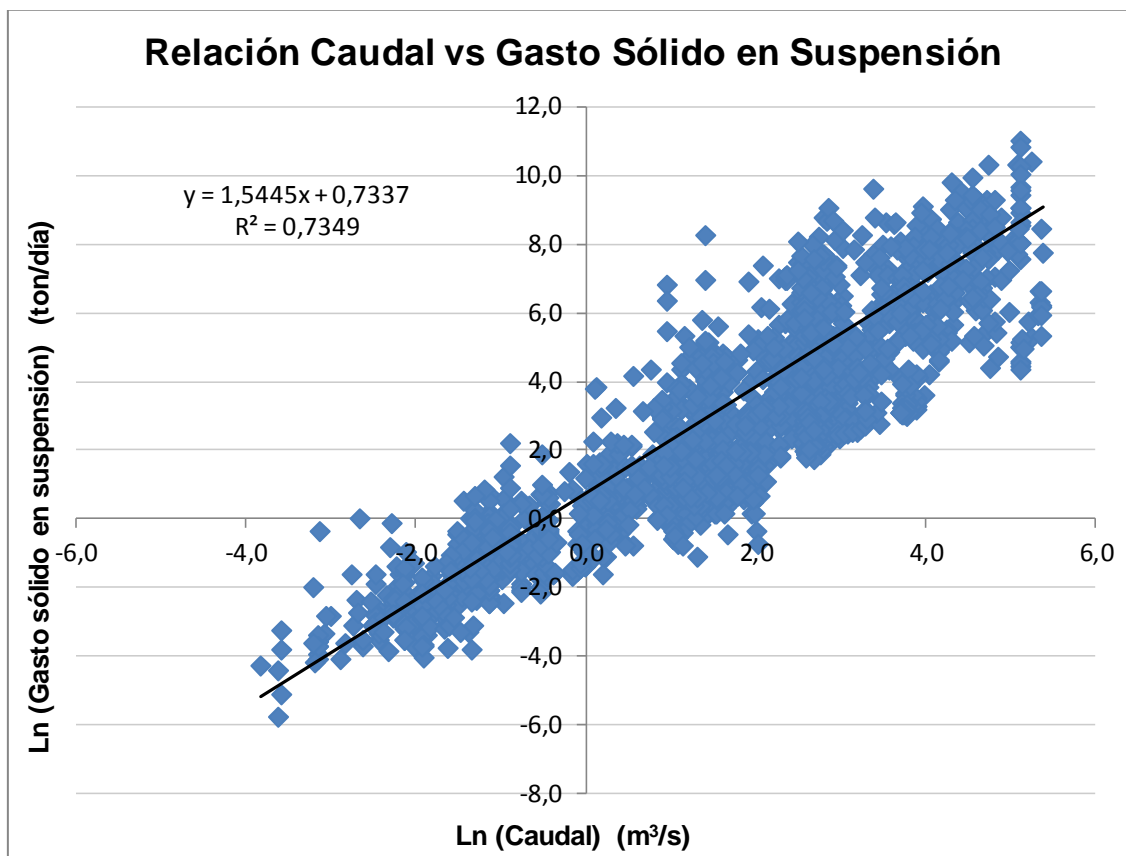


Figura 7.20 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Choapa en Salamanca.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Choapa en Salamanca corresponde a $G_{sd} = 1,268 Q_d^{1,415}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m³/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Choapa en Salamanca es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	51.030 (ton/año)
Caudal Medio Anual	9,30 (m³/s)

7.1.10 Estación Río Cogotí entrada Embalse Cogotí.

Ubicación de la estación

Se ubica en el río Cogotí, inmediatamente aguas arriba del embalse Cogotí, a 670 m.s.n.m. En años húmedos los mayores caudales se presentan entre Octubre y Diciembre, mientras que los menores lo hacen entre Febrero y Mayo. En años secos los caudales permanecen muy bajos a lo largo de todo el período, con valores menores a 250 l/s. En la Figura 7.23 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.21 – Ubicación río Cogotí entrada Embalse Cogotí.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Cogotí entrada Embalse Cogotí para el período 03/1968 - 07/1978 y 01/1980 - 11/1983 y 05/1986 - 02/2005 y 10/2007 - 12/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Cogotí entrada Embalse Cogotí. En la tabla 7.13 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.12 - Registros sedimentométricos Río Cogotí entrada Embalse Cogotí.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Cogotí entrada Embalse Cogotí	09 - 1967	10 - 1969	10 - 1986	09 - 1989
	07 - 1972	01 - 2012	05 - 1991	11 - 2009

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluvimétrica y sedimentométrica existente en el río Cogotí.

Inicialmente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Cogotí entrada Embalse Cogotí corresponde a $C_i = C_r^{1,148}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se obtuvo una estadística de concentraciones diarias equivalente. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluvimétrica. En la Figura 7.24 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

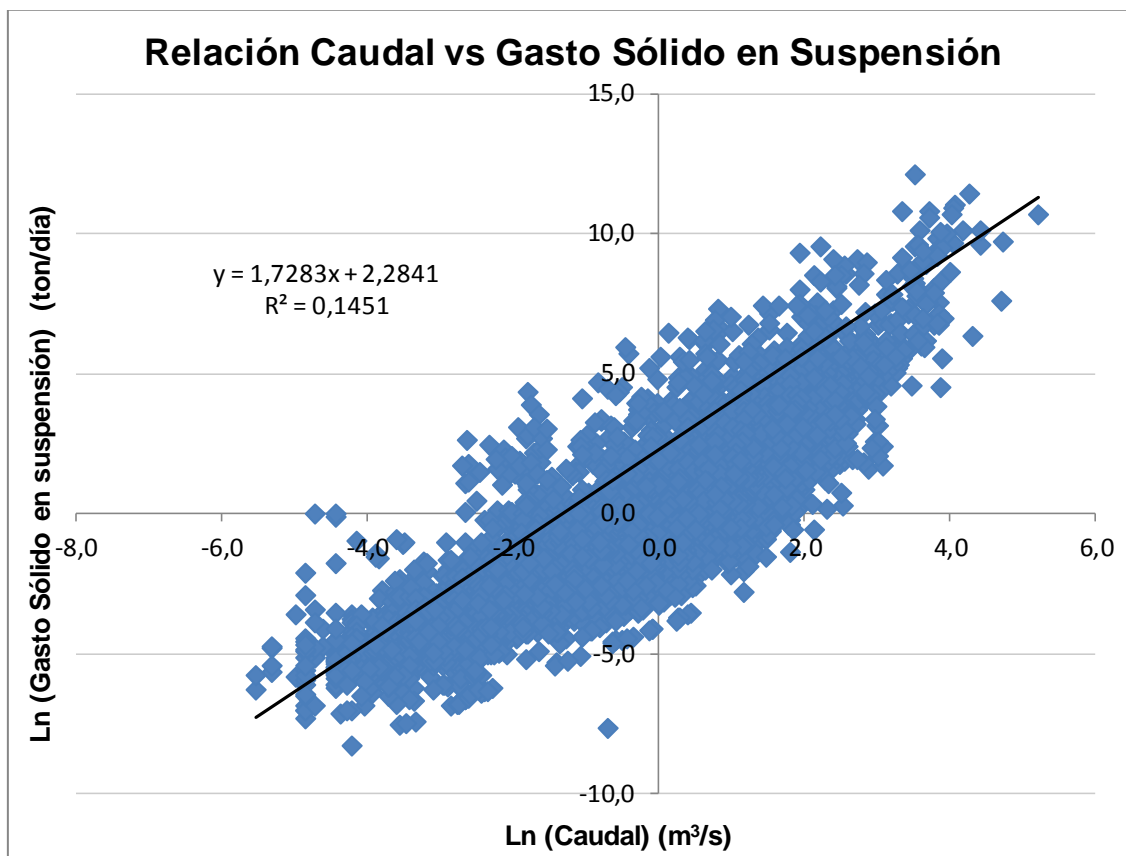


Figura 7.22 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Cogotí entrada Embalse Cogotí.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Cogotí entrada Embalse Cogotí corresponde a $G_{sd} = 9,817 Q_d^{1,728}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Cogotí entrada Embalse Cogotí es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	71.297	(ton/año)
Caudal Medio Anual	2,55	(m^3/s)

7.1.11 Estación Río Grande en Puntilla San Juan

Ubicación de la estación

La estación se ubica en el río Grande, inmediatamente aguas arriba del Embalse La Paloma, a 420 m.s.n.m. En años húmedos los mayores caudales ocurren entre Octubre y Enero, producto de deshielos, mientras que los menores lo hacen entre Marzo y Junio. Entre Julio y Agosto se presentan aumentos considerables producto de lluvias invernales. En años secos los caudales se mantienen muy bajos durante el período, con valores menores a 500 l/s, salvo leves aumentos entre Mayo y Octubre. En la Figura 7.25 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.23 – Ubicación estación Grande en Puntilla San Juan.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Grande en Puntilla San Juan para el período 01/1964 - 12/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Grande en Puntilla San Juan. En la tabla 7.14 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.13 - Registros sedimentométricos Río Grande en Puntilla San Juan.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Grande en Puntilla San Juan	05 - 1964	07 - 1992	10 - 1986	07 - 1989
	08 - 1999	12 - 2011	02 - 1993	11 - 2009

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Grande.

Primeramente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Grande en Puntilla San Juan corresponde a $C_i = C_r^{1,049}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se obtuvo una estadística de concentraciones diarias equivalente. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. En la Figura 7.26 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

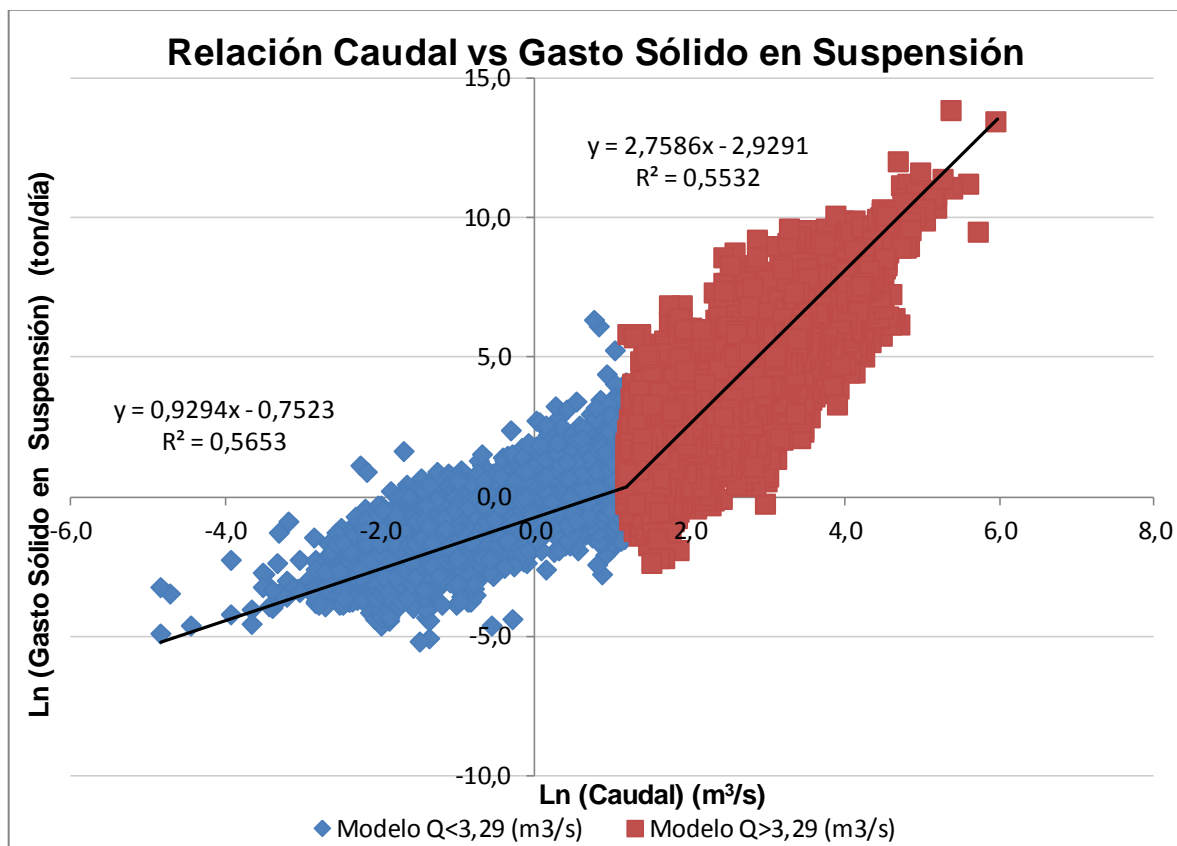


Figura 7.24 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Grande en Puntilla San Juan.

Los modelos obtenidos de gasto sólido en suspensión de la estación Río Grande en Puntilla San Juan son:

Para $Q < 3,29 \text{ m}^3/\text{s}$	$G_{sd} = 0,471 Q_d^{0,929}$	$G_{sd} \text{ (ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$
Para $Q > 3,29 \text{ m}^3/\text{s}$	$G_{sd} = 0,053 Q_d^{2,759}$	$G_{sd} \text{ (ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$

Posteriormente, con los caudales medios diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Grande en Puntilla San Juan es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	333.068 (ton/año)
Caudal Medio Anual	10,33 (m³/s)

7.1.12 Estación Río Hurtado en Angostura de Pangue

Ubicación de la estación

Su ubicación se encuentra en el río Hurtado, 25 Km. aguas abajo de La Cortadera y 10 Km. aguas arriba de la entrada al embalse Recoleta, a 485 m.s.n.m. En años húmedos los mayores caudales se presentan entre Noviembre y Enero, mientras que los menores lo hacen entre Abril y Septiembre. En años secos se hacen más importantes los aportes pluviales, ya que los mayores caudales ocurren entre Junio y Agosto, producto de lluvias invernales. En la Figura 7.27 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.25 – Ubicación estación Río Hurtado en Angostura de Pangue.

Antecedentes básicos

a) Fluiométricos

Se cuenta con la serie de caudales medios diarios observados en la estación Río Hurtado en Angostura de Pangue para el período 01/1967 - 12-2006 y 01/2009 - 02/2009, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de las estación. En la Tabla 7.15 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.14 - Registro sedimentométricos disponibles Río Hurtado en Angostura de Pangué.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Hurtado en Angostura de Pangué	02 - 1984	01 - 2012	10 - 1986	09 - 1989
			02 - 1993	11 - 2009

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Hurtado.

Inicialmente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Hurtado en Angostura de Pangué corresponde a $C_i = C_r^{1,136}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se obtuvo una estadística de concentraciones diarias equivalente, al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. En la Figura 7.28 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

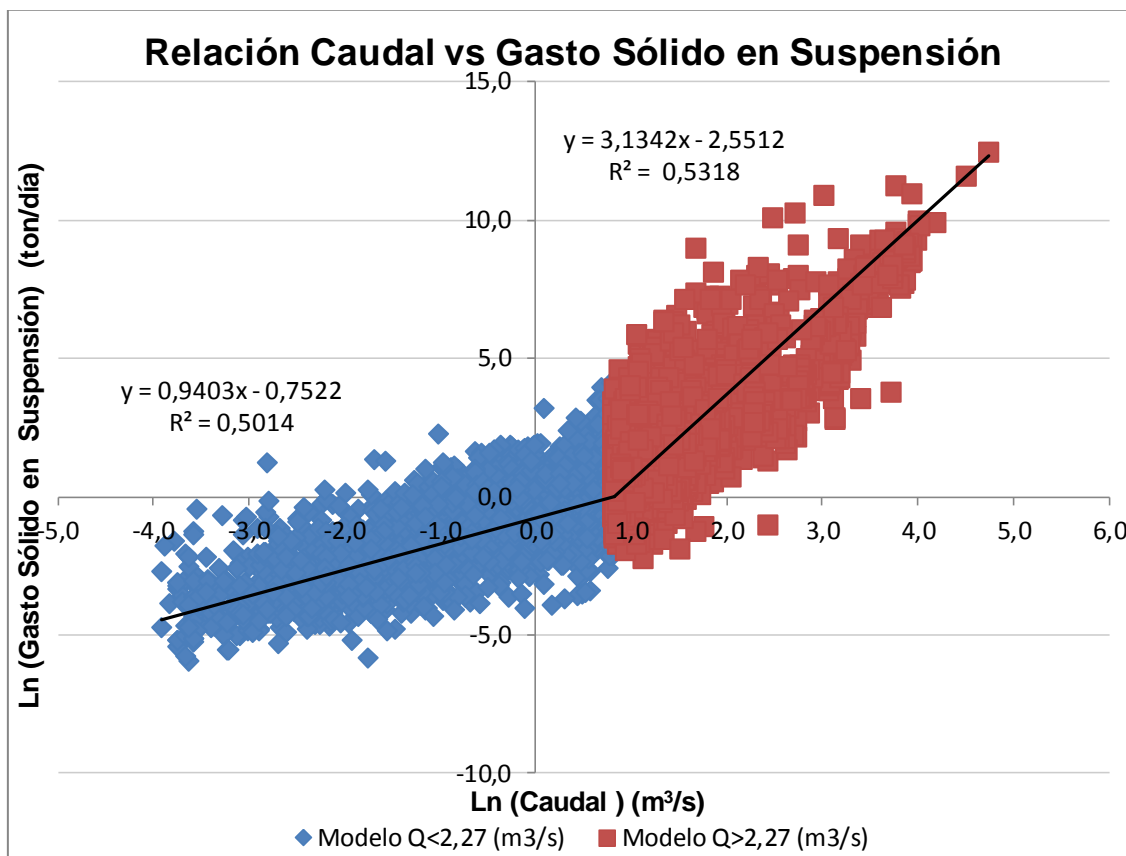


Figura 7.26 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Hurtado en Angostura de Pangué.

Los modelos obtenidos de gasto sólido en suspensión de la estación Río Hurtado en Angostura de Pangué son:

Para $Q < 2,27 \text{ m}^3/\text{s}$	$G_{sd} = 0,471 Q_d^{0,940}$	$G_{sd} \text{ (ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$
Para $Q > 2,27 \text{ m}^3/\text{s}$	$G_{sd} = 0,078 Q_d^{3,134}$	$G_{sd} \text{ (ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Hurtado en Angostura de Pangué es:

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual	72.560 (ton/año)
Caudal Medio Anual	2,94 (m³/s)

7.1.13 Estación Río Turbio en Varillar.

Ubicación de la estación

La estación se encuentra en el río Turbio, aguas arriba de la junta del río Turbio con el río Claro. Está ubicada a 860 m.s.n.m. Los menores caudales se presentan en meses de invierno, entre Junio y Agosto. Figura 7.29 se muestra la ubicación de la estación.

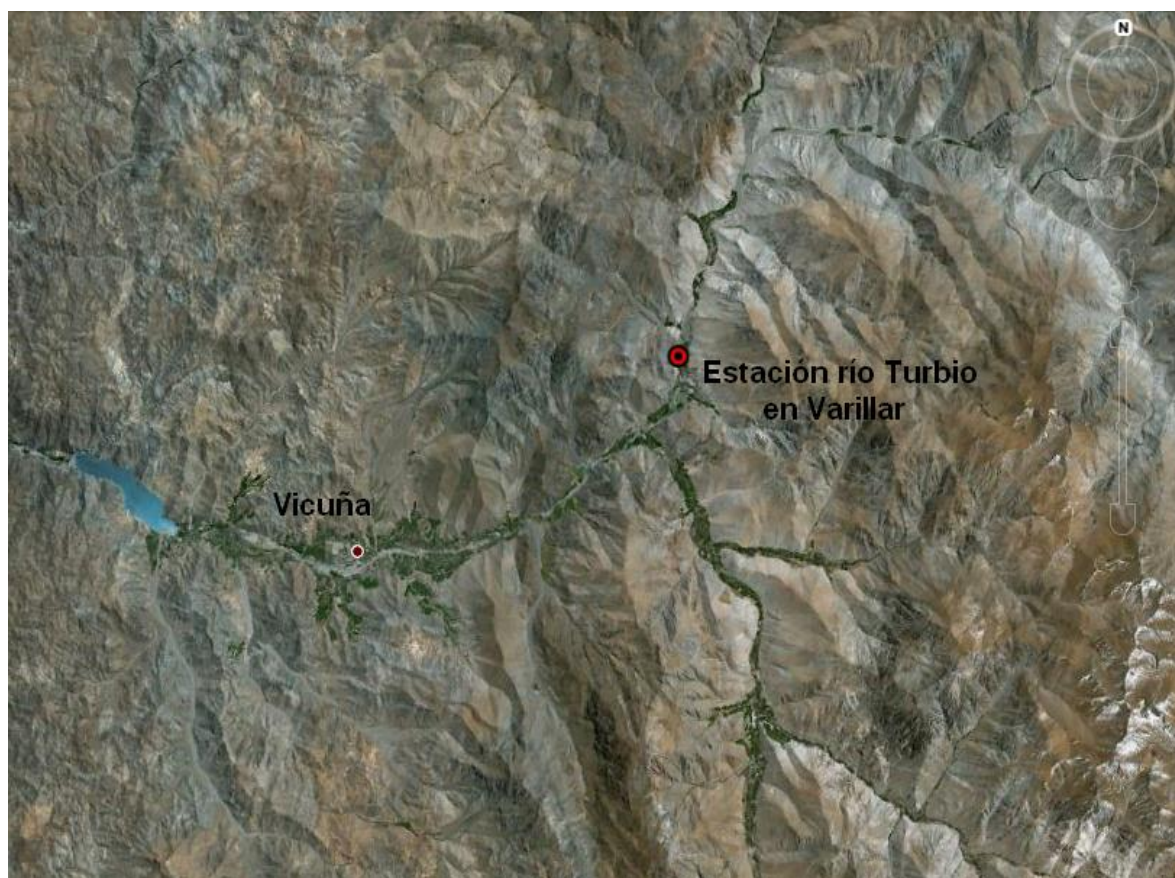


Figura 7.27 - Ubicación estación río Turbio en Varillar

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Turbio en Varillar para el período 04/1979 - 02/2005 y 01/2009 - 12/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Turbio en Varillar. En la tabla 7.16 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.15 - Registros sedimentométricos Río Turbio en Varillar.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Turbio en Varillar	02 - 1999	01 - 2012	01 - 1999	12 - 2009

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Turbio.

Primeramente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Turbio en Varillar corresponde a $C_i = C_r^{1,027}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se obtuvo una estadística de concentraciones diarias equivalente. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. En la Figura 7.30 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

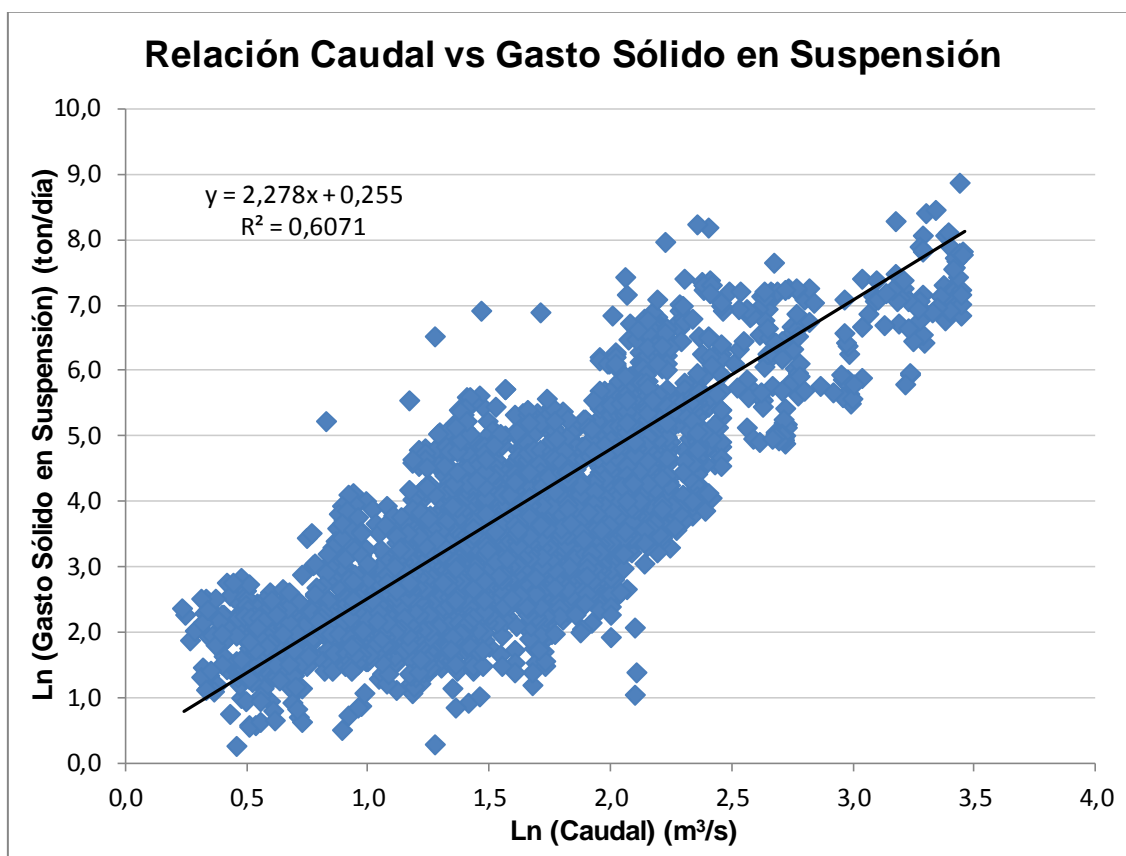


Figura 7.28 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Turbio en Varillar.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Turbio en Varillar corresponde a $G_{sd} = 1,290 Q_d^{2,278}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Turbio en Varillar es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	124.214 (ton/año)
Caudal Medio Anual	6,91 (m^3/s)

7.1.14 Estación Río Blanco en río Blanco

Ubicación de la estación

Se ubica en el río Blanco, inmediatamente antes de la junta con el río Juncal, a 1420 m.s.n.m. Sus mayores caudales se presentan entre Noviembre y Febrero, mientras que los menores ocurren entre Mayo y Agosto. En la Figura 7.31 se muestra la ubicación de la estación.

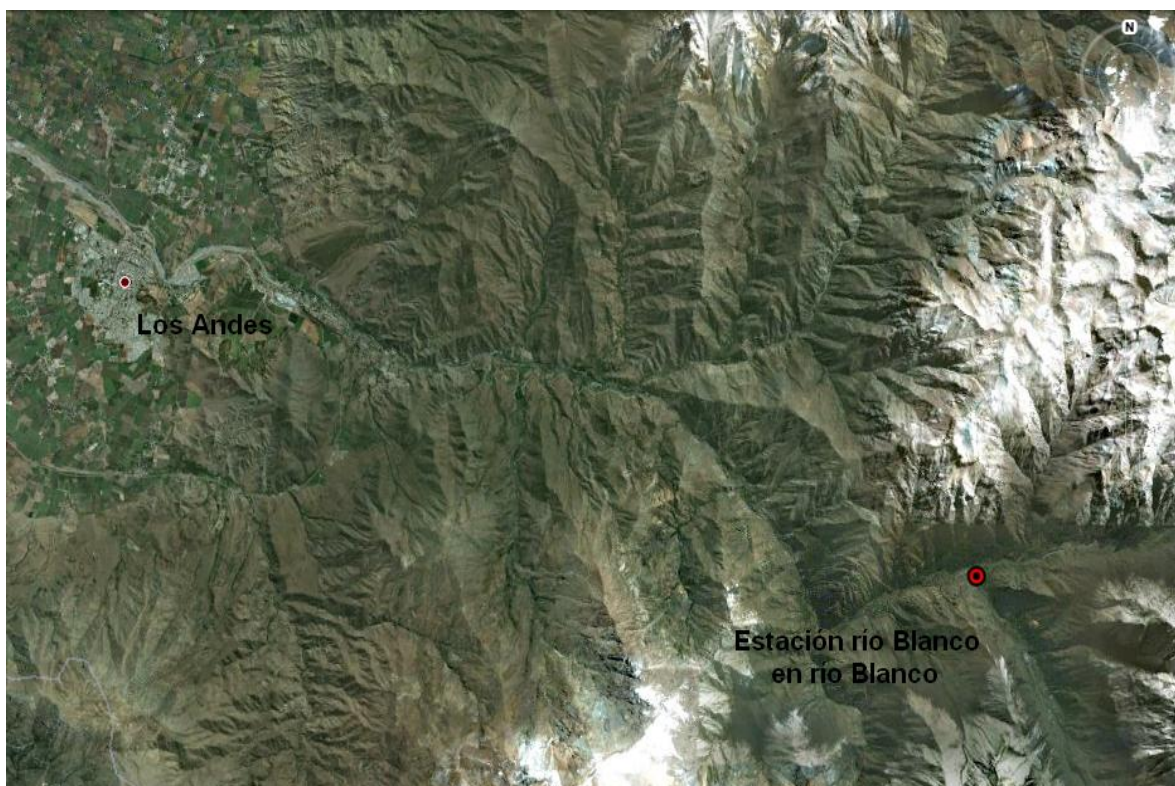


Figura 7.29 – Ubicación estación Río Blanco en río Blanco

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con la serie de caudales medios diarios observados en la estación Río Blanco en río Blanco para el período 04/1970 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de las estación. En la Tabla 7.17 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.16- Registro sedimentométricos disponibles Río Blanco en río Blanco.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Blanco en río Blanco	03 - 1966	09 - 1994	08- 1986	07 - 1996

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Blanco.

Inicialmente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes. En el Anexo 1, se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Blanco en río Blanco corresponde a $C_i = C_r^{0,949}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios se obtuvo una estadística de concentraciones diarias equivalente, al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. En la Figura 7.32 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

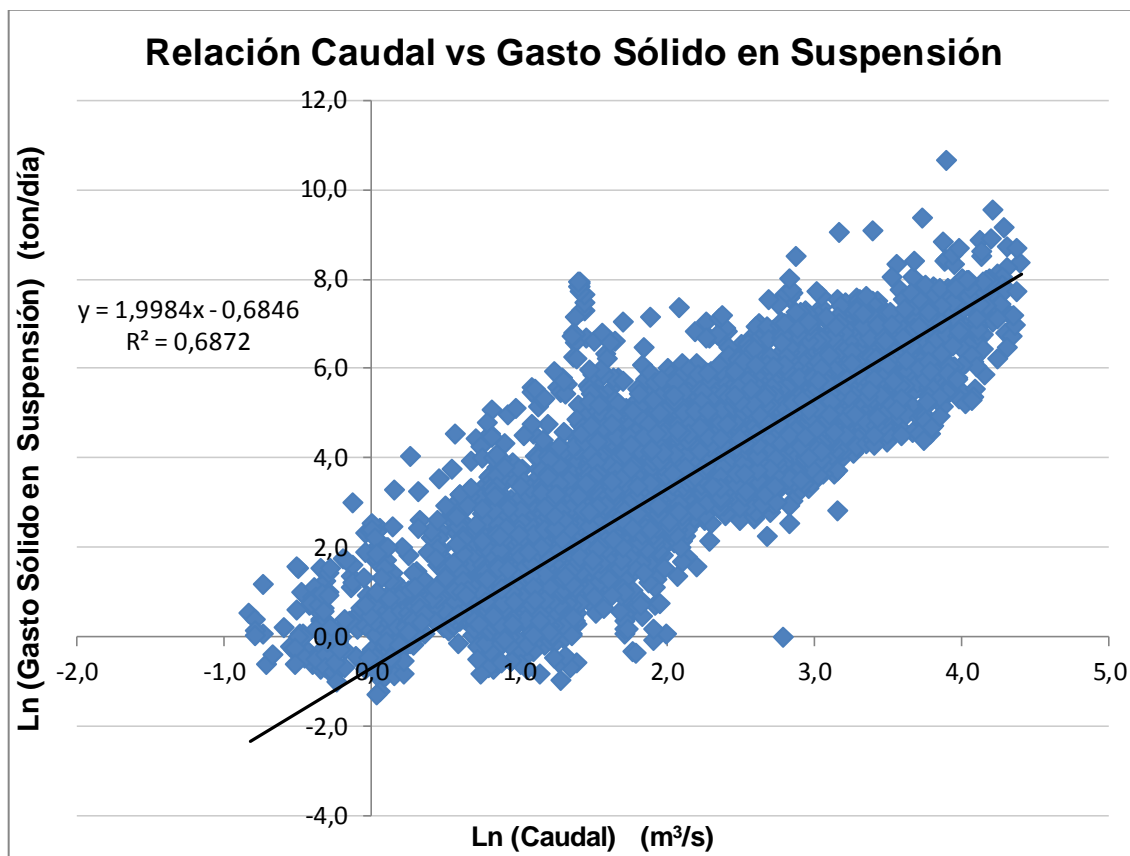


Figura 7.30 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Blanco en río Blanco.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Blanco en río Blanco corresponde a $G_{sd} = 0,504 Q_d^{1,998}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Blanco en río Blanco es:

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual	42.068 (ton/año)
Caudal Medio Anual	10,40 (m^3/s)

7.1.15 Estación Río Putaendo en Resguardo los Patos

Ubicación de la estación

La estación se encuentra en el nacimiento del río Putaendo, formado por la reunión del río Rocín y el estero Chalaco, a 1218 m.s.n.m. En años húmedos los mayores caudales ocurren entre Octubre y Febrero, producto de deshielos, mientras que los menores se presentan entre Abril y Junio. En años secos los caudales permanecen bajos durante todo el año, sin mostrar variaciones importantes. Se producen leves aumentos de caudales entre Octubre y Diciembre. En la Figura 7.33 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.31 - Ubicación estación río Putaendo en Resguardo Los Patos.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Putaendo en Resguardo Los Patos para el período 01/1960 - 09/1998, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación río Putaendo en Resguardo Los Patos. En la tabla 7.18 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.17 - Registros sedimentométricos río Putaendo en Resguardo Los Patos.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Putaendo en Resguardo los Patos	05-1966	12-1989	03-1993	04-1999
	01-1993	03-1999		

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Putaendo.

Inicialmente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes, descubriendo que existe una marcada relación potencial entre ambos. En el Anexo 1 se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Putaendo en resguardo los Patos corresponde a $C_i = C_r^{0,971}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y las estadísticas de concentraciones de muestreos rutinarios se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación Putaendo en Resguardo Los Patos con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. Con ello se formó la curva del gasto sólido en suspensión de la estación mostrado en la figura 7.34.

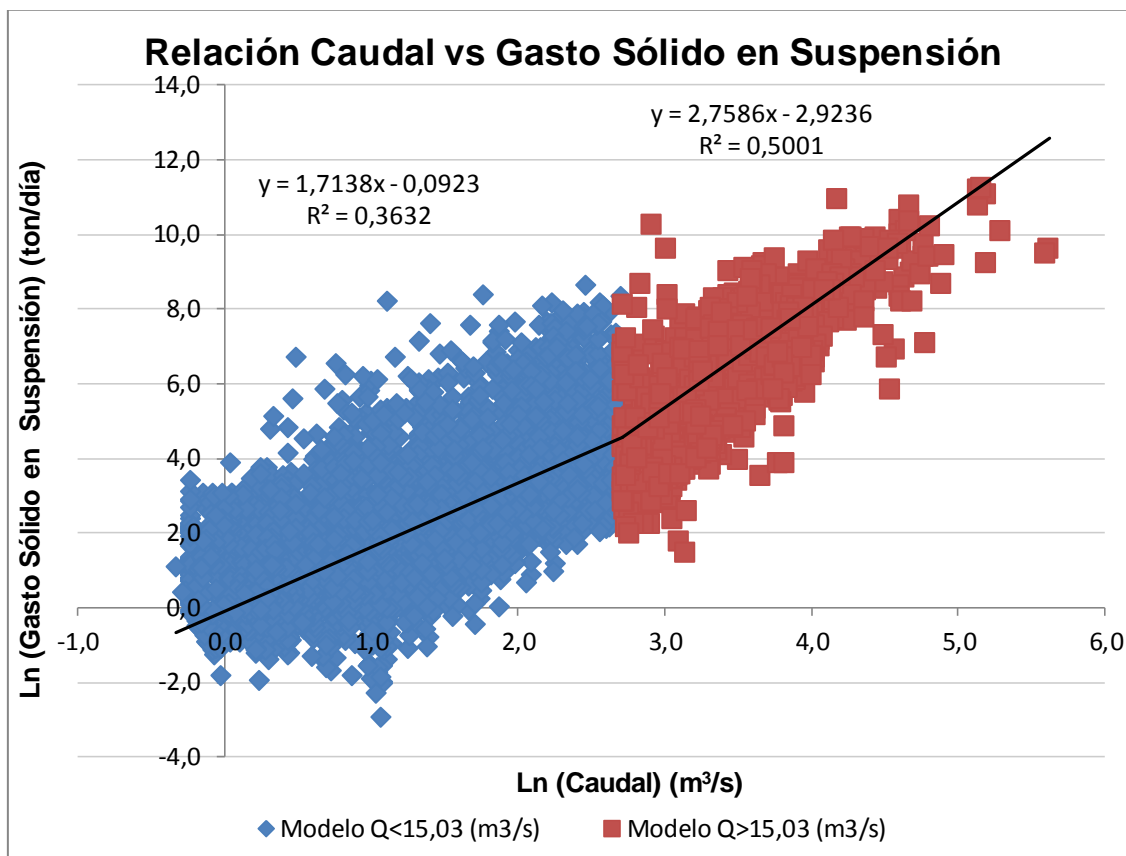


Figura 7.32 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Putaendo en Resguardo los Patos.

Los modelos obtenidos de gasto sólido en suspensión de la estación Río Putaendo en Resguardo los Patos son:

Para $Q < 15,03$ m^3/s	$G_{sd} = 0,912 Q_d^{1,714}$	G_{sd} (ton/día); Q_d (m^3/s)
Para $Q > 15,03$ m^3/s	$G_{sd} = 0,054 Q_d^{2,759}$	G_{sd} (ton/día); Q_d (m^3/s)

Posteriormente, se confeccionó la curva de duración de caudales, con base en la estadística de caudales medios diarios, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Putaendo en Resguardo los Patos es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	130.947 (ton/año)
Caudal Medio Anual	8,71 (m^3/s)

7.1.16 Estación Río Aconcagua en Chacabuquito.

Ubicación de la estación

La estación se encuentra en el río Aconcagua, unos 8 Km. aguas arriba de la ciudad de Los Andes, a 1030 m.s.n.m. Es muy importante, porque es representativa del caudal del río a la entrada al valle central. Los mayores caudales se observan entre Noviembre y Febrero, producto de deshielos. El período de menores caudales, en años secos, ocurre entre Mayo y Agosto. En la Figura 7.35 se muestra la ubicación de la estación.

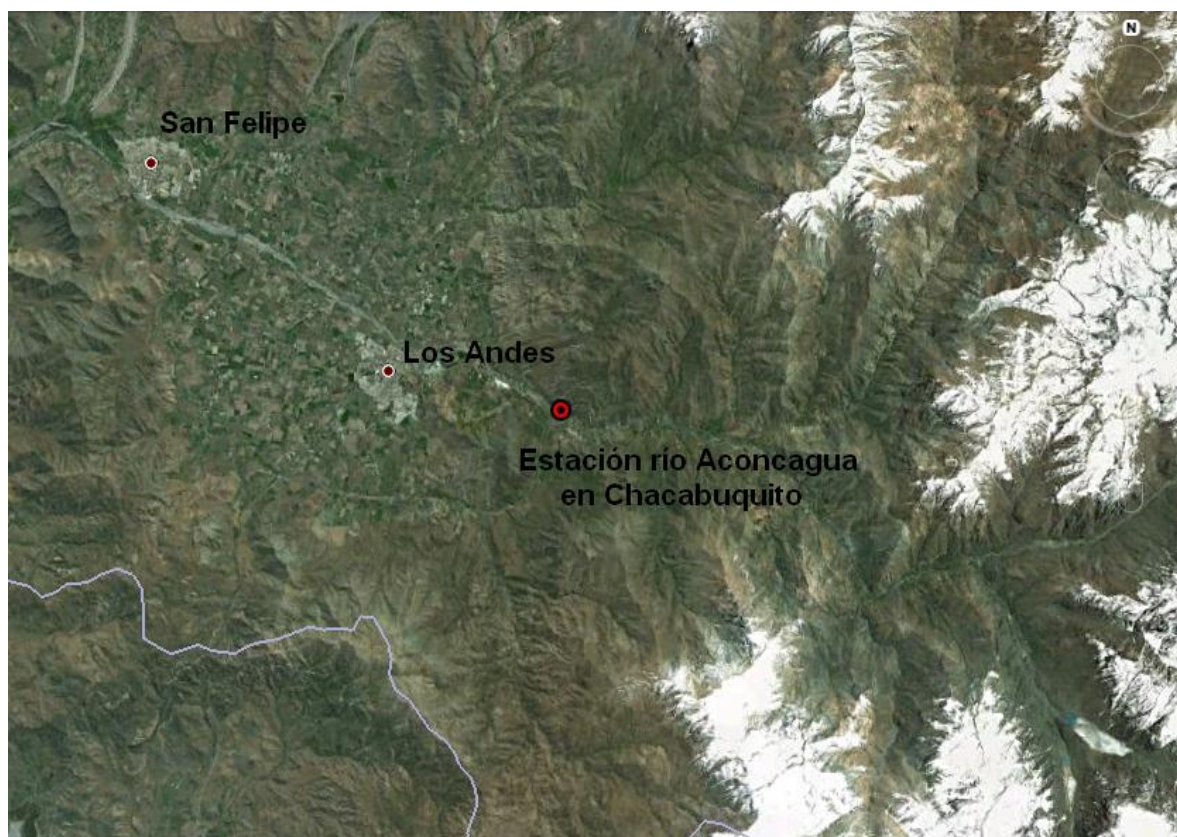


Figura 7.33 – Ubicación estación Río Aconcagua en Chacabuquito.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medio diarios observados en la estación Río Aconcagua en Chacabuquito para el período 01/1966 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación. En la Tabla 7.19 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.18 - Registros sedimentométricos Río Aconcagua en Chacabuquito.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Aconcagua en Chacabuquito	04 -1980	12 -1989	06 -1986	06 -1991
	02 -1993	12 -1996	03 - 1993	12 -1996

Dado el método de trabajo, para determinar el gasto sólidos en suspensión medio anual y el caudal medio anual, se utilizó los antecedentes básicos existentes en la estación Río Aconcagua en Chacabuquito.

Primero se buscó una relación entre los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos rutinarios de fechas concurrentes, descubriendo que existe una relación potencial entre ambos. En el Anexo 1 se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La relación existente entre las concentraciones de la estación Río Aconcagua en Chacabuquito corresponde a $C_i = C_r^{0,907}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Posteriormente, con la relación obtenida se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados en base a la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación Aconcagua en Chacabuquito con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica, con ello se formó la curva del gasto sólido en suspensión de la estación mostrado en la figura 7.36.

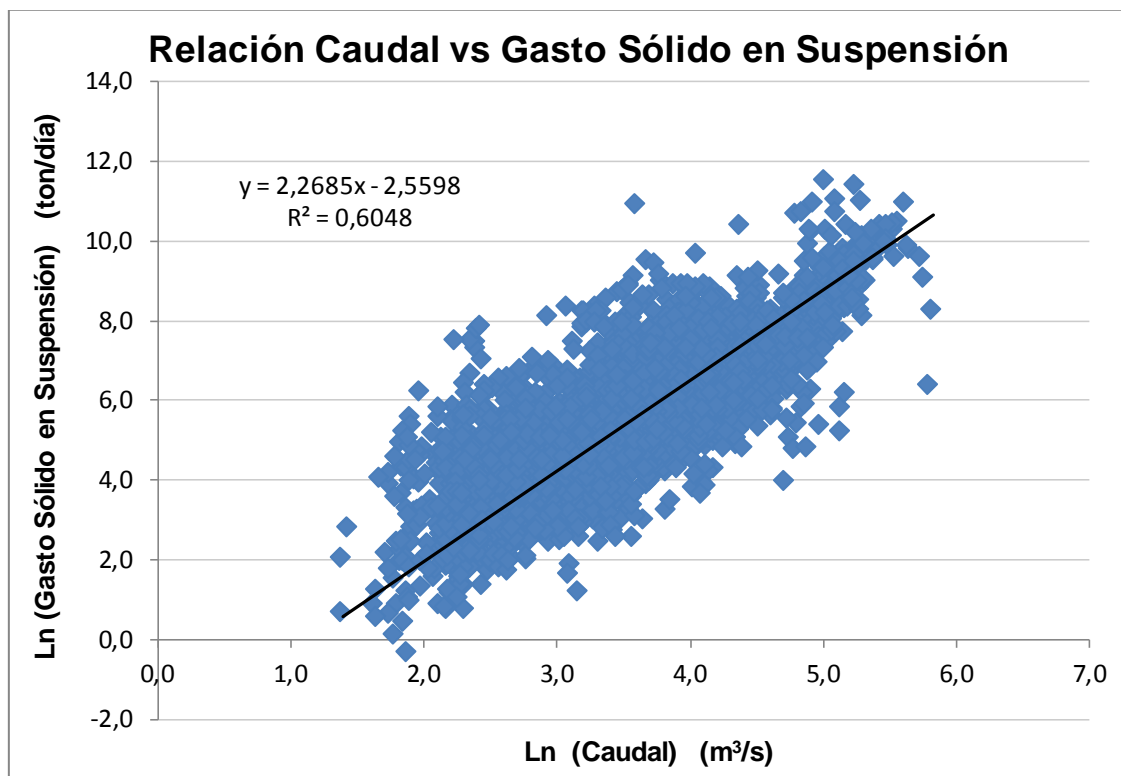


Figura 7.34 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Aconcagua en Chacabuquito.

La relación de gasto sólido en suspensión y caudal medio diario es de $G_{sd} = 0,077 Q_d^{2,269}$ donde G_{sd} esta en (ton/día) y Q_d está en (m^3/s).

Luego, se confeccionó la curva de duración de caudales, con base en la estadística de caudales medios diarios, para después integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Aconcagua en Chacabuquito es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	220.200 (ton/año)
Caudal Medio Anual	33,54 (m^3/s)

7.1.17 Estación Río Colorado antes Junta río Maipo.

Ubicación de la estación

La estación se localiza a una altura de 890 m.s.n.m., con un área de drenaje de 1.713 km². Recibe los aportes provenientes del río Olivares y de la parte alta del río Colorado. Parte de su cuenca recibe precipitación nival y la otra es de precipitación pluvial. En la Figura 7.37 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.35 - Ubicación estación río Colorado antes Junta río Maipo.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Colorado antes Junta río Maipo para el período 01/1966 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Colorado antes Junta río Maipo. En la tabla 7.20 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.19 - Registros sedimentométricos río Colorado antes Junta río Maipo.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Colorado antes Junta río Maipo	05 -1985	06 -1990	09 - 1985	05 - 1990
	06 -1993	11 -1997	02 - 1993	11 - 2007
	05 - 1999	05 - 1999		
	11 - 2003	01 - 2009		

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Colorado.

Inicialmente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes, descubriendo que existe una marcada relación potencial entre ambos. En el Anexo 1 se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación río Colorado antes Junta río Maipo corresponde a $C_i = C_r^{0,983}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadísticas de concentraciones de muestreos rutinarios se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados, al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación Río Colorado antes Junta río Maipo con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. Con ello se formó la curva del gasto sólido en suspensión de la estación mostrado en la figura 7.38.

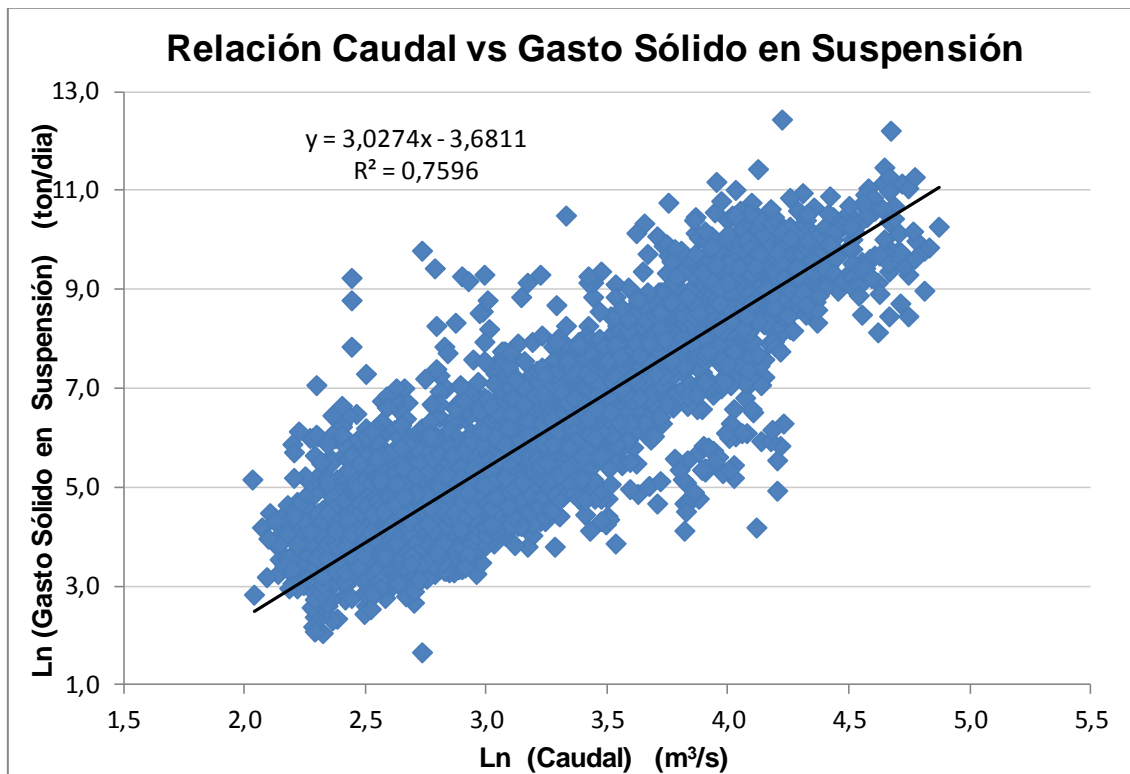


Figura 7.36 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Colorado antes Junta río Maipo.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Colorado antes Junta río Maipo corresponde a $G_{sd} = 0,025 Q_d^{3,027}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Colorado antes Junta río Maipo es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	1.009.514 (ton/año)
Caudal Medio Anual	31,65 (m^3/s)

7.1.18 Estación Río Maipo en el Manzano

Ubicación de la estación

La estación es representativa del régimen nival y ha sido elegida como patrón. Se ubica a la elevación 850 m.s.n.m., con un área de drenaje de 4.968 km². Recibe mayoritariamente las aguas provenientes del deshielo, en el período comprendido entre los meses de Noviembre y Marzo, alcanzando sus mayores registros en el mes de Enero. En la Figura 7.39 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.37 - Ubicación estación río Maipo en el Manzano.

Antecedentes básicos

a) Fluiométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Maipo en el Manzano para el período 01/1966 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación río Maipo en el Manzano. En la tabla 7.21 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.20 - Registros sedimentométricos río Maipo en el Manzano.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Maipo en el Manzano	05 - 1985	06 - 1990	09 - 1985	06 - 1990
	06 - 1993	11 - 1997	04 - 1993	04 - 2008
	05 - 1999	05 - 1999		
	11 - 2003	01 - 2009		

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluiométrica y sedimentométrica existente en el río Maipo en el Manzano.

Inicialmente se determinó el gasto de sólido en suspensión de la estación con la concentración de muestreos rutinarios y el caudal medio diario, para luego correlacionar los valores del gasto sólido en suspensión y el caudal, manifestando una marcada relación potencial entre ambos. En la Figura 7.40 se presenta gráficamente la correlación que existe entre ambos.

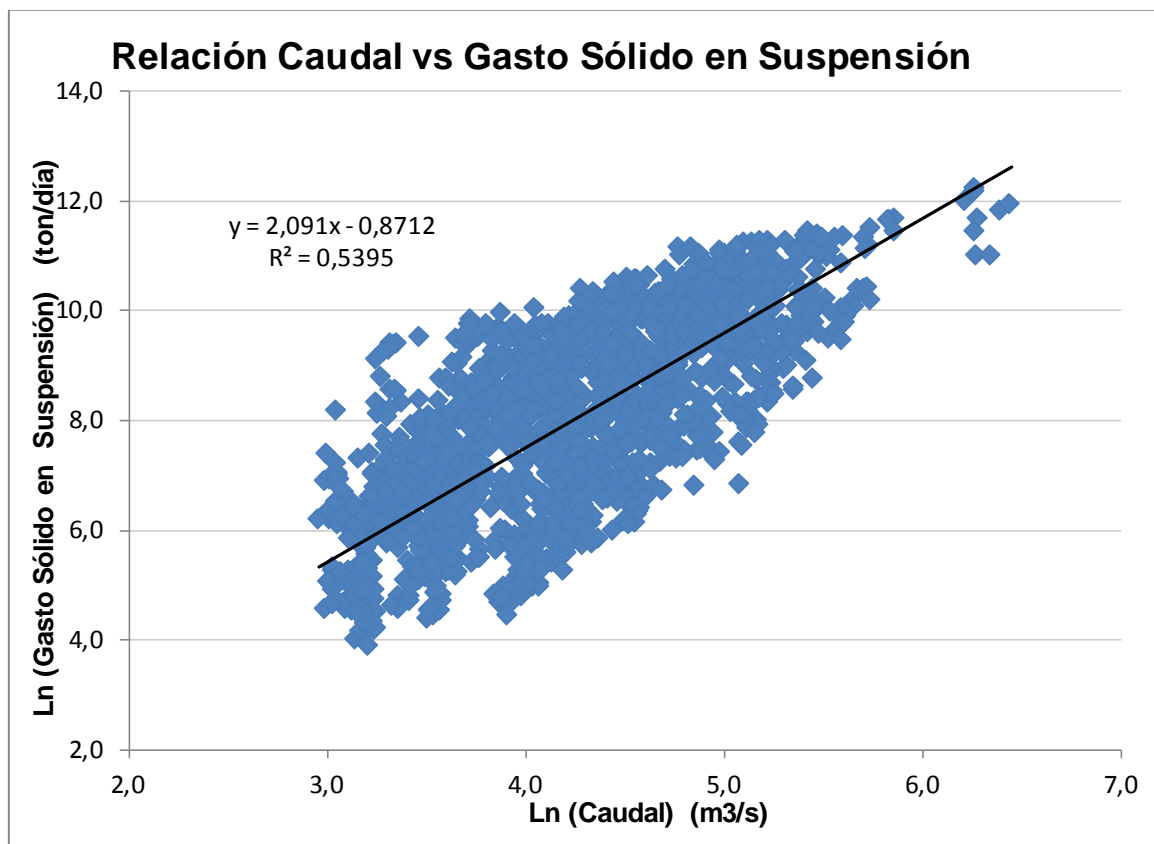


Figura 7.38 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Maipo en el Manzano.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Maipo en el Manzano corresponde a $G_{sd} = 0,418 Q_d^{2,091}$ donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medios diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Maipo en el Manzano es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	5.181.224 (ton/año)
Caudal Medio Anual	113,50 (m^3/s)

7.1.19 Estación Río Mapocho en los Almendros

Ubicación de la estación

La estación Mapocho en los Almendros se encuentra localizada a 1.024 m.s.n.m., presenta una red de drenaje de 620 km². Esta estación presenta un régimen caracterizado por el aporte menor, pero no despreciable de las precipitaciones invernales en los meses de Junio a Agosto, para presentar una marcada crecida en el mes de Noviembre con los aportes provenientes de los deshielos. En la Figura 7.41 se muestra la ubicación de la estación.

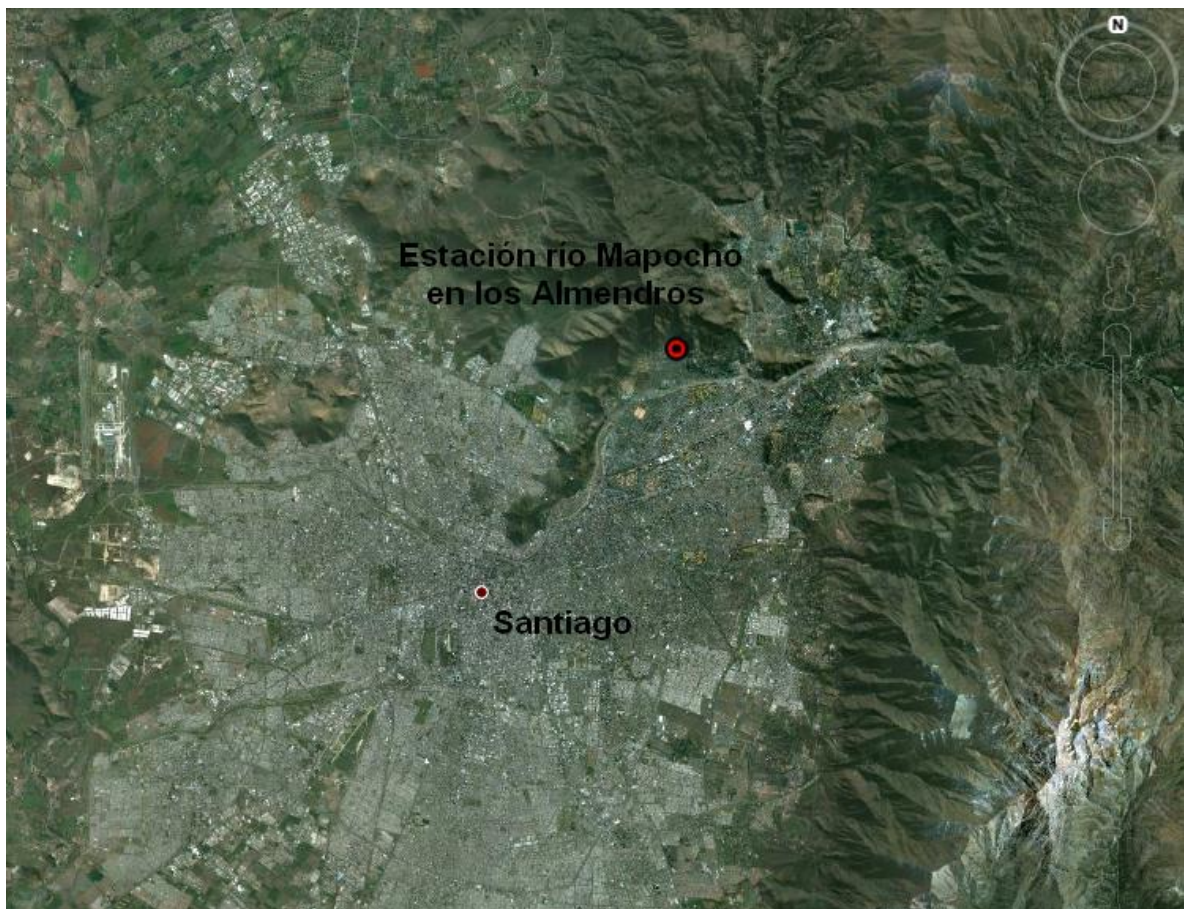


Figura 7.39 - Ubicación estación Río Mapocho en los Almendros .

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con la serie de caudales medios diarios observados en la estación Río Mapocho en los Almendros para el período 01/1966 - 10/1969 y 01/1972 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de las estación. En la Tabla 7.22 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.21 - Registro sedimentométricos disponibles Río Mapocho en los Almendros.

Nombre Estación	Muestréos Integrados	
	Desde	Hasta
Río Mapocho en los Almendros	05 - 1987	06 - 1990
	04- 1993	11 - 2007

Dado el método de trabajo, para determinar el gasto sólidos en suspensión medio anual y el caudal medio anual, se utilizó los antecedentes básicos existentes en la estación Río Mapocho en los Almendros.

Para confeccionar la curva de sólido en suspensión de la estación, primeramente se determinó el gasto sólido en suspensión de la estación con los caudales aforados y la concentración del muestreo integrado, se encontró una relación entre los valores del gasto sólido en suspensión y los caudales aforados de los muestreos integrados, descubriendo que existe una relación potencial entre ambos. En la Figura 7.42 se presenta gráficamente la relación que existe entre ambos.

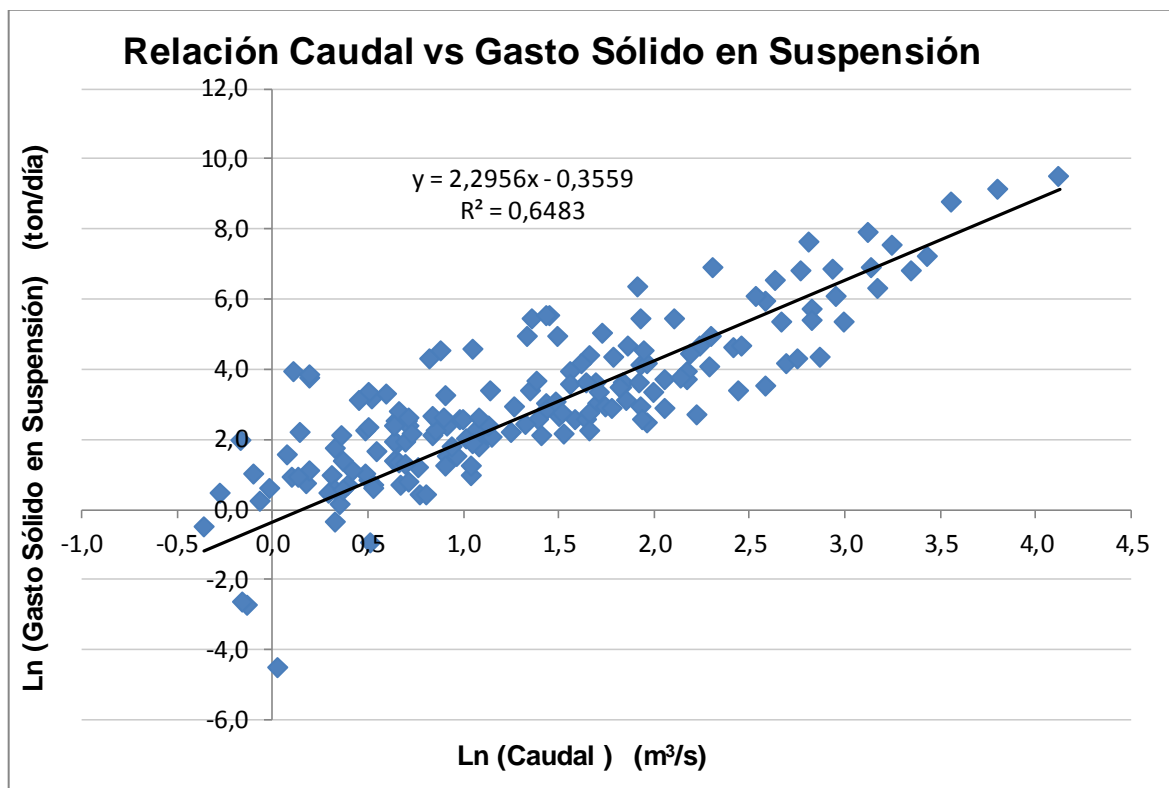


Figura 7.40 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Mapocho en los Almendros.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Mapocho en los Almendros corresponde a $G_{sd} = 0,701 Q_d^{2,296}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medios diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Mapocho en los Almendros es:

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual	89.014 (ton/año)
Caudal Medio Anual	6,76 (m^3/s)

7.1.20 Estación Río Mapocho Rinconada de Maipú

Ubicación de la estación

La estación Mapocho en Rinconada de Maipú se encuentra en el valle central, a 420 m.s.n.m., con una red de drenaje de 4068 km². La estación se encuentra aguas abajo de la entrega que hace el Canal San Carlos, por lo que los caudales registrados por esta estación reflejan la gran intervención antrópica que representa esta obra. En la Figura 7.43 se muestra la ubicación de la estación.

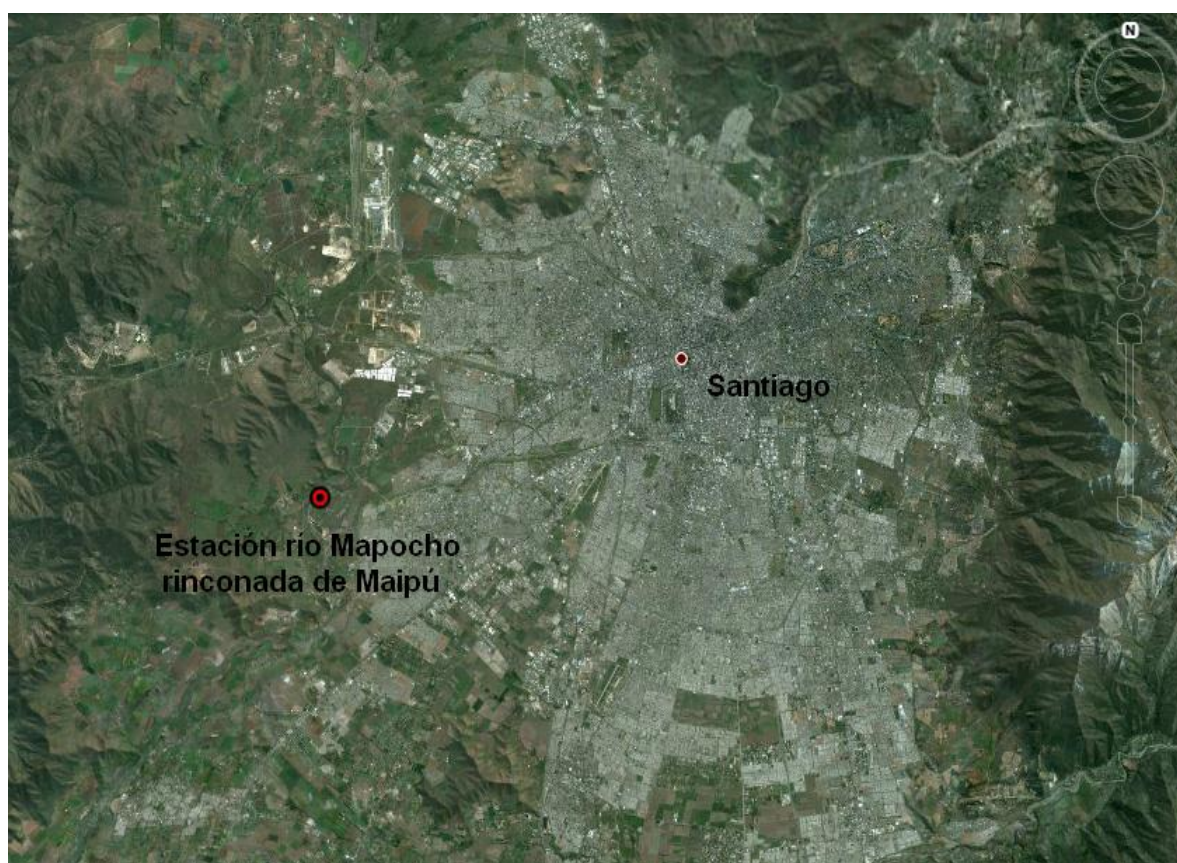


Figura 7.41 - Ubicación estación Río Mapocho Rinconada de Maipú.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con la serie de caudales medios diarios observados en la estación Río Mapocho Rinconada de Maipú para el período 01/1966 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de las estación. En la Tabla 7.23 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.22 Registro sedimentométricos disponibles Río Mapocho Rinconada de Maipú.

Nombre Estación	Muestras Integrados	
	Desde	Hasta
Río Mapocho Rinconada de Maipú	09 - 1985	06 - 1990
	02 - 1993	11 - 2007

Tal como se señala en la metodología, para determinar el gasto sólidos en suspensión medio anual y el caudal medio anual, se utilizó los antecedentes básicos existentes en la estación Río Mapocho Rinconada de Maipú.

Para obtener la curva de sólido en suspensión de la estación, inicialmente se determinó el gasto sólido en suspensión de la estación con los caudales aforados y la concentración del muestreo integrado, buscando una relación entre los valores del gasto sólido en suspensión y los caudales aforados de los muestreos integrados, descubriendo que existe una relación potencial entre ambos. En la Figura 7.44 se presenta gráficamente la relación que existe entre ambos.

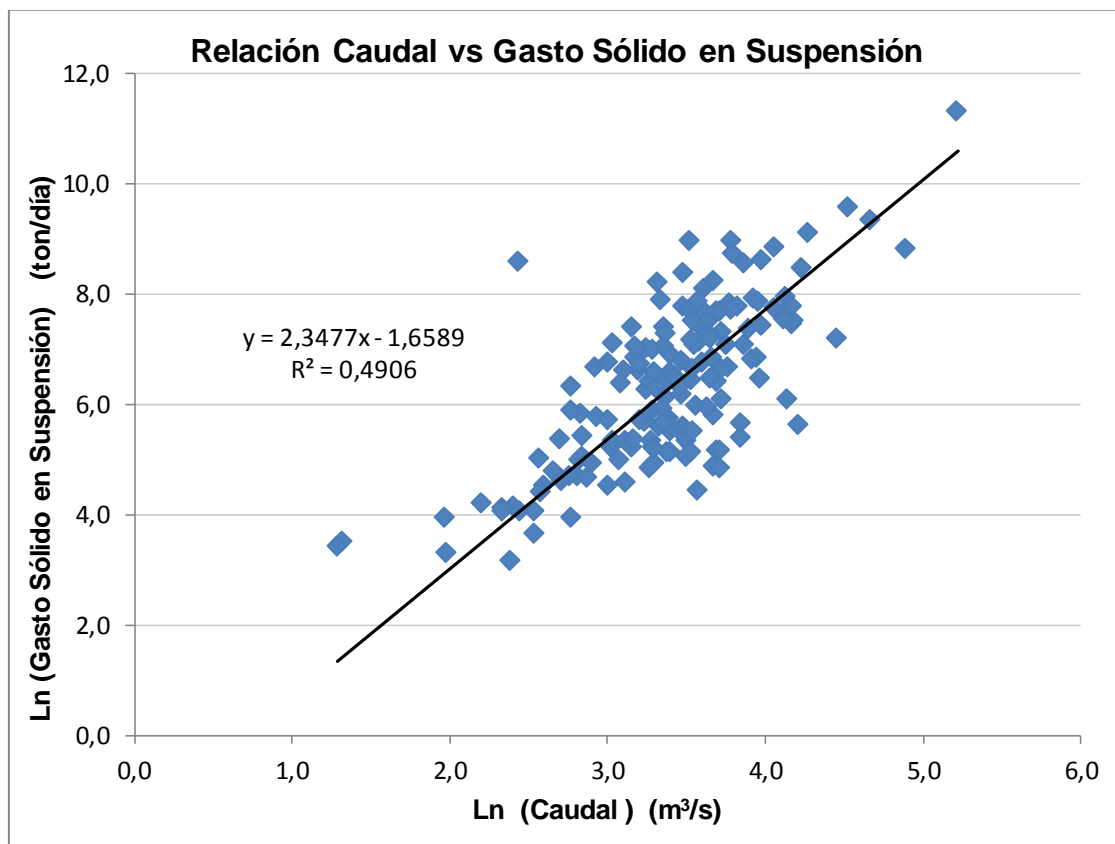


Figura 7.42 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Mapocho Rinconada de Maipú.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Mapocho Rinconada de Maipú corresponde a $G_{sd} = 0,190 Q_d^{2,348}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Mapocho Rinconada de Maipú es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	605.374 (ton/año)
Caudal Medio Anual	29,63 (m^3/s)

7.1.21 Estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo.

Ubicación de la estación

Se ubica en el estero Chimbarongo, a 245 m.s.n.m. En años húmedos los mayores caudales ocurren entre Junio y Julio, sin embargo entre Noviembre y Diciembre se presentan caudales semejantes, producto de deshielos. En años secos, se observan dos períodos de mayores caudales, entre Junio y Agosto, producto de lluvias, y entre Noviembre y Diciembre, debido a deshielos. Los menores caudales ocurren entre Febrero y Abril. En la Figura 7.45 se muestra la ubicación de la estación.

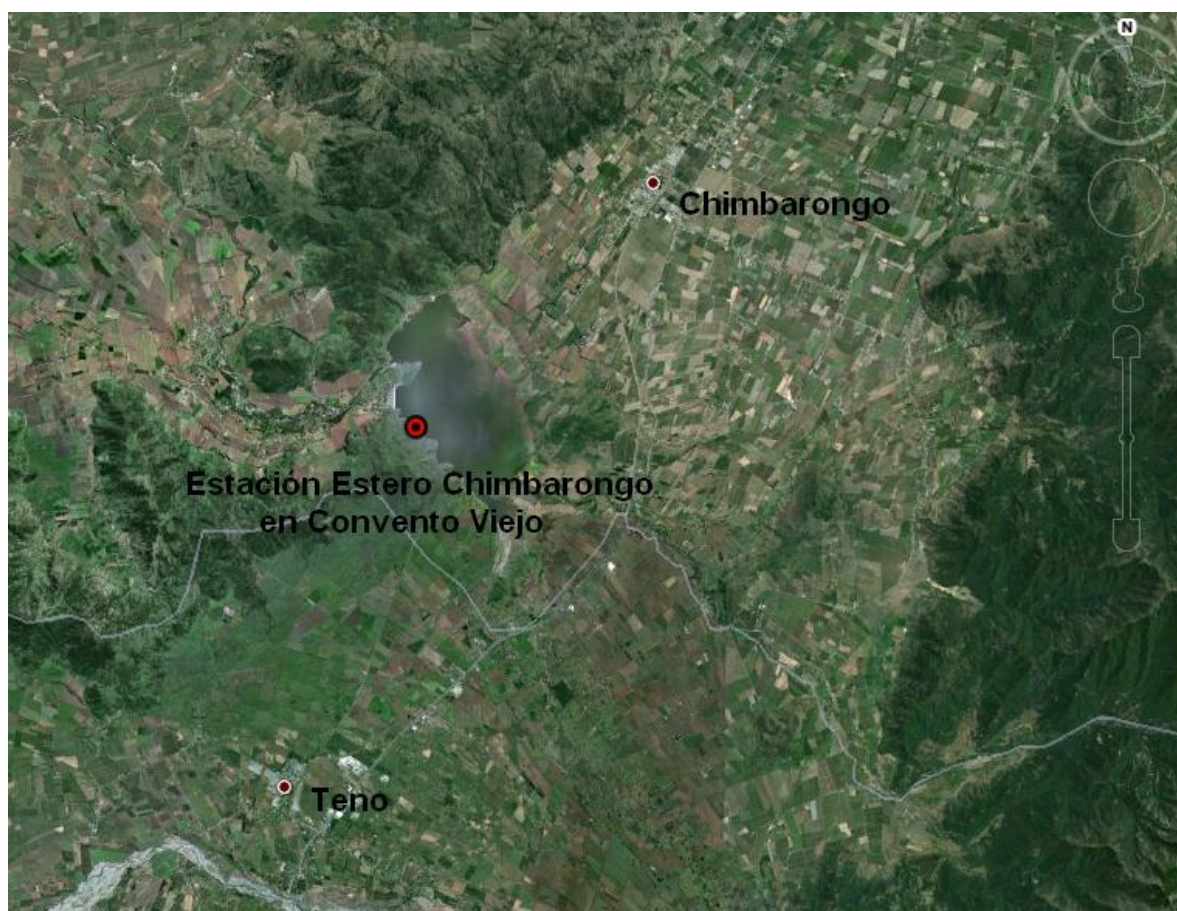


Figura 7.43 - Ubicación estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo.

Antecedentes básicos

a) Fluiométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo para el período 01/1974 - 12/1993, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo. En la tabla 7.24 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.23 - Registros sedimentométricos Estero Chimbarongo en Convento Viejo.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Estero Chimbarongo en Convento Viejo	04 -1977	08 -1979	08 - 1989	04 - 1990
	08 -1989	05 -1990		

Dado el método de trabajo, para determinar el gasto sólidos en suspensión medio anual y el caudal medio anual, se utilizó los antecedentes básicos existentes en la estación.

Primero se buscó una relación entre los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos rutinarios de fechas concurrentes, descubriendo que existe una relación potencial entre ambos. En el Anexo 1 se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La relación existente entre las concentraciones de la estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo corresponde a $C_i = C_r^{0,979}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Posteriormente, con la relación obtenida se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados en base a la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluiométrica, con ello se formó la curva del gasto sólido en suspensión de la estación mostrado en la figura 7.46.

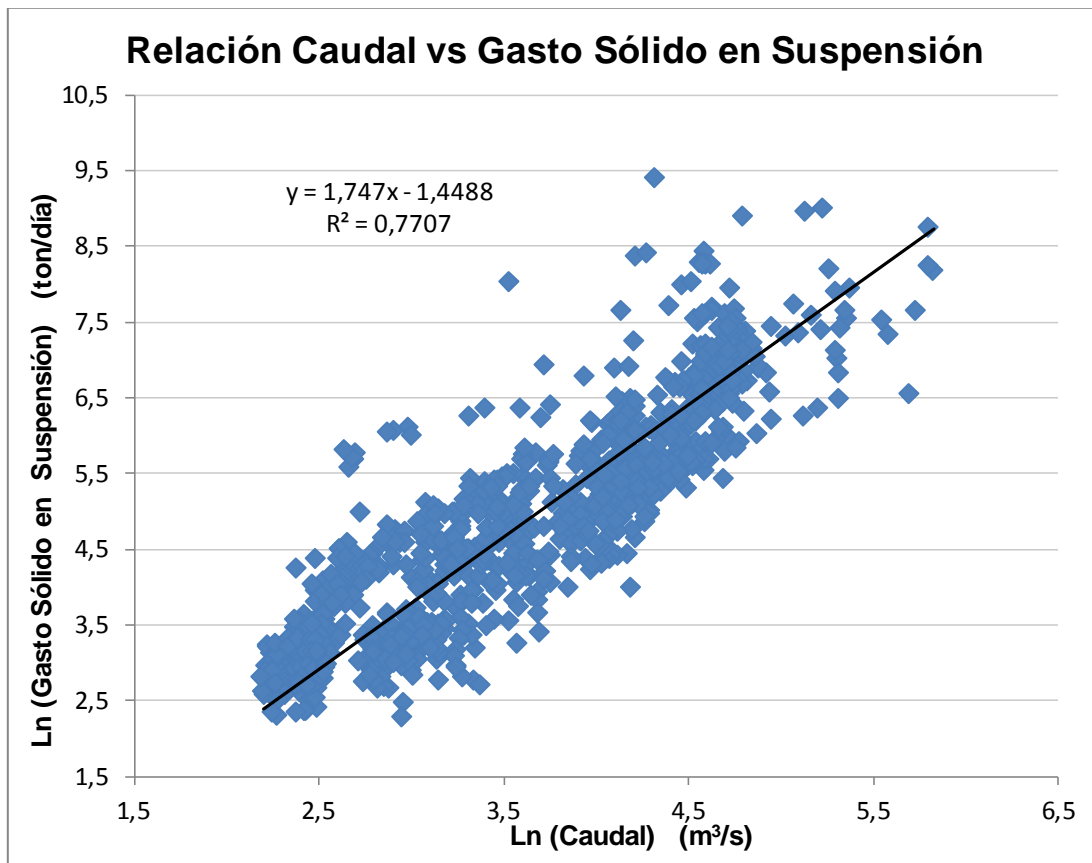


Figura 7.44 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo corresponde a $G_{sd} = 0,235 Q_d^{1,747}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Estero Chimbarongo en Convento Viejo es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	112.823 (ton/año)
Caudal Medio Anual	48,77 (m^3/s)

7.1.22 Estación Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes

Ubicación de la estación

La estación fluviométrica se ubica unos 3 km. aguas arriba de la estación río Claro en Campamento. En años húmedos, los mayores caudales se presentan entre Mayo y Octubre, producto de intensas lluvias en el valle, pero en Diciembre y Enero también se presentan crecidas de consideración debido a deshielos cordilleranos. Los menores caudales ocurren entre Febrero y Abril. En años secos los caudales son más parejos a lo largo del año, presentando dos períodos de leves aumentos, entre Junio y Agosto, y entre Noviembre y Enero. En la Figura 7.45 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.45 - Ubicación estación río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Cachapoal en Pte. Termas de Cauquenes para el período 09/2002 - 08/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes. En la tabla 7.25 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.24 - Registros sedimentométricos Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes	10 -1974	08 -1989	02 - 2003	11 - 2009
	02 -2003	10 -2008		

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluviométrica y sedimentométrica existente en el río Cachapoal.

Inicialmente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes, descubriendo que existe una marcada relación potencial entre ambos. En el Anexo 1 se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes corresponde a $C_i = C_r^{1,004}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadísticas de concentraciones de muestreos rutinarios se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados, al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica. Con ello se formó la curva del gasto sólido en suspensión de la estación mostrado en la figura 7.48.

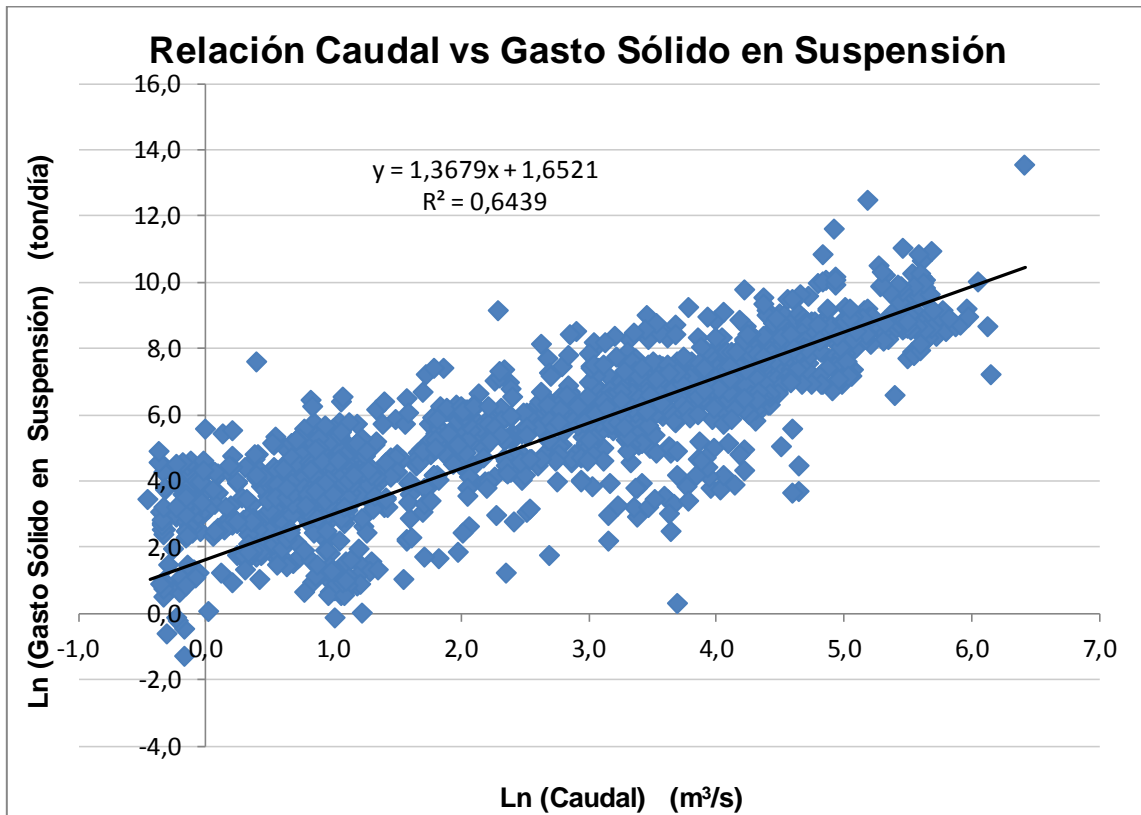


Figura 7.46 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes corresponde a $G_{s,d} = 5,218 Q_d^{1,368}$ donde $G_{s,d}$ es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medios diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Cachapoal en Puente Termas en Cauquenes es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	508.253	(ton/año)
Caudal Medio Anual	42,41	(m^3/s)

7.1.23 Estación Río Tinguiririca Bajo los Briones

Ubicación de la estación

La estación se encuentra en el río Tinguiririca, aguas arriba de la confluencia del río Claro, a 518 m.s.n.m. En años húmedos, los mayores caudales se producen entre Noviembre y Enero, producto de deshielos, sin embargo en Junio y Julio se observan caudales muy importantes, debido a lluvias invernales. En años secos, disminuye notablemente la influencia pluvial, observándose bajos caudales desde Abril a Septiembre, momento en el que comienzan a aumentar considerablemente los caudales debido a la influencia nival. En la Figura 7.49 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.47 - Ubicación estación Río Tinguiririca Bajo los Briones .

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con la serie de caudales medios diarios observados en la estación Río Tinguiririca Bajo los Briones para el período 01/1974 - 03/1982 y 12/1984 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del M.O.P.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de las estación. En la Tabla 7.26 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.25 - Registro sedimentométricos disponibles Río Tinguiririca Bajo los Briones.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Tinguiririca Bajo los Briones	08 - 1989	04 - 1990	08 - 1989	04 - 1990
	02 - 1993	10 - 2008	02- 1994	11 - 2009

Dado el método de trabajo, para determinar el gasto sólidos en suspensión medio anual y el caudal medio anual, se utilizó los antecedentes básicos existentes en la estación.

Primero se buscó una relación entre los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos rutinarios de fechas concurrentes, descubriendo que existe una relación potencial entre ambos. En el Anexo 1 se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La relación existente entre las concentraciones de la estación Río Tinguiririca Bajo los Briones corresponde a $C_i = C_r^{1,089}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Posteriormente, con la relación obtenida se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados en base a la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación Río Tinguiririca Bajo los Briones con las concentraciones equivalentes, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluvimétrica, con ello se formó la curva del gasto sólido en suspensión de la estación mostrada en la figura 7.50.

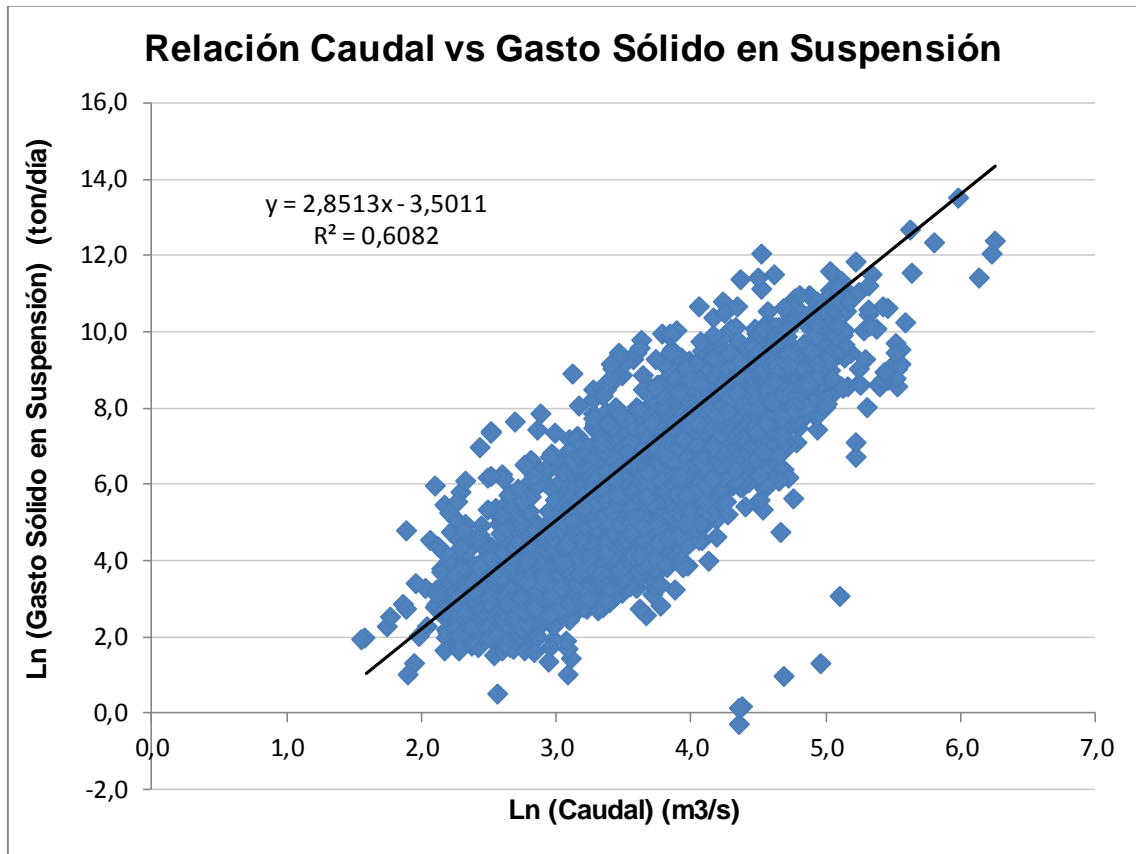


Figura 7.48 - Relación entre gastos sólidos en suspensión y caudales aforados obtenidos de muestreos integrados en la estación Río Tinguiririca Bajo los Briones.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Tinguiririca Bajo los Briones corresponde a $G_{sd} = 0,030 Q_d^{2,851}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medio diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Tinguiririca Bajo los Briones es:

Gasto Sólido en Suspensión Medio Anual	2.971.317	(ton/año)
Caudal Medio Anual	52,80	(m^3/s)

7.1.24 Estación Río Loncomilla en las Brisas.

Ubicación de la estación

La estación fluviométrica se ubica en el río Loncomilla, aguas abajo de la junta de la confluencia del río Putagán, a 92 m.s.n.m. Los mayores caudales se observan en meses de invierno, producto de los importantes aportes pluviales existentes en la zona. En años húmedos los mayores caudales ocurren entre Mayo y Agosto, producto de lluvias invernales, mientras que los menores lo hacen entre Enero y Marzo. En años secos los mayores caudales también se observan en los meses de invierno, entre Junio y Agosto, mientras que los menores ocurren entre Enero y Abril. En la Figura 7.51 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.49 - Ubicación estación Río Loncomilla en las Brisas.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación Río Loncomilla en las Brisas para el período 05/1975 - 07/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Loncomilla en las Brisas. En la tabla 7.27 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.26 - Registros sedimentométricos Río Loncomilla en las Brisas.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Loncomilla en las Brisas	06 - 1985	09 - 2008	06 - 1985	12 - 2009

Como se señala en la metodología, para estimar el arrastre de sólidos en suspensión se debió utilizar la información fluvimétrica y sedimentométrica existente en el río Loncomilla.

Inicialmente se correlacionó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes, descubriendo que existe una marcada relación potencial entre ambos. En el Anexo 1 se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La correlación existente entre las concentraciones de la estación Río Loncomilla en las Brisas corresponde a $C_i = C_r^{0,912}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Luego, con el modelo obtenido y la estadísticas de concentraciones de muestreos rutinarios se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados, al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación Río Loncomilla en las Brisas con las concentraciones equivalente, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluvimétrica. Con ello se formó la curva del gasto sólido en suspensión de la estación mostrado en la figura 7.52.

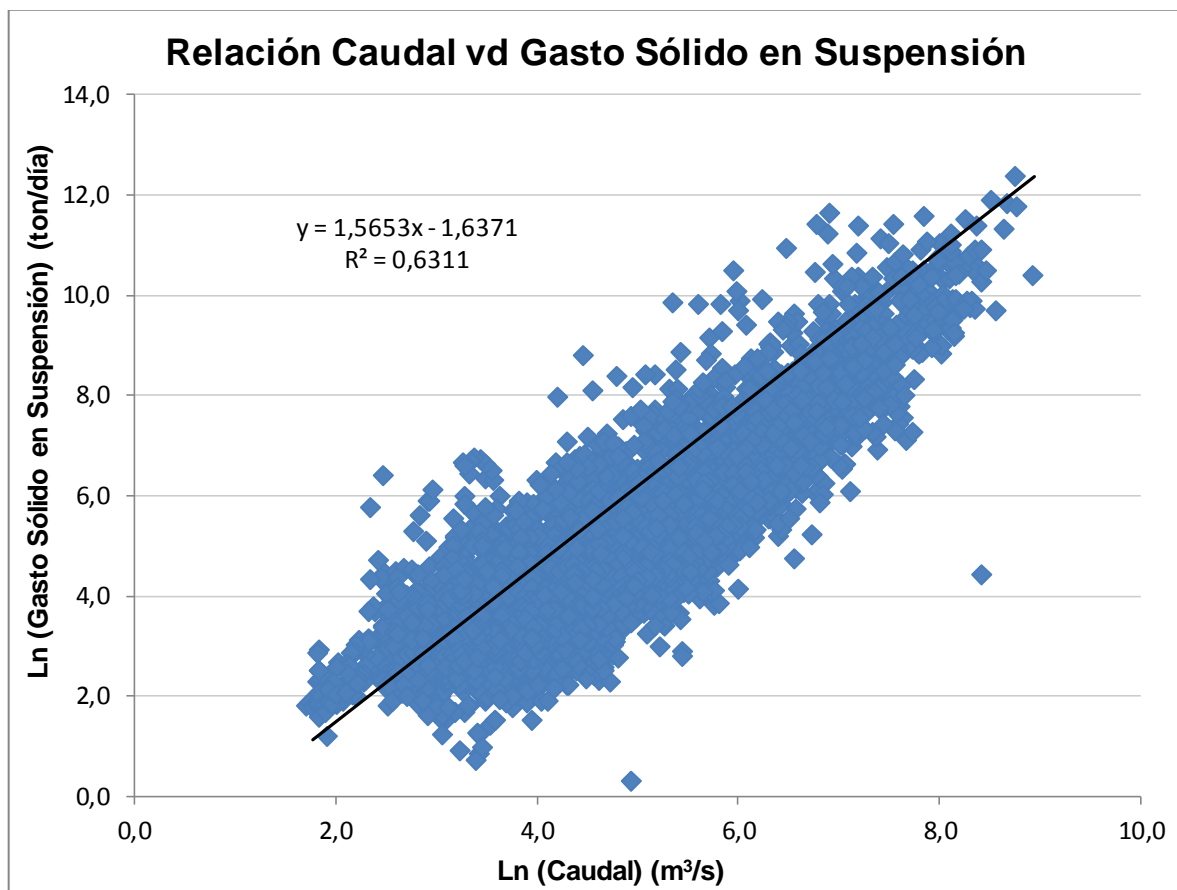


Figura 7.50 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Loncomilla en las Brisas.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Loncomillas en las Brisas corresponde a $G_{sd} = 0,195 Q_d^{1,565}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medios diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Loncomillas en las Brisas es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	947.771	(ton/año)
Caudal Medio Anual	273,38	(m^3/s)

7.1.25 Estación Río Teno después de junta con Claro

Ubicación de la estación

La estación se ubica en el río Teno, inmediatamente aguas abajo de la junta del río Claro, tal como lo indica su nombre. En años húmedos los mayores caudales ocurren entre Noviembre y Enero, producto de deshielos, y en menor medida entre Junio y Julio debido a lluvias invernales. Los menores escurrimientos se observan entre Febrero y Abril. En años secos los mayores caudales ocurren entre Octubre y Diciembre, producto de deshielos primaverales, mientras que los menores caudales se observan entre Febrero y Junio. En la Figura 7.53 se muestra la ubicación de la estación.

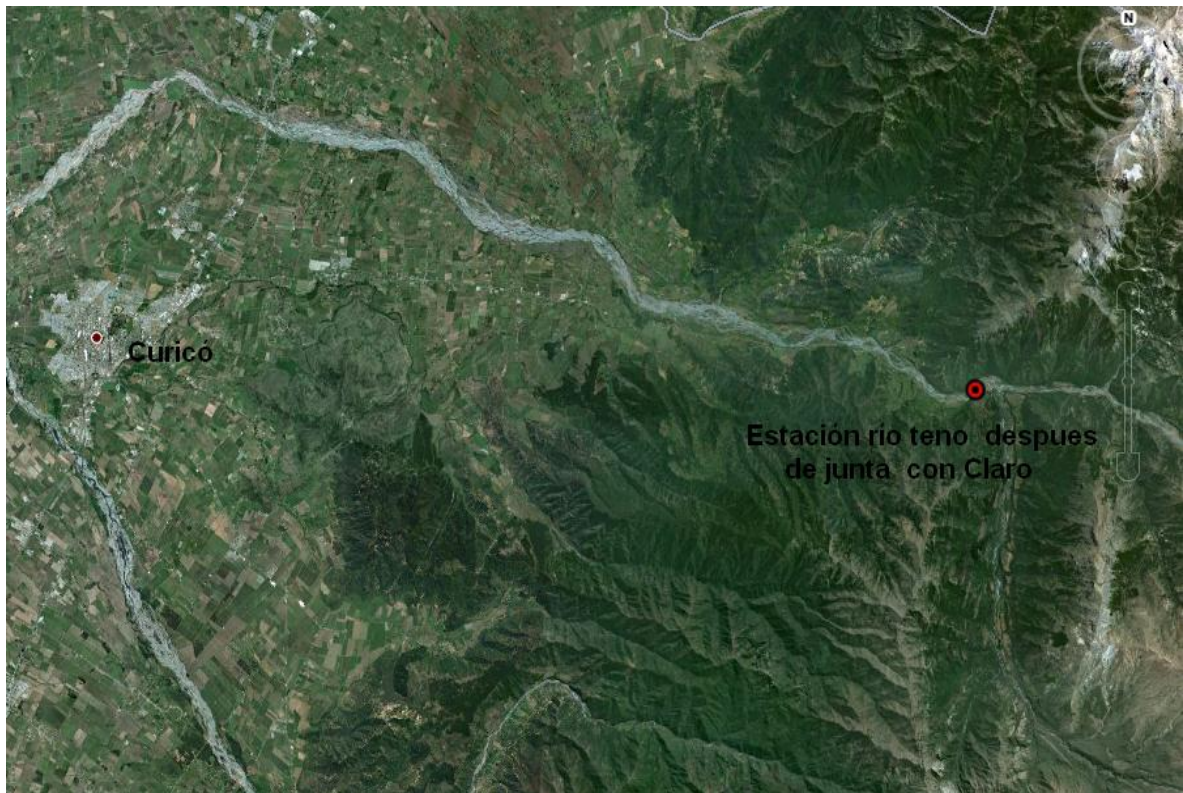


Figura 7.51 – Ubicación estación río Teno después de junta con Claro.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con las series de caudales medios diarios de la estación río Teno después de junta con Claro para el período 09/1947 - 09/2011, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de la estación Río Teno después de junta con Claro. En la tabla 7.28 se presenta el tipo de muestreo realizado y el período que abarcan los registros.

Tabla 7.27 - Registros sedimentométricos río Teno después de junta con Claro.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Teno después de junta con Claro	11 - 1976	01 - 1994	06 - 1985	01 - 2010

Dado el método de trabajo, para determinar el gasto sólidos en suspensión medio anual y el caudal medio anual, se utilizó los antecedentes básicos existentes en la estación.

Primero se buscó una relación entre los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos rutinarios de fechas concurrentes, descubriendo que existe una relación potencial entre ambos. En el Anexo 1 se presenta gráficamente la comparación de concentraciones y la relación que existe entre ambos.

La relación existente entre las concentraciones de la estación Río Teno después de junta con Claro corresponde a $C_i = C_r^{1,002}$, donde C_i es concentración de muestreos integrados en (mg/l) y C_r es concentración de muestreos rutinarios en (mg/l).

Posteriormente, con la relación obtenida se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados en base a la estadística de concentraciones de muestreos rutinarios. Luego al ser multiplicada la estadística de caudales medios diarios de la estación Río Teno después de junta con Claro con las concentraciones equivalentes, permitió confeccionar la estadística de gasto sólido en suspensión medio diario afluente a la estación fluviométrica, con ello se formó la curva del gasto sólido en suspensión de la estación mostrada en la figura 7.5

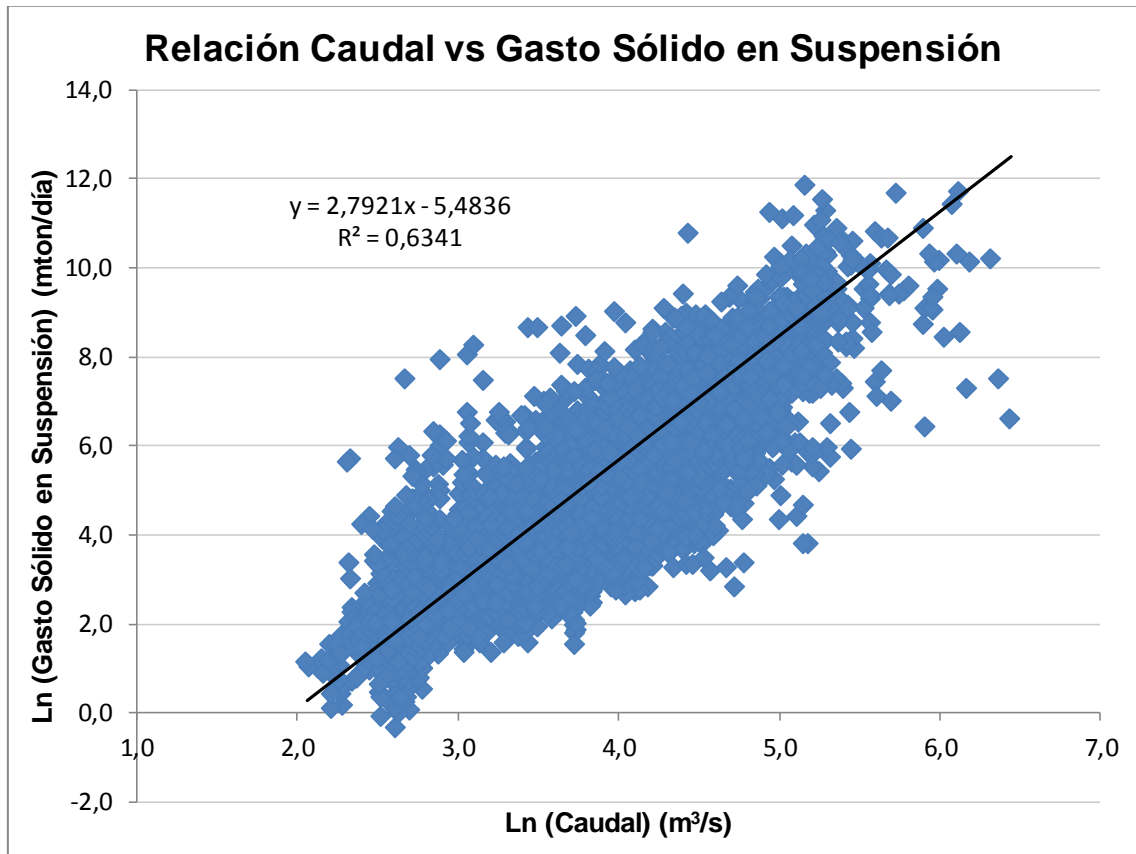


Figura 7.52 - Relación entre el caudal y el gasto sólido en suspensión en la estación Río Teno después de junta con Claro.

La curva de gasto sólido en suspensión de la estación Río Teno después de junta con Claro corresponde a $G_{sd} = 0,004 Q_d^{2,792}$, donde G_{sd} es gasto sólido en suspensión en (ton/día) y Q_d es el caudal en (m^3/s).

Posteriormente, con los caudales medios diarios de la estación se confeccionó la curva general de duración de caudales, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto sólido en suspensión medio anual y caudal medio anual afluente a la estación Río Teno después de junta con Claro es:

Gasto Sólido en suspensión Medio Anual	551.298 (ton/año)
Caudal Medio Anual	57,09 (m^3/s)

7.1.26 Estación Río Ñuble en San Fabián

Ubicación de la estación

La estación se ubica en el río Ñuble, aguas abajo de Ñuble en San Fabián, a 410 m.s.n.m. Con un carácter mixto, muestra sus mayores caudales en meses de invierno y primavera, producto de importantes aportes pluviales y nivales. En años húmedos los mayores caudales se producen entre Mayo y Junio y entre Octubre y Noviembre, producto de lluvias invernales y deshielos primaverales, respectivamente. Los menores caudales se dan entre Febrero y Abril. En años secos los mayores caudales provienen de aportes nivales, mientras que en invierno comienzan a producirse caudales de consideración. Los menores se presentan entre Enero y Mayo. En la Figura 7.55 se muestra la ubicación de la estación.



Figura 7.53 - Ubicación estación río Ñuble en San Fabián.

Antecedentes básicos

a) Fluviométricos

Se cuenta con el estudio de caudales medios diarios observados en la estación río Ñuble en San Fabián para el período 04/1950 - 03/1998, controlada por la Dirección General de Aguas del MOP.

b) Sedimentométricos

Se dispone de los registros sedimentométricos de las estaciones río Ñuble en San Fabián, en la siguiente tabla 7.29 se muestran los antecedentes.

Tabla 7.28 - Registros sedimentométricos disponibles río Ñuble en San Fabián.

Nombre Estación	Muestreos		Muestreos	
	Rutinarios		Integrados	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Río Ñuble en San Fabián	06-1985	11-1989	05-1993	04-1999
	08-1992	08-1992		
	04-1993	03-1997		

Tal como se señala en la metodología, para cuantificar el arrastre de sólidos en suspensión, se utilizó la información fluvimétrica y sedimentométrica existe en la estación.

Primeramente se comparó los valores de las concentraciones de los muestreos integrados con los muestreos puntuales de fechas concurrentes medidos en la estación sedimentométrica, en Anexo 1 se muestra el gráfico de la correlación, encontrándose que existe una clara relación de potencia entre ambos.

La relación obtenida en el gráfico es $C_i = C_r^{1,173}$, donde C_i es la concentración de muestreos integrados (mg/l) y C_r corresponde a concentración de muestreos rutinarios (mg/l).

Posteriormente, con la relación encontrada y la estadística de concentraciones obtenida de muestreos rutinarios se generó una estadística de concentraciones diarias equivalente a muestreos integrados.

Luego, al multiplicar de estadística de caudales medios diarios con la estadística de concentraciones equivalentes a muestreos integrados, se generó una estadística de gastos sólidos en suspensión medios diarios.

Finalmente, se generó la curva de gasto de sólido en suspensión con la estadística de caudales medios diarios y gasto sólido en suspensión medios diarios, donde resulta una relación de potencia del tipo $Q_s = a Q^n$, donde a y n son constantes que se establecieron por correlación del modelo, en figura 7.56 se muestra la relación.

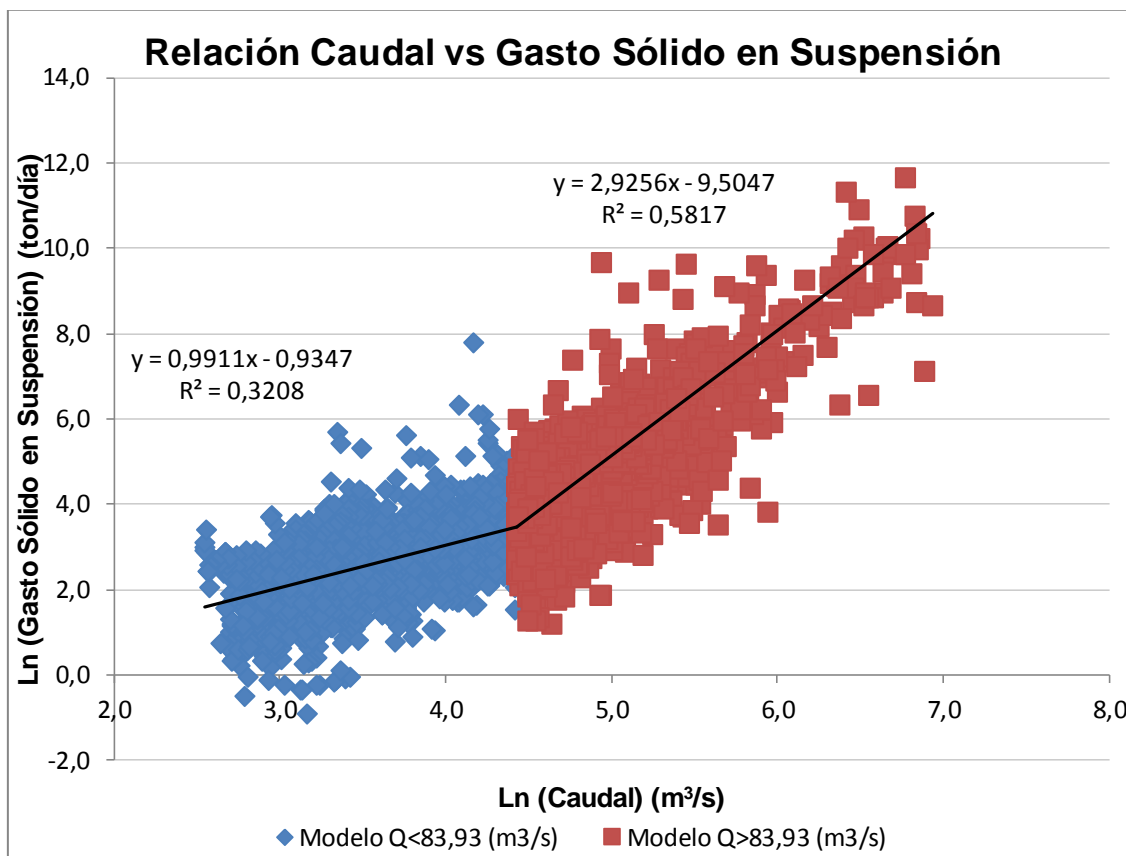


Figura 7.54 - Relación Gasto sólido en suspensión y caudal medio diario de Río Ñuble en San Fabián.

Los modelos obtenidos de gasto sólido en suspensión de la estación Río Hurtado en Angostura de Pangué son:

Para $Q < 83,93 \text{ m}^3/\text{s}$	$G_{sd} = 0,393 Q_d^{0,991}$	$G_{sd} \text{ (ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$
Para $Q > 83,93 \text{ m}^3/\text{s}$	$G_{sd} = 0,0001 Q_d^{2,926}$	$G_{sd} \text{ (ton/día); } Q_d \text{ (m}^3/\text{s)}$

Luego, se confeccionó la curva de duración de caudales, con base en la estadística de caudales medios diarios, para luego integrar en forma de intervalos la curva de duración de caudales, generando el gasto sólido en suspensión medio anual y el caudal medio anual de cada estación, en Anexo 2 aparecen las tablas de la curva de duración de caudales antes mencionados y Anexo 3 se aprecia la gráfica de dicha curva.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el caudal medio anual y el gasto sólido en suspensión medio anual esperado afluente a la estación Río Ñuble en San Fabián es:

Gasto sólido en Suspensión Medio Anual esperado	240.648 (ton/año)
Caudal Medio Anual	112,04 (m ³ /s)

Resumen de resultados

En la siguiente tabla se muestran los resultados de cada estación para poder recapitular lo antes realizado.

Tabla 7.29 - Resumen de resultados de cada estación.

ESTACIÓN	Área de drenaje km ²	$G_{sd}=a Q_d^n$	Gasto Sólido Medio Anual (ton/año)	Caudal Líquido Medio Anual (m ³ /s)
RIO LLUTA EN TOCONTASI	2.550	$G_{sd}= 6,325 Q_d^{2,663}$	101.319	1,13
Q. TARAPACA EN LAONSANA	1.338	$G_{sd}= 60,334 Q_d^{2,474}$	4.671	0,24
RIO LOA ANTES REPRESA LEQUENA	2.010	$G_{sd}= 1,581 Q_d^{2,535}$	496	0,57
RIO SALADO EN SIFON AYQUINA	770	$G_{sd}= 5,454 Q_d^{2,131}$	1.407	0,47
RIO HUASCO EN ALGODONES	7.187	$G_{sd}= 0,764 Q_d^{2,148}$	83.792	7,46
RIO JORQUERA EN VERTEDERO	4.150	$G_{sd}= 15,646 Q_d^{2,396}$	8.310	0,69
RIO PULIDO EN VERTEDERO	2.108	$G_{sd}= 7,016 Q_d^{2,235}$	17.278	1,45
RIO CHOAPA EN CUNCUMEN	1.176	$G_{sd}= 0,070 Q_d^{2,499}$	45.053	9,77
RIO CHOAPA EN SALAMANCA	2.253	$G_{sd}= 1,268 Q_d^{1,415}$	51.030	9,30
RIO COGOTI ENTRADA EMBALSE COGOTI	735	$G_{sd}= 9,817 Q_d^{1,728}$	71.297	2,55
RIO GRANDE EN PUNTILLA SAN JUAN	3.512	- Para $Q < 3,29$ (m ³ /s) $G_{sd}= 0,471 Q_d^{0,929}$ - Para $Q > 3,29$ (m ³ /s) $G_{sd}= 0,053 Q_d^{2,759}$	333.068	10,33
RIO HURTADO EN ANGOSTURA DE PANGUE	1.772	Para $Q < 2,27$ (m ³ /s) $G_{sd}= 0,471 Q_d^{0,940}$ Para $Q > 2,27$ (m ³ /s) $G_{sd}= 0,078 Q_d^{3,134}$	72.560	2,94

Tabla 7.30 - Resumen de resultados de cada estación. Continuación

ESTACIÓN	Área de drenaje km ²	$G_{sd}=a Q_d^n$	Gasto Sólido Medio Anual (ton/año)	Caudal Líquido Medio Anual (m ³ /s)
RIO TURBIO EN VARILLAR	4.148	$G_{sd}= 1,290 Q_d^{2,278}$	124.214	6,91
RIO BLANCO EN RIO BLANCO	382	$G_{sd}= 0,504 Q_d^{1,998}$	42.068	10,40
RIO PUTAENDO EN RESGUARDO LOS PATOS	927	- Para $Q < 15,03$ (m ³ /s) $G_{sd}= 0,912 Q_d^{1,714}$ - Para $Q > 15,03$ (m ³ /s) $G_{sd}= 0,054 Q_d^{2,759}$	130.947	8,71
RIO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO	2.400	$G_{sd}= 0,077 Q_d^{2,269}$	220.200	33,54
RIO COLORADO ANTES JUNTA RIO MAIPO	1.713	$G_{sd}= 0,025 Q_d^{3,027}$	1.009.514	31,65
RIO MAIPO EN EL MANZANO	4.968	$G_{sd}=0,418 Q_d^{2,091}$	5.181.224	113,50
RIO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS	620	$G_{sd}= 0,701 Q_d^{2,296}$	89.014	6,76
RIO MAPOCHO RINCONADA DE MAIPU	4.068	$G_{sd}= 0,190 Q_d^{2,348}$	605.374	29,63
ESTERO CHIMBARONGO EN CONVENTO VIEJO	590	$G_{sd}=0,235 Q_d^{1,747}$	112.823	48,77
RIO CACHAPOAL EN PTE TERMAS DE CAUQUENES	2.522	$G_{sd}= 5,218 Q_d^{1,368}$	508.253	42,41
RIO TINGUIRICA BAJO LOS BRIONES	1.441	$G_{sd}=0,030 Q_d^{2,851}$	2.971.317	52,80
RIO LONCOMILLA EN LAS BRISAS	10.046	$G_{sd}= 0,195 Q_d^{1,565}$	947.771	273,38
RIO TENO DESPUES DE JUNTA CON CLARO	1.188	$G_{sd}=0,004 Q_d^{2,792}$	551.298	57,09
RÍO ÑUBLE EN SAN FABIÁN	1.709	- Para $Q < 83,93$ (m ³ /s) $G_{sd}= 0,393 Q_d^{0,991}$ - Para $Q > 83,93$ (m ³ /s) $G_{sd}= 0,0001 Q_d^{2,926}$	240.648	112,04

8. Análisis y comparación con expresiones empíricas

8.1 Análisis y comparación de gasto sólido en suspensión medido con curvas de Fleming.

Una vez obtenido el gasto sólido en suspensión medio anual en conjunto con el caudal medio anual de cada estación distribuidas desde la XV región de Arica y Parinacota hasta VIII región del Bío-Bío, ubicadas en los principales río de cada cuenca de dichas regiones, se realiza una comparación con las fórmulas empíricas utilizadas en cuencas donde no existen estaciones sedimentométricas y fluviométricas representativas del cauce en estudio.

A continuación se muestra en la figura 8.1 y Tabla 8.1, la curva de gasto sólido en suspensión media anual, donde aparecen todas las estaciones antes mencionadas, distinguiendo dos tipos de zonas para tener mejor entendimiento en la posterioridad.

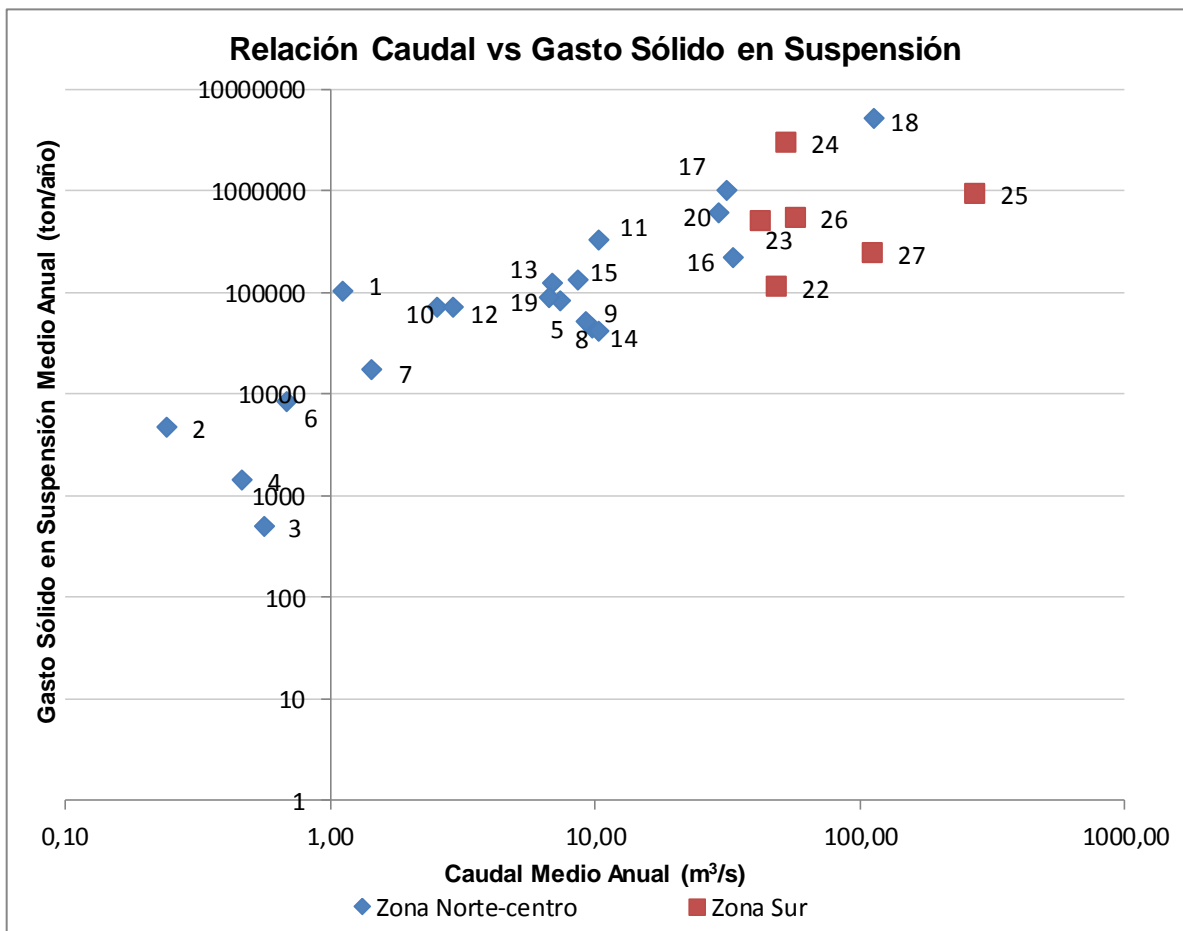


Figura 8.1 - Curva de gasto sólido en suspensión media anual diferenciando zonas.

Tabla 8.1 – Estaciones enumeradas.

Número	Estación
1	RIO LLUTA EN TOCONTASI
2	QUEBRADA TARAPACA EN LAONSANA
3	RIO LOA ANTES REPRESA LEQUENA
4	RIO SALADO EN SIFON AYQUINA
5	RIO HUASCO EN ALGODONES
6	RIO JORQUERA EN VERTEDERO
7	RIO PULIDO EN VERTEDERO
8	RIO CHOAPA EN CUNCUMEN
9	RIO CHOAPA EN SALAMANCA
10	RIO COGOTI ENTRADA EMBALSE COGOTI
11	RIO GRANDE EN PUNTILLA SAN JUAN
12	RIO HURTADO EN ANGOSTURA DE PANGUE
13	RIO TURBIO EN VARILLAR
14	RIO BLANCO EN RIO BLANCO
15	RIO PUTAENDO EN RESGUARDO LOS PATOS
16	RIO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO
17	RIO COLORADO ANTES JUNTA RIO MAIPO
18	RIO MAIPO EN EL MANZANO
19	RIO MAPOCHO EN LOS ALMENDROS
20	RIO MAPOCHO RINCONADA DE MAIPU
21	ESTERO CHIMBARONGO EN CONVENTO VIEJO
22	RIO CACHAPOAL EN PTE TERMAS DE CAUQUENES
23	RIO TINGUIRIRICA BAJO LOS BRIONES
24	RIO LONCOMILLA EN LAS BRISAS
25	RIO TENO DESPUES DE JUNTA CON CLARO
26	RÍO ÑUBLE EN SAN FABIÁN

Uno de los métodos teóricos más empleado, son las curvas de Fleming, el cual utiliza los datos de 250 cuencas alrededor del mundo para obtener cuatro modelos de acuerdo a la cobertura de la cuenca.

La metodología ocupada en este caso fue calcular el gasto sólido en suspensión medio anual empleando las diferentes curvas de Fleming, en función del caudal medio anual de cada estación, obteniendo así un gasto sólido en suspensión medio anual empírico, los resultados obtenidos se encuentran en Anexo 4, el cual se compara con el valor medido en cada punto.

Además se debe compatibilizar las unidades de los modelos a las utilizadas en el estudio, donde el caudal empleado esta en metros cúbicos por segundo, en la tabla 8.2 se muestran los parámetros de las ecuaciones 8.1; 8.2; 8.3; y 8.4, posteriormente se determinó las curvas de gasto sólido en suspensión empírico, las cuales se aprecian en las tablas que se encuentran en el Anexo 4.

Tabla 8.2 - Parámetros para distintas coberturas.

Cobertura vegetal	n	a
		Para Qs en ton
Variada, de hoja ancha y coníferas	1,02	3,09
Floresta Conifer y pastos altos	0,82	189,5
Pastos bajos y arbustos	0,65	1898,8
Desierto y arbustos	0,72	2898,4

Se muestran las expresiones de las cuatro curvas de Fleming.

$$G_{sma} = 3,09 Q_{ma}^{1,02} \quad (8.1)$$

$$G_{sma} = 189,5 Q_{ma}^{0,82} \quad (8.2)$$

$$G_{sma} = 1898,8 Q_{ma}^{0,65} \quad (8.3)$$

$$G_{sma} = 2898,4 Q_{ma}^{0,72} \quad (8.4)$$

A continuación se grafican las curvas de gasto sólido en suspensión medio anual medido y teórico obtenido de las cuatro diferentes curvas, las cuales se distinguen por la cobertura de las cuencas, en la figura 8.2 se muestra gráfica.

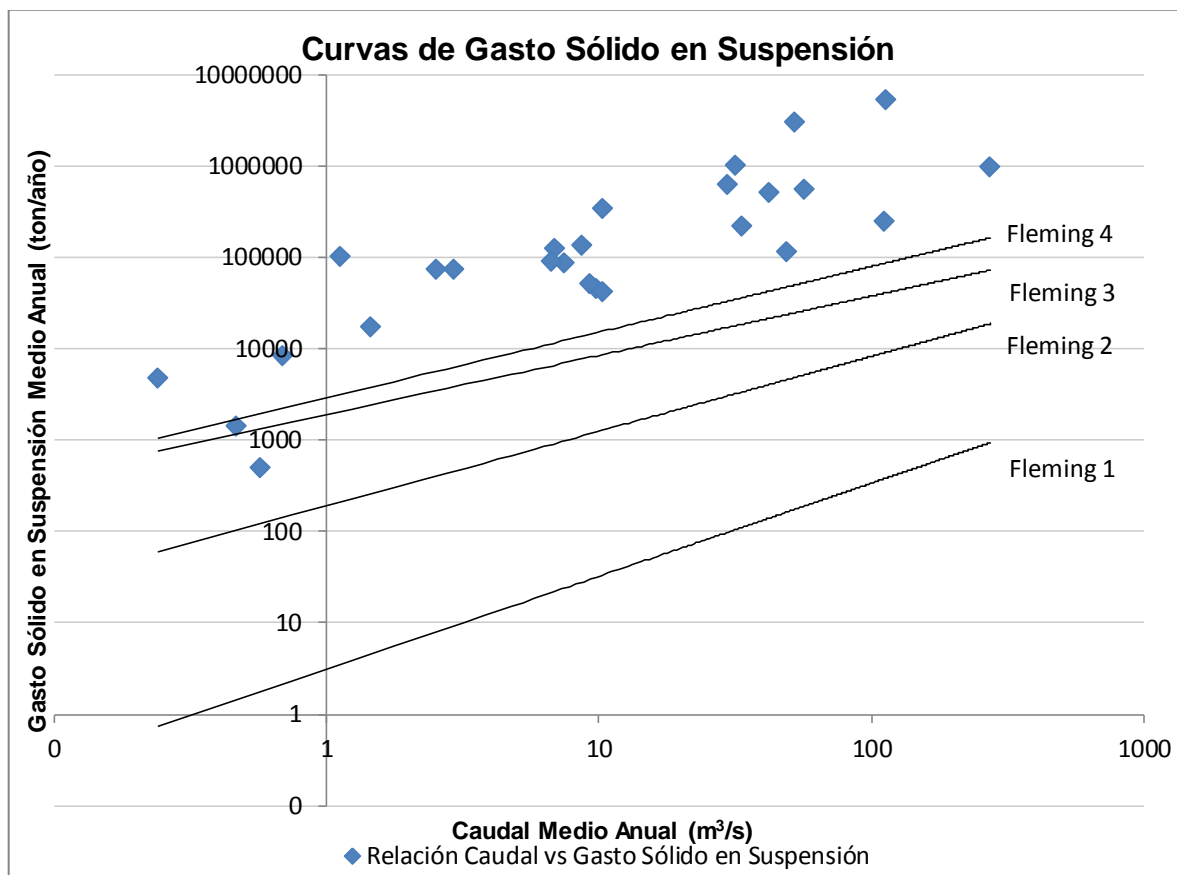


Figura 8.2 - Curvas de gasto sólido en suspensión medio anual medida y empírica de Fleming.

De acuerdo a lo mostrado en la figura 8.2 se puede apreciar que dos curvas tienden a ajustarse al gasto sólido en suspensión medido por estación, los modelos que más se acercan a la realidad en nuestro país, son aquellos donde el tipo de cobertura que predomina en la cuenca es de pastos bajos y arbustos además de una superficie similar a desierto y arbustos, además se observa que en las estaciones que se encuentran principalmente en la zona norte se presentan menor diferencia entre los datos medidos y teóricos, lo que no ocurre con la zona centro sur donde las diferencias se incrementa entre ellos.

Posteriormente para poder visualizar de mejor manera el ajuste entre los datos medidos y los obtenidos por medio de las dos curvas que mejor se ajustan, en la figura 8.3 aparecen los gastos sólidos en suspensión medio anual de cada estación versus el gasto sólido obtenido al utilizar la curva correspondiente a pastos bajos y arbustos, donde se aprecia que los valores estimados por la curva de Fleming están en defecto con respecto a los valores medidos, lo mismo ocurre con la curva con cobertura desértica y de arbustos (figura 8.4), con valores estimados en defecto aunque en menor grado que la curva anterior.

Por último se determinó los errores existentes entre los datos experimentales y empíricos de las distintas estaciones, para evaluar la factibilidad de la aplicación de las curvas de Fleming en las cuencas chilenas que se ha desarrollado el estudio, sin embargo, la existencia de muchas fuentes de indeterminación hacen que los datos experimentales no coincidan exactamente con la curva teórica, aplicando la ecuaciones 6.2 y 6.3 que se muestran a continuación, el Procedimiento utilizado para obtener los errores se encuentran en Anexo 4, donde se obtuvo unos errores de:

- Error cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \hat{x})^2}}{(n - 2)} \quad (6.2)$$

Tabla 8.3 - Resultados de errores cuadráticos Fleming 3 y 4

Curva 3	256.740 (ton/año)
Curva 4	253.636 (ton/año)

- Error relativo

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \hat{x})^2}}{(n - 2)} \frac{1}{\hat{x}} \times 100 \quad (6.3)$$

Tabla 8.4 - Resultados de errores relativos Fleming 3 y 4

Curva 3	49,4%
Curva 4	48,8 %

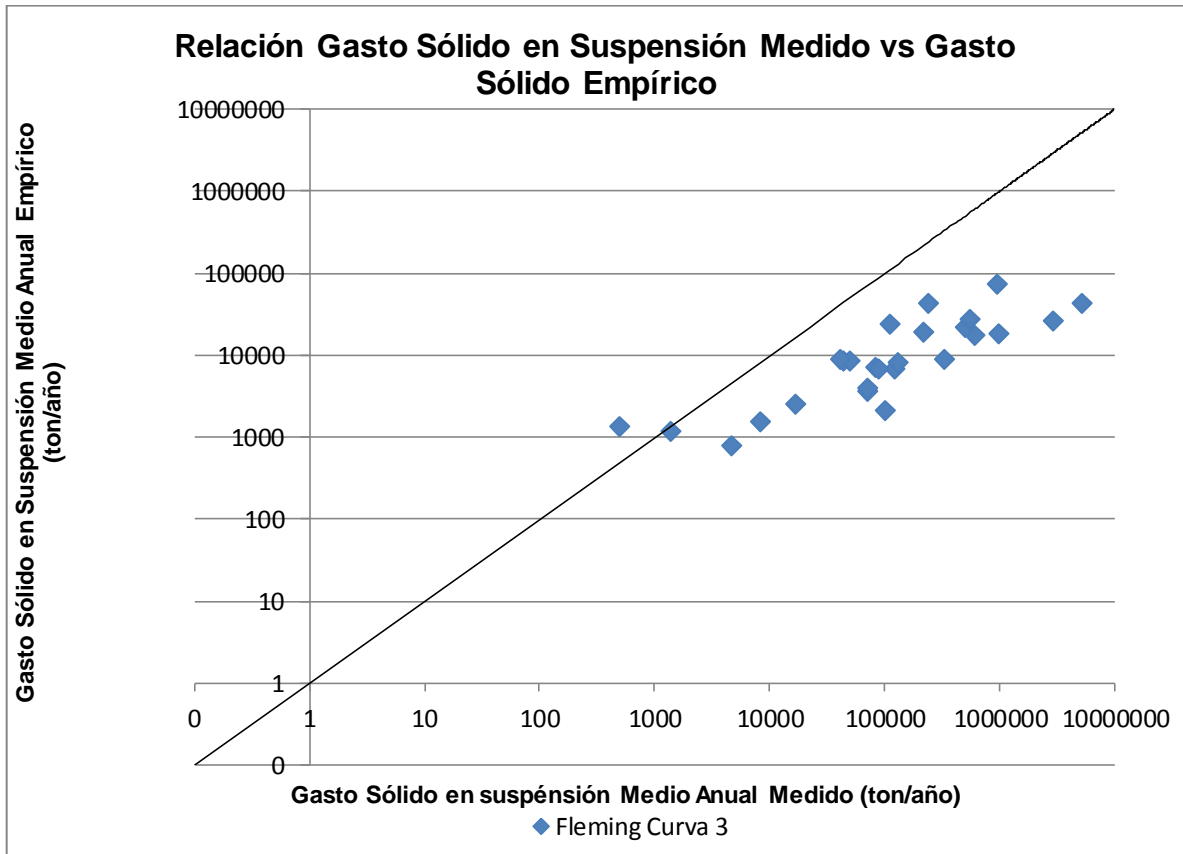


Figura 8.3 - Relación gasto sólido en suspensión medidos y curva n° 3 Fleming

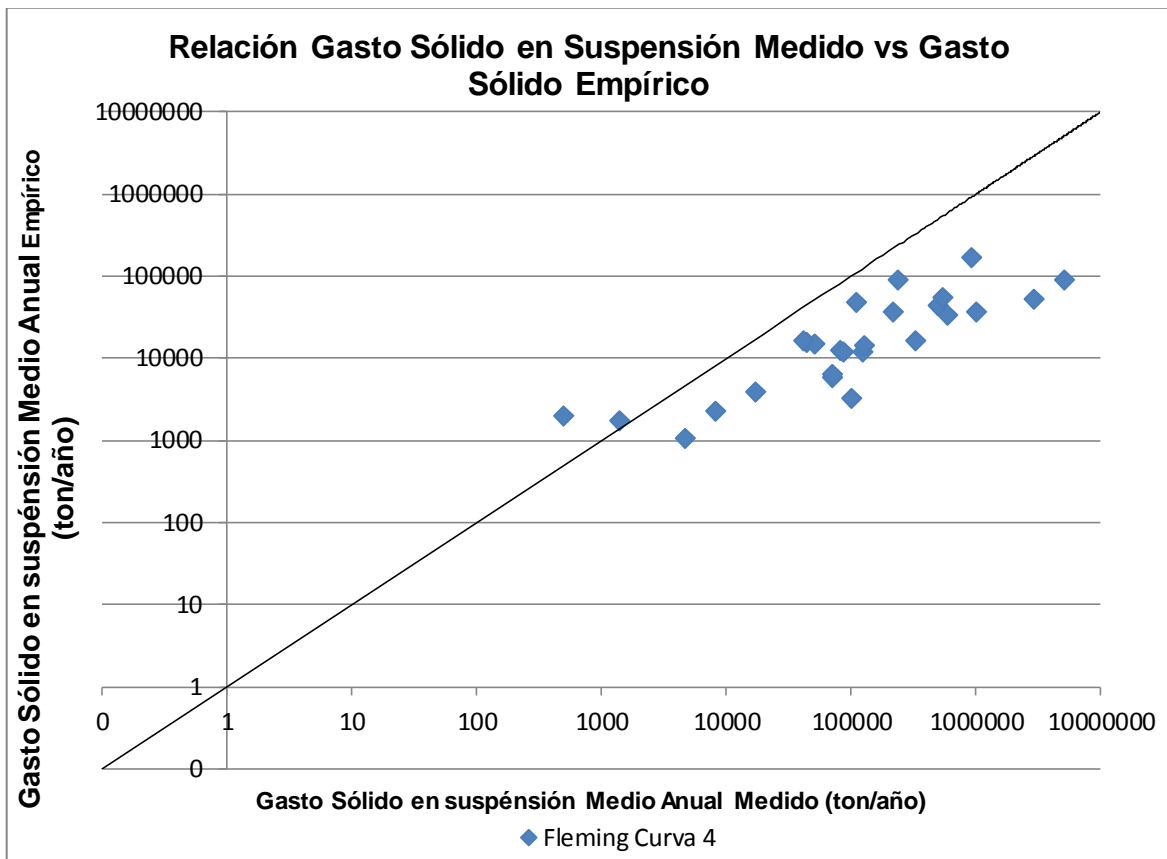


Figura 8.4 - Relación gasto sólido en suspensión medidos y curva n° 4 Fleming.

8.2 Análisis y comparación de gasto sólido en suspensión medido con método Dendy y Bolton.

El método propuesto por Dendy y Bolton para la obtención del gasto sólido en suspensión medio anual por área, se basa en el estudio de 800 cuencas en Estados Unidos de América, donde logró una cuenca referencial, la cual se relaciona con la escorrentía y área de drenaje, la publicación original (1976) se adjunta en Anexo 5.

Primeramente se determinó el gasto sólido en suspensión medio anual por área para cada estación empleando las ecuaciones 5.2 y 5.3, los resultados obtenidos se encuentran en Anexo 4, y se muestran en la figura 8.5, las cuales están en función de la escorrentía media de cada cuenca.

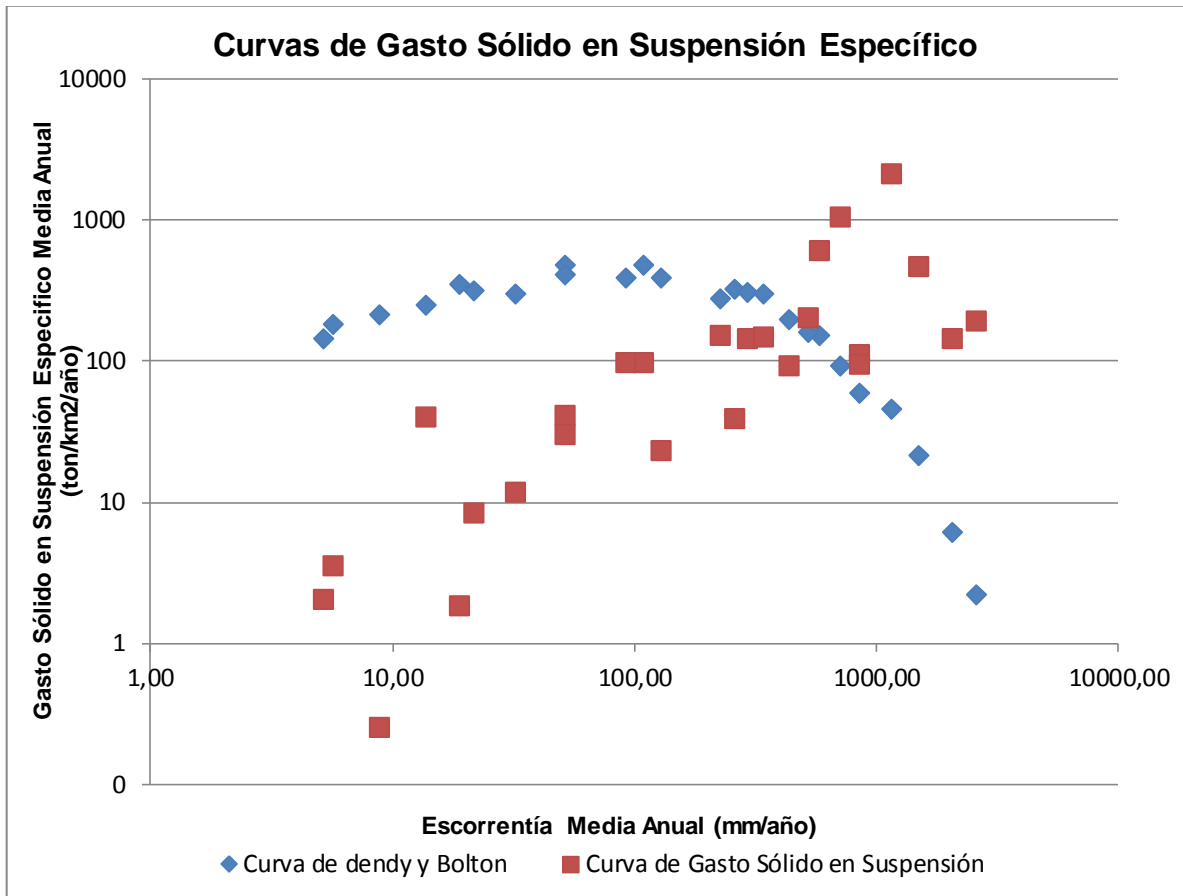


Figura 8.5 - Curvas de gasto sólido en suspensión por unidad de área y método Dendy y Bolton.

De acuerdo a lo mostrado en la figura 7.61 el método de Dendy y Bolton no se ajusta para nada a los datos medidos en cada estación, debido a que la teoría de este método propone que a partir de una escorrentía de 50,8 mm, la producción de sedimentos es inversamente a la escorrentía por lo tanto decrece el gasto a medida que aumenta el caudal, tal caso corresponde mayormente a la zona centro-sur donde la escorrentía es mayor de 50,8 mm.

Posteriormente para poder visualizar de mejor manera el ajuste entre los datos medidos y los obtenidos por medio la aplicación del método, en la figura 8.6 aparecen los gastos sólidos en suspensión medio anual de cada estación versus el gasto sólido obtenido al utilizar las expresiones de Dendy y Bolton, donde se aprecia que no existe una correlación buena entre ellos.

Por último se determinó los errores existentes entre el método empírico de Dendy y Bolton con los gastos sólidos en suspensión de cada estación, para evaluar la precisión de esta teoría en las cuencas chilenas, aplicando la ecuaciones 6.4 y 6.5 que se muestran a continuación, el procedimiento utilizado para obtener los errores se encuentra en Anexo 4, donde se obtuvo unos errores de:

- Error cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \hat{x})^2}}{(n - 3)} \quad (6.4)$$

Tabla 8.5 - Resultado de error cuadrático del método Dendy y Bolton.

Dendy y Bolton	283.492 (ton/año)
----------------	-------------------

- Error relativo

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \hat{x})^2}}{(n - 3)} \div \hat{x} \times 100 \quad (6.5)$$

Tabla 8.6 - Resultado de error relativo del método Dendy y Bolton.

Dendy y Bolton	54,5 %
----------------	--------

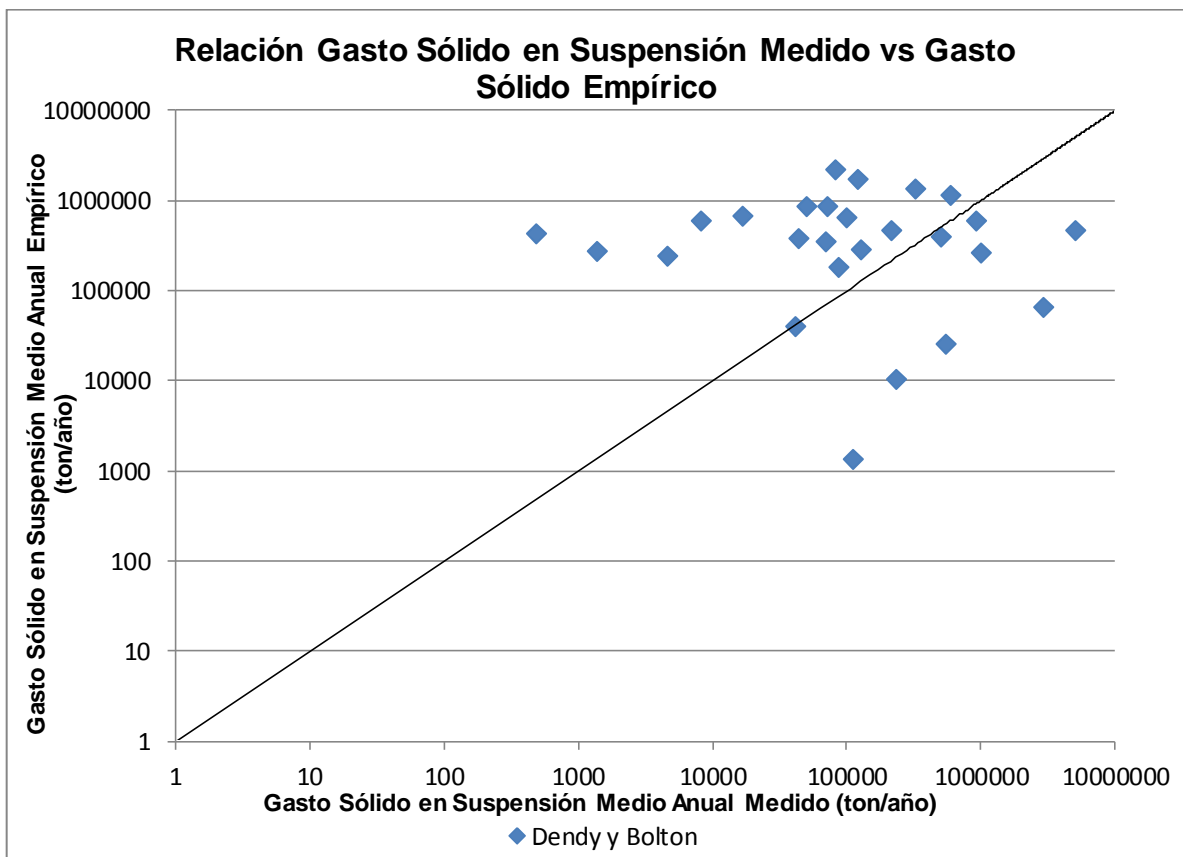


Figura 8.6 - Relación gasto sólido en suspensión medido y método Dendy y Bolton.

9. Proposición de modelos.

Debido a que las curvas de gasto sólido en suspensión medio anual obtenida de forma empíricas no se ajustan a los valores de las estaciones de las cuencas chilenas, se propondrán modelos con distintas funciones, los cuales se ajusten de mejor manera a los datos medidos.

9.1 Ajuste de modelos tipo Fleming

De acuerdo a la metodología antes descrita, se ajusta una curva a los datos medidos de las distintas estaciones seleccionadas en los principales ríos de las regiones, mostrando una relación tipo potencial (Fleming) en función del caudal medio anual, en la siguiente figura 9.1 se aprecia la tendencia media de la nube de puntos, donde los ejes están en forma de logaritmo.

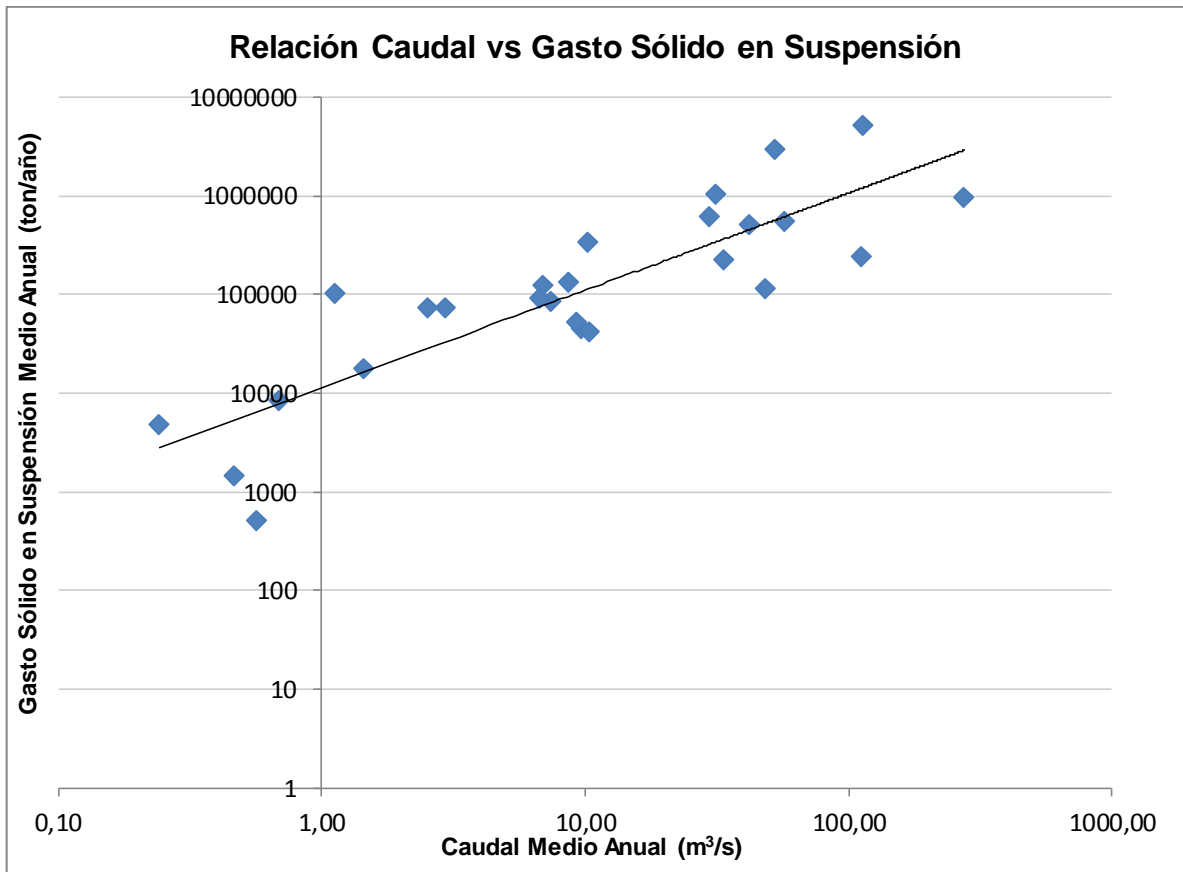


Figura 9.1 - Relación gasto sólido en suspensión media anual medido tipo Fleming.

A continuación se muestra las estaciones seleccionadas en la figura 9.2 (ejes normales), donde se aprecia la línea de tendencia media de los puntos, mostrando una relación tipo potencial entre el caudal medio anual y el gasto sólido en suspensión medio anual, en Anexo 4 se ilustran los resultados.

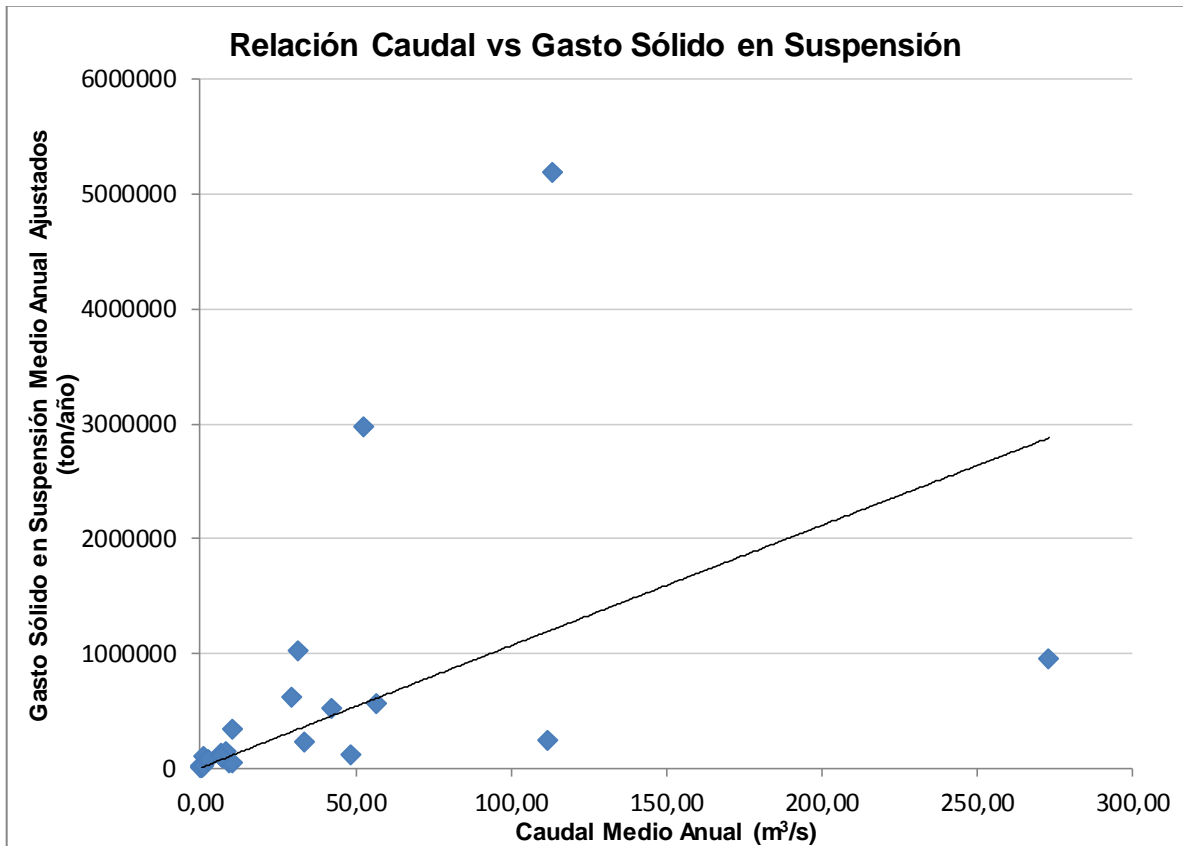


Figura 9.2 - Relación gasto sólido en suspensión medido tipo Fleming .

A Partir de la figura 9.1 y 9.2 se logró la curva de gasto sólido en suspensión media anual correspondiente a $G_{msa} = 11.384 Q_{ma}^{0.986}$, donde G_{msa} es gasto sólido en suspensión en (ton/año) y Q_{ma} es el caudal medio anual en (m^3/s).

Ahora bien se muestra en la figura 9.2 que existen dos estaciones que no se ajustan a la tendencia media de la nube, las cuales son río Maipo en el Manzano y río Tinguiririca bajo los Briones, por lo tanto se analizará los errores del modelo ajustado tipo Fleming con dichas estaciones y sin estas.

Posteriormente se determinaron los errores existentes entre el modelo propuesto con los gastos sólidos en suspensión de cada estación, para evaluar la precisión que este tiene en las cuencas chilenas que se ha desarrollado el estudio, aplicando la ecuaciones 6.2 y 6.3 que se muestran a continuación, el Procedimiento utilizado para obtener los errores se encuentran en Anexo 4, donde se obtuvo unos errores de:

- Error cuadrático

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \hat{x})^2}}{(n - 2)} \quad (6.2)$$

Tabla 9.1 - Resultados de errores cuadráticos modelo ajustado tipo Fleming.

Todas estaciones	216.422 (ton/año)
Sin E. Maipo y E. Tinguiririca	105.967 (ton/año)

- Error relativo

$$e = \frac{\sqrt{\sum(x - \hat{x})^2}}{(n - 2)} \Big/ \hat{\bar{x}} \times 100 \quad (6.3)$$

Tabla 9.2 - Resultados de errores relativos modelo ajustado tipo Fleming.

Todas estaciones	41,6 %
Sin E. Maipo y E. Tinguiririca	20,4 %

Por último para poder visualizar de mejor manera el ajuste entre los datos medidos y los obtenidos a través del modelo propuesto, en la figura 9.3 aparecen los gastos sólidos en suspensión medio anual de cada estación versus el gasto sólido obtenido al utilizar el modelo ajustado a las cuencas chilenas, donde se aprecia que existe una buena correlación entre ellos.

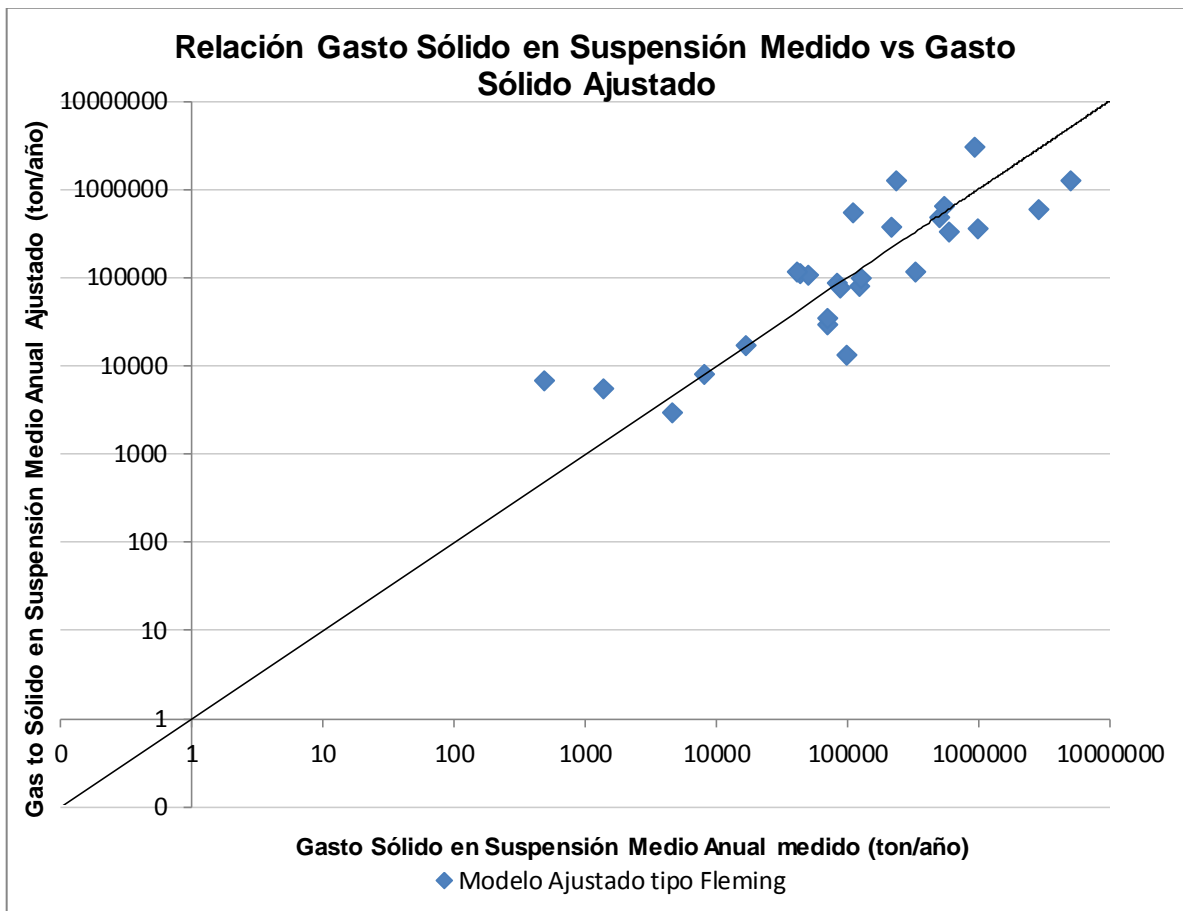


Figura 9.3 - Relación gasto sólido en suspensión medido y modelo propuesto.

Se realiza una clasificación de las estaciones por su cobertura vegetal de la cuenca, para poder minimizar el error cuadrático y relativo de las cuencas seleccionadas, por lo tanto se distinguen dos zonas, la primera es una zona centro-norte y la segunda zona sur, en la figura 8.1 se muestra la clasificación de las estaciones seleccionadas antes mencionadas.

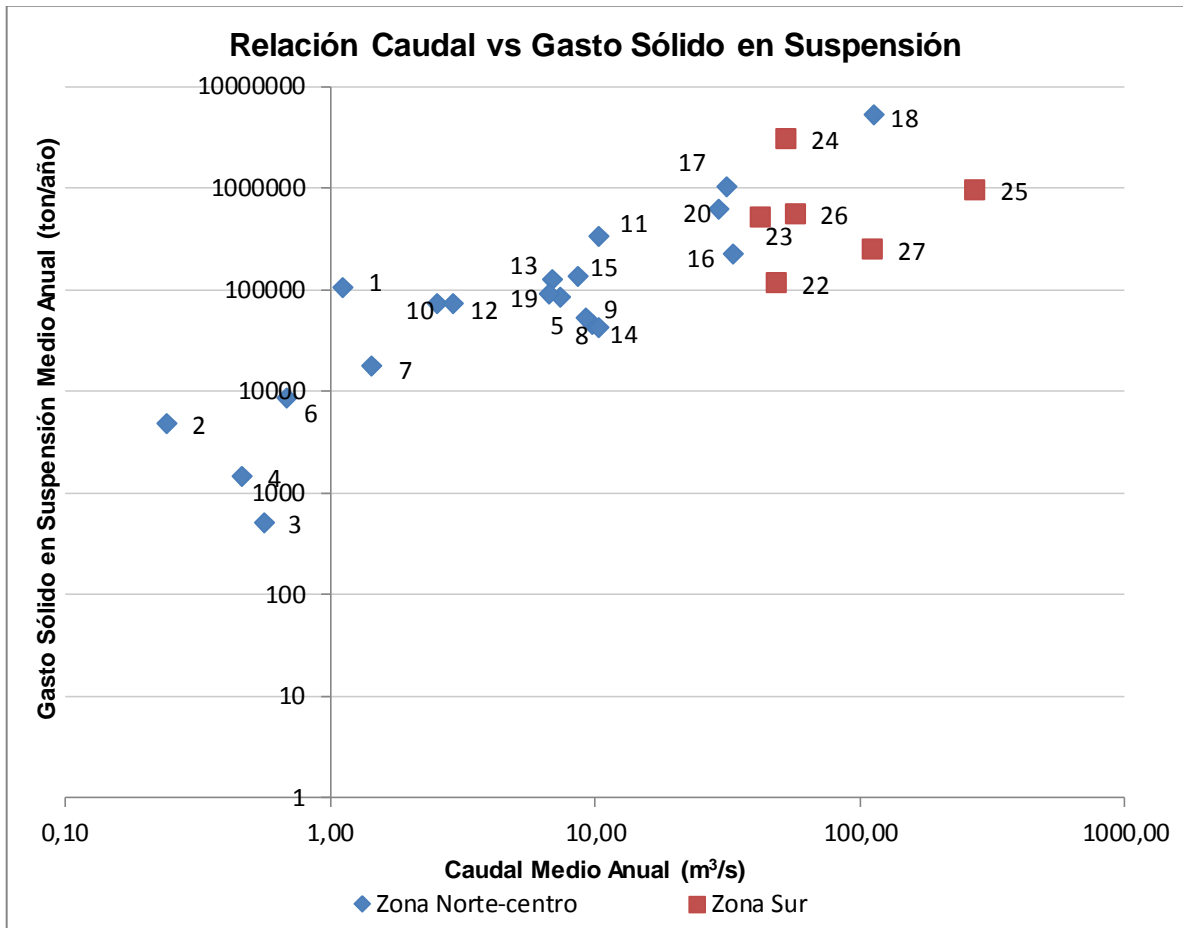


Figura 8.1 - Curva de gasto sólido en suspensión media anual.

En consecuencia la zona Norte-centro está compuesta desde la estación río Lluta en Tocontasi hasta río Maipo en el Manzano, y la zona sur desde Estero Chimbarongo en Convento Viejo hasta río Ñuble en San Fabián, por lo tanto se ajustara un modelo tipo Fleming solamente para la zona Norte-Centro, debido a que para la zona Sur no hay suficientes estaciones en el estudio.

A continuación se muestra en la figura 9.4 la tendencia media de las estaciones seleccionadas de la zona Norte-Centro, donde se aprecia que la estación río Maipo en el Manzano se sale de la distribución de la nube de puntos.

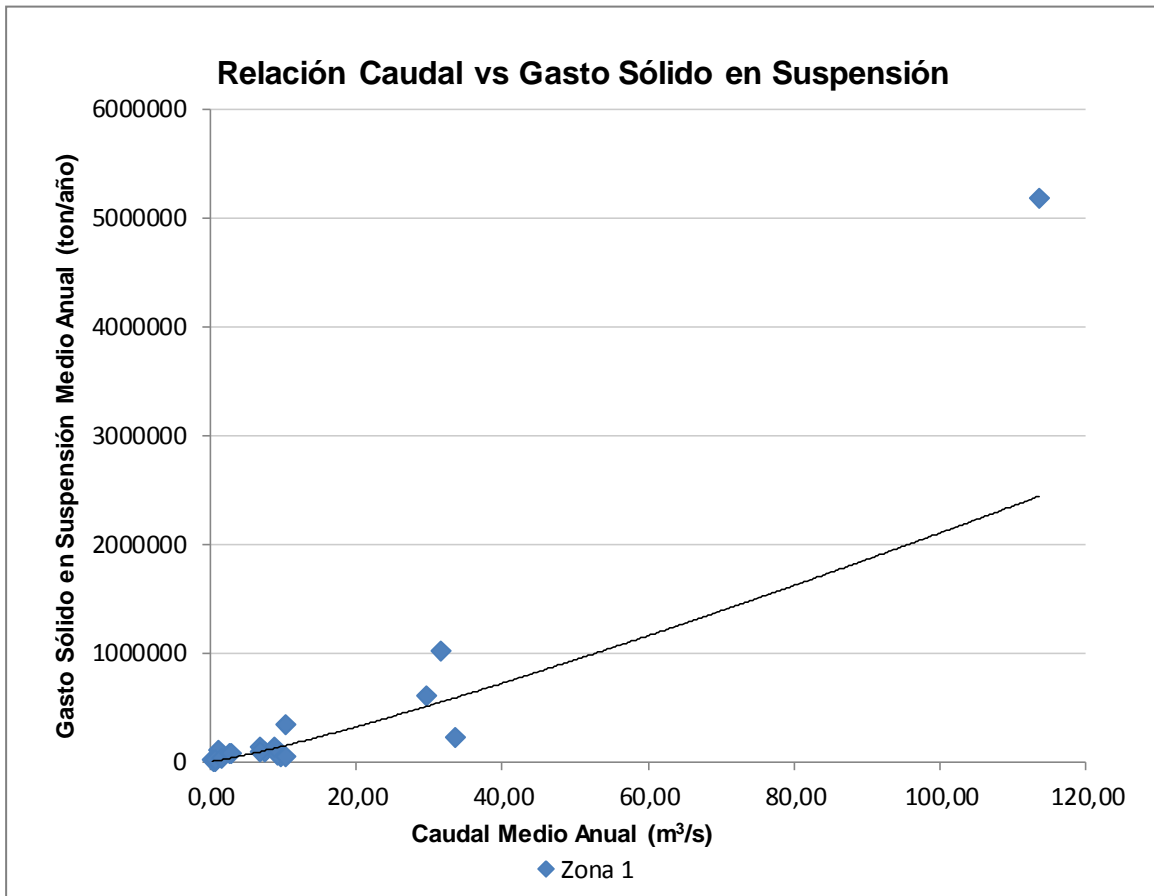


Figura 9.4 - Relación gasto sólido en suspensión media anual zona Norte-Centro

A Partir de la figura 9.4 se logró la curva de gasto sólido en suspensión media anual de la zona Norte-Centro correspondiente a $G_{msa} = 9728 Q_{ma}^{1,167}$, donde G_{msa} es gasto sólido en suspensión en (ton/año) y Q_{ma} es el caudal medio anual en (m^3/s).

Ahora bien se muestra en la figura 9.4 que existen una estación que no se ajustan a la tendencia media de la nube, que es río Maipo en el Manzano, pero se aprecia que hasta la estación río Mapocho rinconada Maipú se ajusta perfectamente al modelo, por lo tanto se analizará los errores del modelo ajustado tipo Fleming con dicha estación y sin esta.

Posteriormente se determinaron los errores existentes entre el modelo propuesto con los gastos sólidos en suspensión de la estaciones perteneciente a la zona Norte-Centro, para evaluar la precisión que tiene este, aplicando la ecuaciones 6.2 y 6.3 que se muestran a continuación, el Procedimiento utilizado para obtener los errores se encuentran en Anexo 4, donde se obtuvo unos errores de:

- Error cuadrático

$$e = \sqrt{\frac{\sum(x - \hat{x})^2}{(n - 2)}} \quad (6.2)$$

Tabla 9.3 - Resultados de errores cuadráticos modelo ajustado tipo Fleming Zona Norte-Centro.

Todas estaciones Norte-Centro	156.702 (ton/año)
Sin E. Maipo	38.584 (ton/año)

- Error relativo

$$e = \frac{\sqrt{\frac{\sum(x - \hat{x})^2}{(n - 2)}}}{\hat{x}} \times 100 \quad (6.3)$$

Tabla 9.4 - Resultados de errores relativos modelo ajustado tipo Fleming Zona Norte-Centro.

Todas estaciones Norte-Centro	38,3 %
Sin E. Maipo	24,3%

Por último para poder visualizar de mejor manera el ajuste entre los datos medidos y los obtenidos a través del modelo propuesto, en la figura 9.5 aparecen los gastos sólidos en suspensión medio anual de las estaciones de la zona Norte-Centro versus el gasto sólido obtenido al utilizar el modelo ajustado a las cuencas chilenas seleccionadas, donde se aprecia que existe una buena correlación entre ellos.

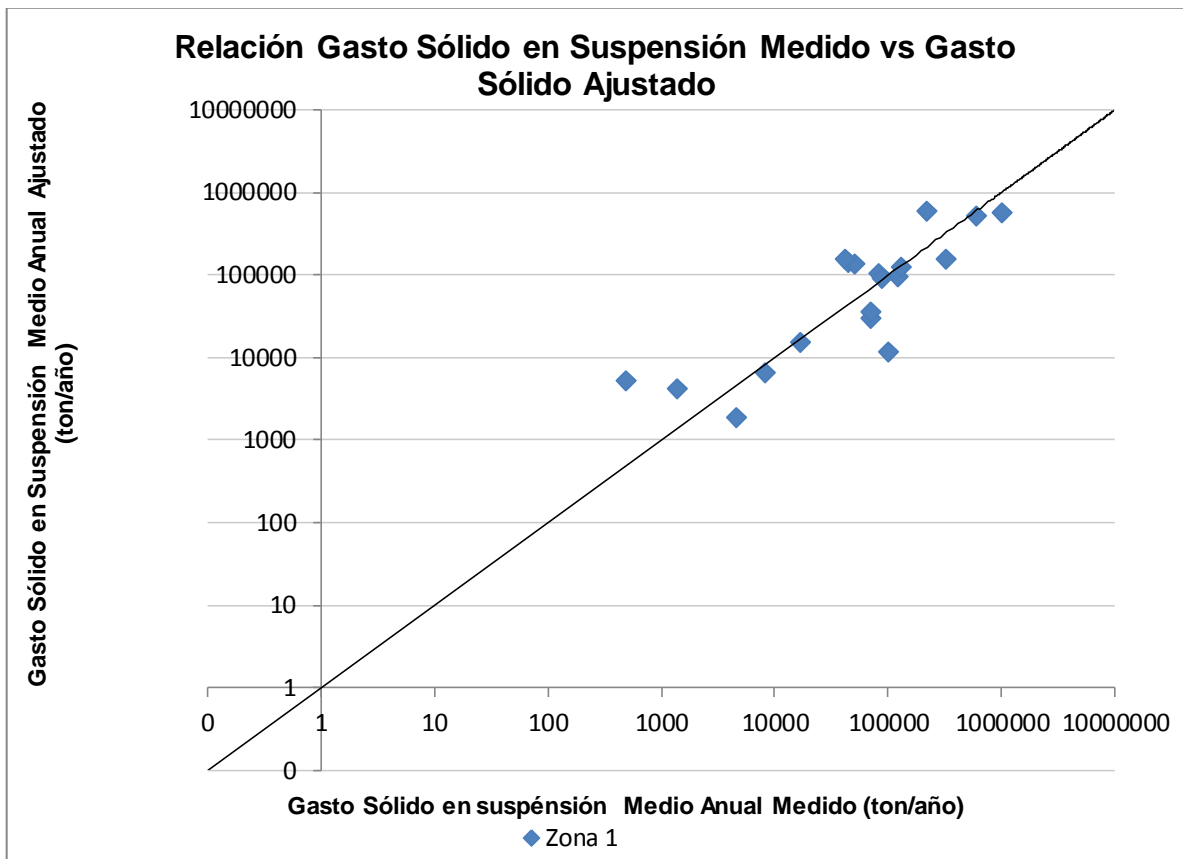


Figura 9.5 - Relación gasto sólido en suspensión medido Zona Norte-Centro y modelo ajustado.

9.2 Ajuste de modelos tipo Dendy y Bolton.

Según a la metodología antes mencionada, se ajusta una modelo tipo Dendy y Bolton para los datos medidos de las distintas estaciones seleccionadas a largo del país, en conjunto con la herramienta Solver de Microsoft Excel se ajustaron las constantes, para lograr las ecuaciones 9.1 y 9.2

Para una escorrentía menor a 50,8 mm:

$$\frac{S}{S_R} = 1,23 \left(\frac{Q}{Q_R}\right)^{0,72} \times \left(0,088 - 0,023 \log\left(\frac{A}{A_R}\right)\right) \quad (9.1)$$

Para una escorrentía igual o mayor a 50,8 mm:

$$\frac{S}{S_R} = 1,18 e^{(0,019 Q/Q_R)} \times \left(1,42 + 0,35 \log\left(\frac{A}{A_R}\right)\right) \quad (9.2)$$

A partir de las ecuaciones antes mencionadas se obtuvo un gasto sólido en suspensión medio anual por área de cada estación, el cual se multiplicó por el área de drenaje para poder graficar los datos medidos y obtenidos a partir del modelo ajustado, en Anexo 4 se ilustran los resultados, a continuación se presentan en la figura 9.6.

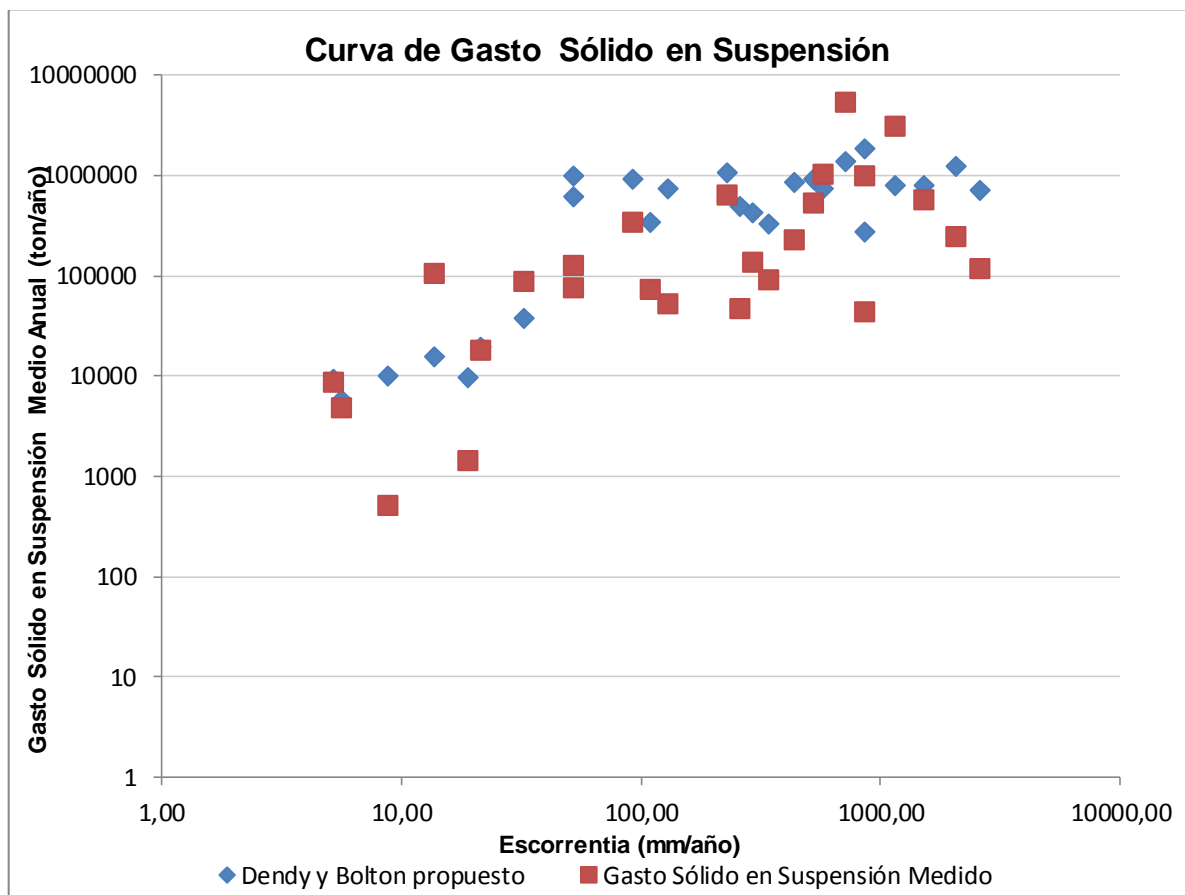


Figura 9.6 - Relación gasto sólido en suspensión media anual medido y modelo tipo Dendy y Bolton.

Posteriormente para poder representar de mejor manera el ajuste entre los datos medidos y los obtenidos a través del modelo propuesto, en la figura 9.7 aparecen los gastos sólidos en suspensión medio anual de cada estación versus el gasto sólido obtenido al utilizar el modelo ajustado tipo Dendy y Bolton, a las cuencas chilenas, donde se aprecia que existe una mejor correlación entre ellos.

Por último se determinaron los errores existentes entre el modelo propuesto con los gastos sólidos en suspensión de cada estación, para evaluar la precisión que este tiene en las cuencas chilenas que se ha desarrollado el estudio, aplicando la ecuaciones 6.4 y 6.5, se obtuvo un error cuadrático de 215.016 (ton/año) y un error relativo de 41,3 %. El Procedimiento utilizado para obtener los errores se encuentran en Anexo 4.

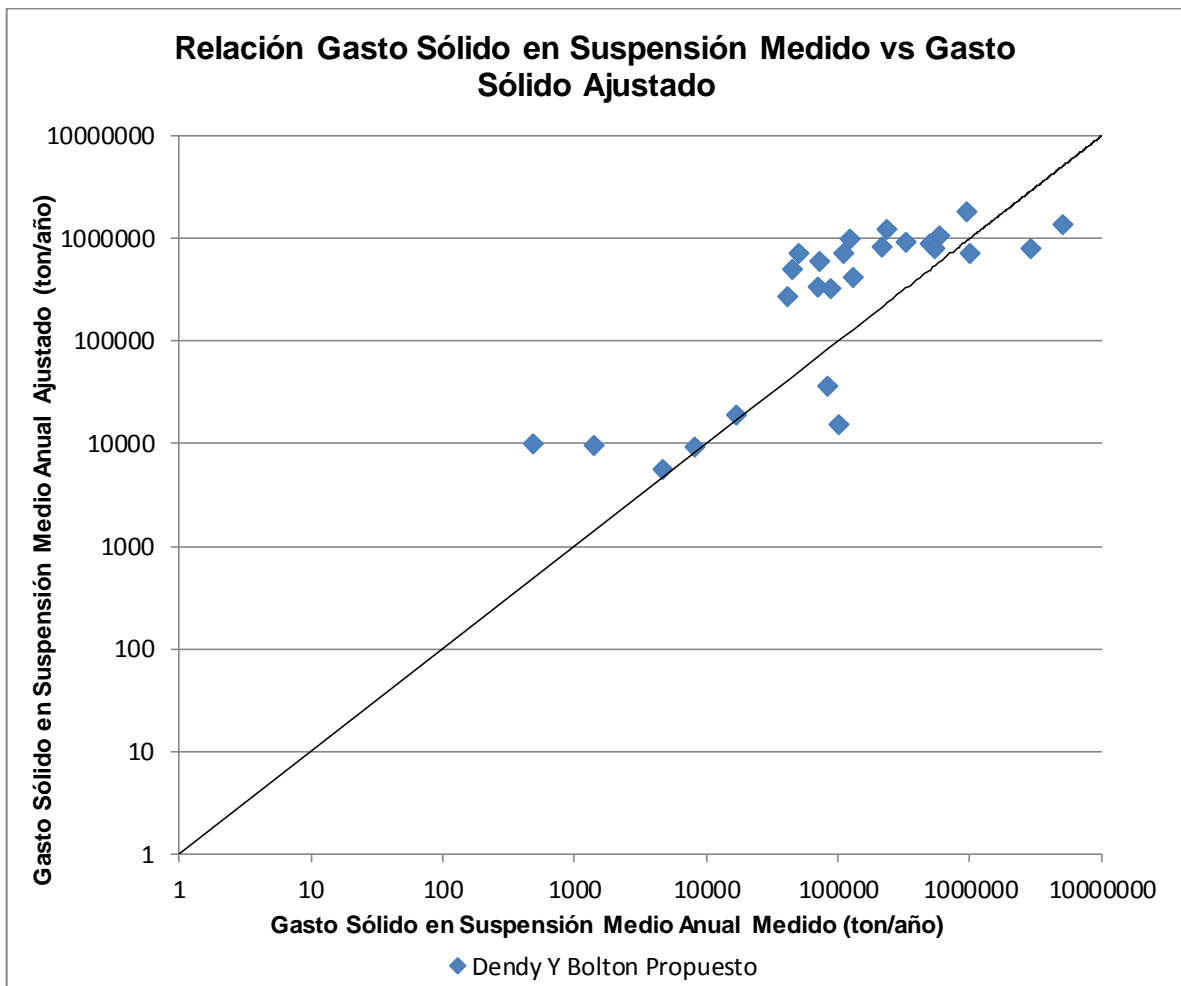


Figura 9.7 - Relación gasto sólido en suspensión medido y modelo propuesto tipo Dendy y Bolton.

9.3 Modelo de gasto sólido específico para cuencas chilenas

En el estudio de las cuencas chilenas se ajusta un modelo gasto sólido en suspensión específico, para los datos medidos de las distintas estaciones seleccionadas a largo del país, mostrando una relación tipo potencial en función del caudal medio anual específico, en la figura 9.8 se muestra la relación del caudal medio anual específico y gasto sólido en suspensión medio anual específico, además se aprecia la tendencia media de la nube de puntos, donde los ejes están en forma de logaritmo. Los resultados se expresan en Anexo 4.

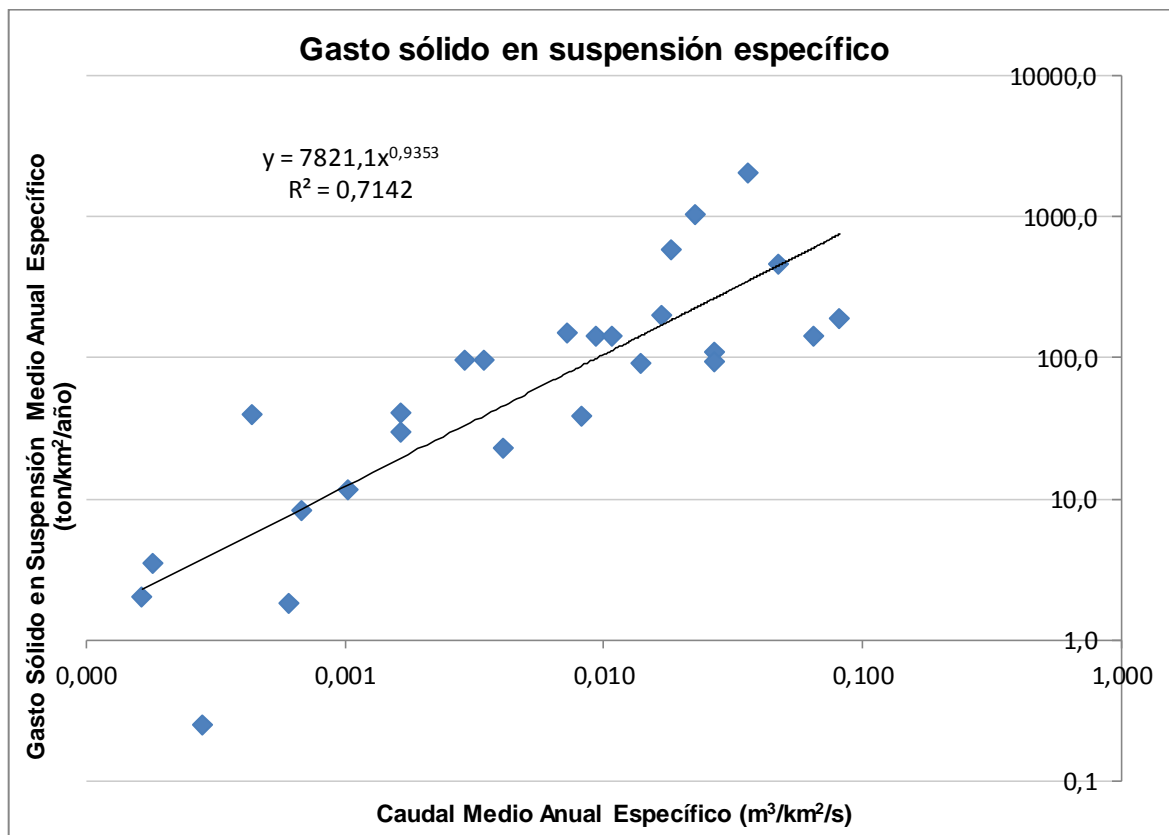


Figura 9.8 - Relación gasto sólido en suspensión medio anual específico medido.

A continuación se muestra las estaciones seleccionadas en la figura 9.9 (ejes normales), donde se aprecia la línea de tendencia media de los puntos, mostrando una relación tipo potencial entre el caudal medio anual y el gasto sólido en suspensión medio anual, en Anexo 4 se ilustran los resultados.

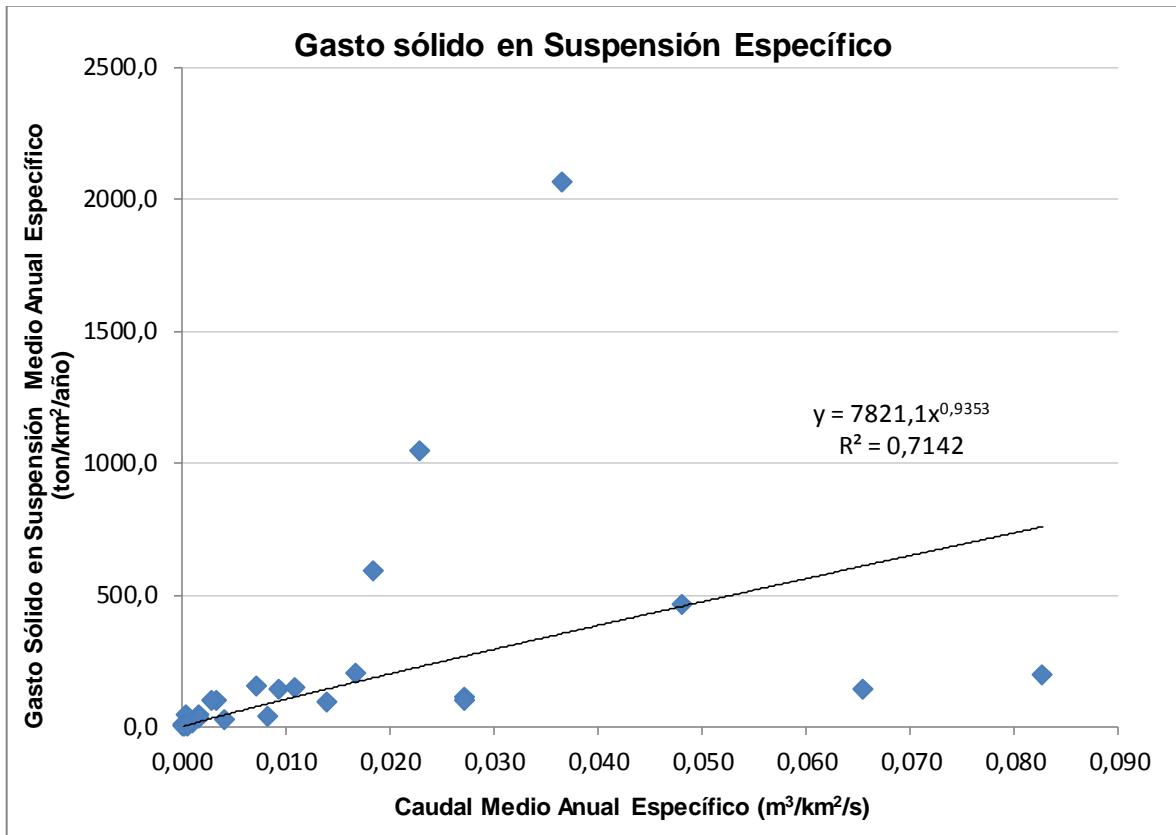


Figura 9.9 - Relación gasto sólido en suspensión medio anual específico medido.

De acuerdo de la figura 9.9 se logró la curva de gasto sólido en suspensión media anual específico correspondiente a $g_{sma} = 7821,1 q_{ma}^{0,935}$, donde g_{sma} es gasto sólido en suspensión específico en ($\text{ton}/\text{km}^2/\text{año}$) y q_{ma} es el caudal medio anual por área en ($\text{m}^3/\text{km}^2/\text{s}$).

Ahora bien como se muestra en la figura 9.9, se aprecia que dos estaciones que no se ajustan al modelo, por lo tanto se analizará los errores del modelo ajustado tipo Fleming con dichas estaciones y sin estas.

Posteriormente se determinaron los errores existentes entre el modelo propuesto con los gastos sólidos en suspensión de cada estación, para evaluar la precisión que este tiene en las cuencas chilenas que se ha desarrollado el estudio, aplicando la ecuaciones 6.2 y 6.3 que se muestran a continuación, el Procedimiento utilizado para obtener los errores se encuentran en Anexo 4, donde se obtuvo unos errores de:

- Error cuadrático

$$e = \sqrt{\frac{\sum(x - \hat{x})^2}{(n - 2)}} \quad (6.2)$$

Tabla 9.5 - Resultados de errores cuadráticos modelo propuesto gasto sólido específico.

Todas estaciones	216.157 (ton/año)
Sin E. Maipo y E. Tinguiririca	96.191 (ton/año)

- Error relativo

$$e = \frac{\sqrt{\frac{\sum(x - \hat{x})^2}{(n - 2)}}}{\hat{x}} \times 100 \quad (6.3)$$

Tabla 9.6 - Resultados de errores relativos modelo propuesto gasto sólido específico.

Todas estaciones	41,6 %
Sin E. Maipo y E. Tinguiririca	18,5 %

Luego para poder visualizar de mejor manera el ajuste entre los datos medidos y los obtenidos a través del modelo propuesto, en la figura 9.10 aparecen los gastos sólidos en suspensión medio anual específico de cada estación versus el gasto sólido específico obtenido al utilizar el modelo ajustado a las cuencas chilenas, donde se aprecia que existe una buena correlación entre ellos.

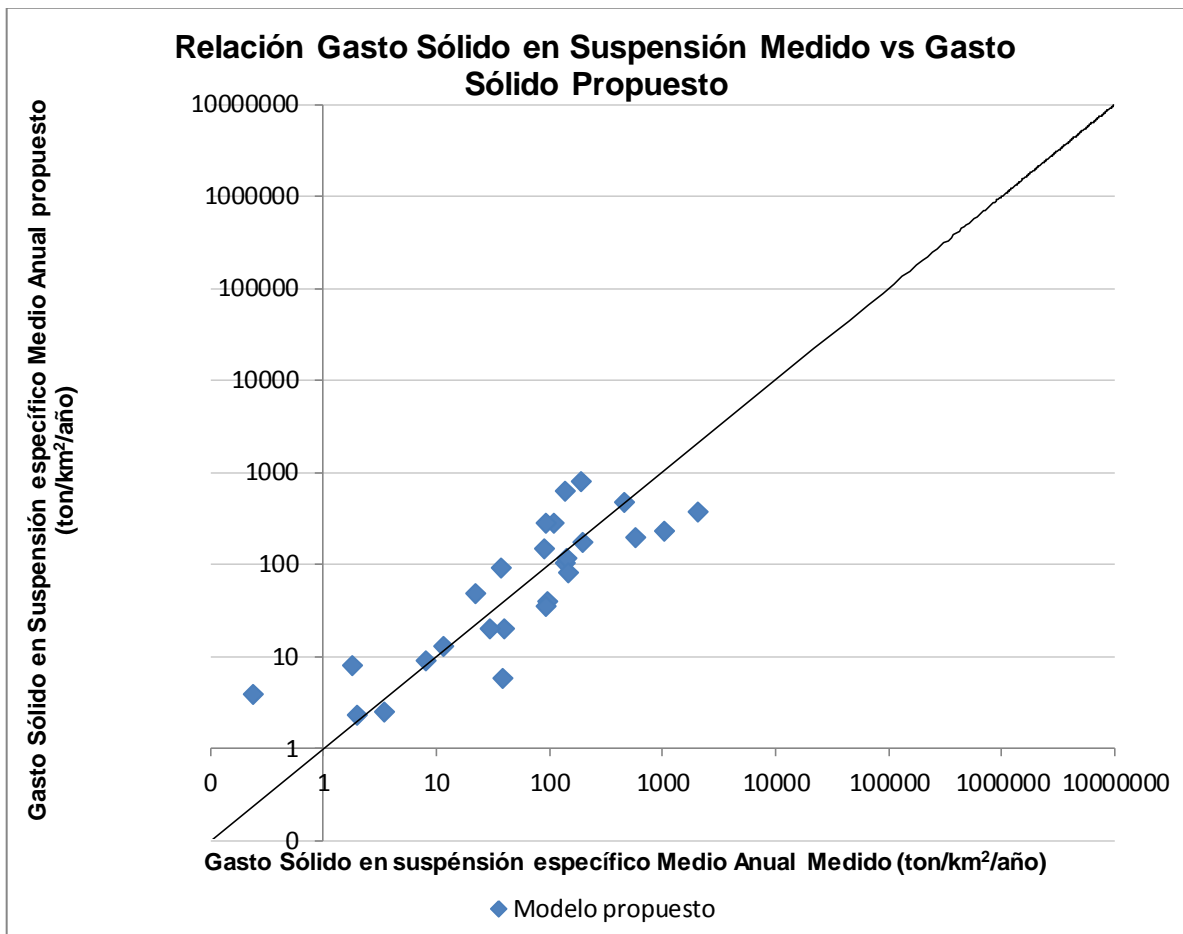


Figura 9.10 - Relación gasto sólido en suspensión específico medido y modelo propuesto gasto sólido específico.

A continuación se muestra en la figura 9.11 la tendencia media de las estaciones seleccionadas de la zona Norte-Centro, donde se aprecia que la estación río Maipo en el Manzano se sale de la distribución de la nube de puntos.

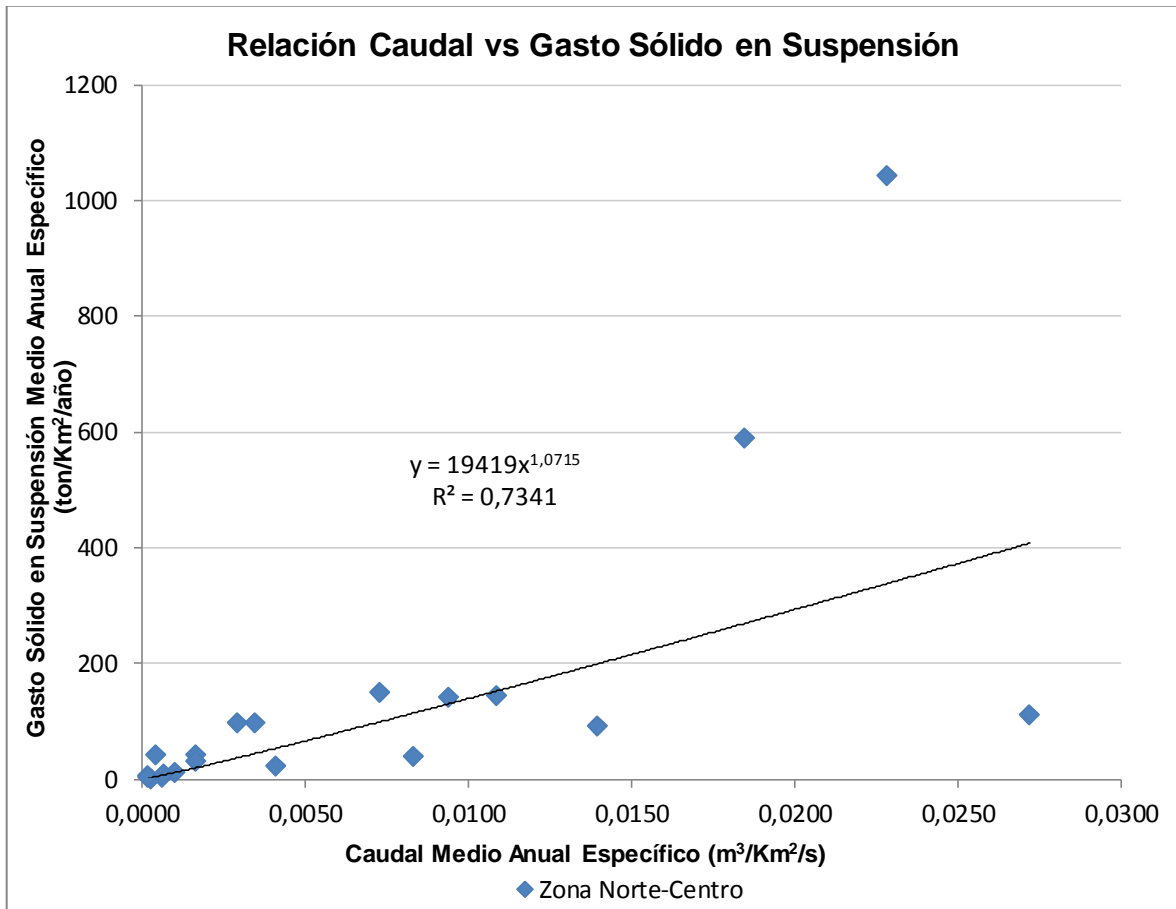


Figura 9.11 - Gasto sólido en suspensión medio anual específico Zona Norte-Centro

A Partir de la figura 9.11 se logró la curva de gasto sólido en suspensión media anual de la zona Norte-Centro correspondiente a $G_{msa} = 19.419 Q_{ma}^{1,072}$, donde G_{msa} es gasto sólido en suspensión en (ton/año) y Q_{ma} es el caudal medio anual en (m³/s).

Ahora bien se muestra en la figura 9.11 que existen una estación que no se ajustan a la tendencia media de la nube, que es río Maipo en el Manzano, pero se aprecia que hasta la estación río Mapocho rinconada Maipú se ajusta perfectamente al modelo, por lo tanto se analizará los errores del modelo propuesto gasto sólido en suspensión específico con dicha estación y sin esta.

Posteriormente se determinaron los errores existentes entre el modelo propuesto con los gastos sólidos en suspensión específico de la estaciones perteneciente a la zona Norte-Centro, para evaluar la precisión que tiene este, aplicando la ecuaciones 6.2 y 6.3 que se muestran a continuación, el Procedimiento utilizado para obtener los errores se encuentran en Anexo 4, donde se obtuvo unos errores de:

- Error cuadrático

$$e = \sqrt{\frac{\sum(x - \hat{x})^2}{(n - 2)}} \quad (6.2)$$

Tabla 9.7 - Resultados de errores cuadráticos modelo propuesto gasto sólido en suspensión específico Zona Norte-Centro.

Todas estaciones Norte-Centro	198.215 (ton/año)
Sin E. Maipo	41.023 (ton/año)

- Error relativo

$$e = \frac{\sqrt{\frac{\sum(x - \hat{x})^2}{(n - 2)}}}{\hat{x}} \times 100 \quad (6.3)$$

Tabla 9.8 - Resultados de errores relativos modelo propuesto gasto sólido en suspensión específico Zona Norte-Centro.

Todas estaciones Norte-Centro	38,1 %
Sin E. Maipo	25,9 %

Luego para poder visualizar de mejor manera el ajuste entre los datos medidos y los obtenidos a través del modelo propuesto, en la figura 9.12 aparecen los gastos sólidos en suspensión medio anual específico de cada estación versus el gasto sólido específico obtenido al utilizar el modelo ajustado a las cuencas chilenas, donde se aprecia que existe una buena correlación entre ellos.

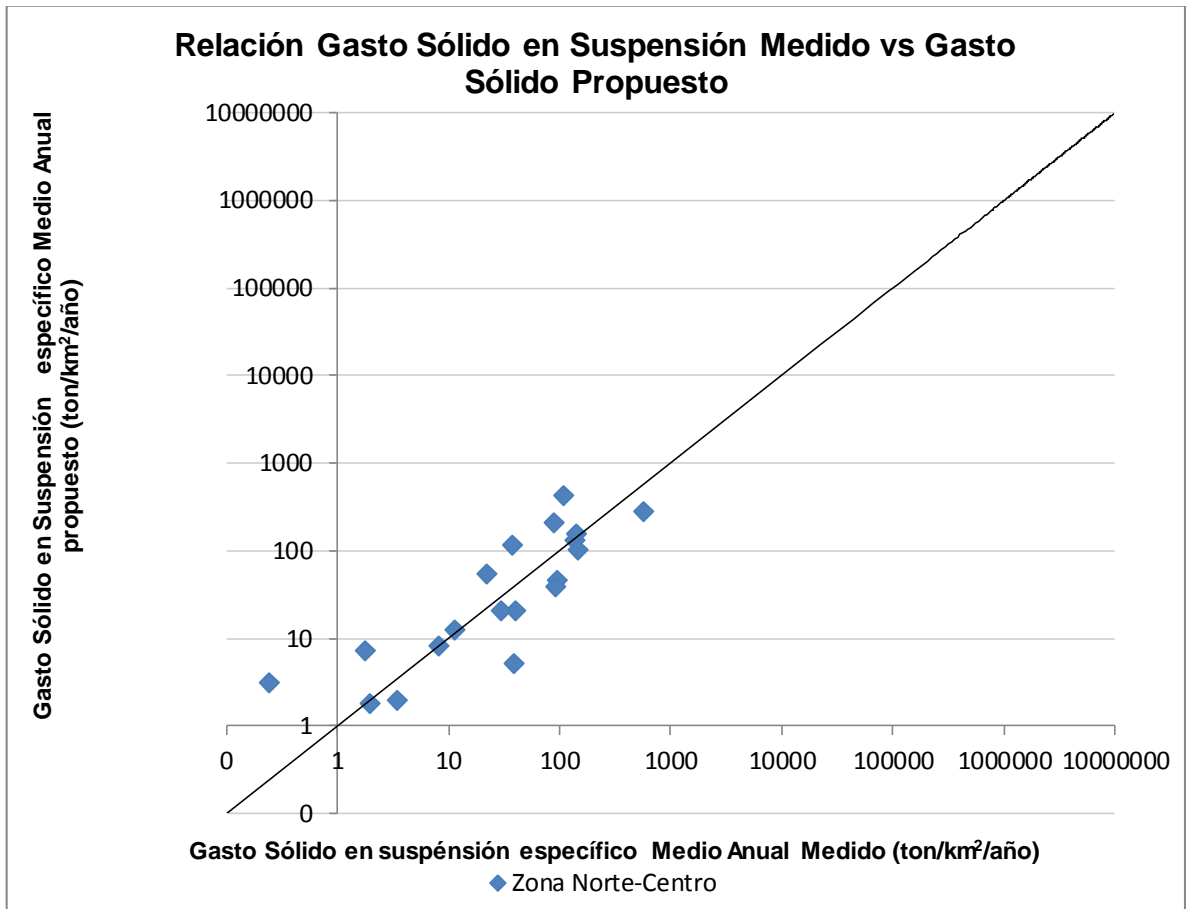


Figura 9.12 - Relación gasto sólido en suspensión específico medido y modelo propuesto gasto sólido en suspensión específico.

10. Conclusiones

El trabajo realizado en el presente estudio, permite una mejor comprensión de la dimensión del transporte de sedimentos en suspensión en varios cauces donde existe control sedimentométrico.

En base a datos medidos, fue posible obtener resultados tangibles de la cantidad de sedimentos en suspensión que se transporta por los cauces, en función por ejemplo del caudal medio anual y área de drenaje, siendo esto determinante para poder estimar entre otras cosas, el volumen muerto de los embalses.

Con respecto a los datos utilizados, se dispuso de muestreos integrados que proporcionan una información más completa de los sedimentos en suspensión que se transportan en toda el área transversal de los cauces (medidos cada cierto tiempo), complementados con los muestreos rutinarios, los cuales proporcionan datos diarios de concentraciones de sedimento, incluso en las crecidas que arrastran una gran cantidad de sedimentos. Sin embargo en algunas pocas estaciones existía restricción de la información.

Se analizó la teoría propuesta por Fleming, donde presenta cuatro curvas, de la cual solo una, la curva N°4, se aproxima a los valores medidos en las cuencas analizadas, correspondiente a la expresión recomendada para coberturas de arbusto y desierto

Al comparar los datos medidos con los gastos sólidos en suspensión medios anuales obtenidos a partir de las expresiones de Dendy y Bolton, se observó que la teoría desarrollada por estos autores no tiene correlación con las cuencas chilenas, debido a que éstos en su investigación concluyeron que a partir de una escorrentía mayor a 2 pulgadas, es decir 50,8 mm, el gasto sólido en suspensión por área decrece a medida que la escorrentía aumenta, a diferencia de lo que ocurre en las cuencas de estudio, por lo tanto no es representativo para éstas situaciones.

Con respecto a los modelos ajustados a los gastos sólidos en suspensión medio anual de las cuencas en estudio, se debe considerar que el modelo tipo potencial (Fleming) presenta un mejor ajuste que el modelo ajustado tipo Dendy y Bolton. En este último modelo para escorrentías superiores a 50,8 mm, el exponente tuvo un ajuste positivo, contrariamente al modelo original, con el fin de que la producción de gasto sólido en suspensión medio anual por área de drenajes aumente con la escorrentía media anual de la cuenca, lográndose una expresión representativa del gasto sólido en suspensión en la zona sur del país donde se cumple que la escorrentía es mayor a 50,8 mm.

Con respecto al modelo basado en caudales y gastos sólidos específicos propuesto en este estudio, éste presenta una buena correlación con los datos reales de las estaciones analizadas, por lo cual puede utilizarse para estimar sedimentos en cuencas no controladas.

Al analizar el modelo ajustado tipo Dendy y Bolton para los datos medidos de las estaciones, se observó que la expresión para escorrentías superiores a 50,8 mm, el exponente es positivo, por lo tanto ahora la producción de gasto sólido en suspensión medio anual por área de drenajes aumenta con la escorrentía media anual de la cuenca, ahora estas expresiones son representativas del gasto sólido en suspensión en la zona sur del país donde se cumple que la escorrentía es mayor a 50,8 mm.

Finalmente es posible sintetizar los resultados de esta memoria, indicando que los métodos empíricos de Fleming y Dendy y Bolton no lograron un buen ajuste en las cuencas con información sedimentométrica medidas en varias estaciones ubicadas a lo largo de Chile, en lo que respecta a la estimación del gasto sólido en suspensión medio anual, debido a múltiples factores como el tipo de suelos, el terreno, la vegetación, uso del suelo y prácticas agrícolas, por lo que fue necesario realizar ajustes a sus curvas originales con el fin que sus estimaciones fueran representativa de la información medida en las 27 cuencas estudiadas.

11. Referencias bibliográficas

- [1] Moreno Pérez, J.A ; Giráldez Cervera, J.V. “Modelo de dimensionamiento de embalses. Aplicación práctica estudio de viabilidad de presas” Alpujarra, Granada, España.
- [2] Rusell W. Faust, P.E (2009); “Hydrology” Review for Civil Engineers.
- [3] Niemeyer; H. Cereceda; Pilar; “Cuencas hidrográficas y embalses principales” Adaptación desde Instituto Geográfico Militar (IGM) de Geografía de Chile. Hidrografía .1984
- [4] Ven te Chow; David R. Maidment; Larry W. Mays; “Hidrología Aplicada”, McGraw-Hill
- [5] Linsley; Kholer; Paulhus; “Hidrología para ingenieros”, Segunda edición, McGraw-Hill 1975.
- [6] Juan José Victoria; “Sedimentos Fluviales”, Guatemala, Septiembre de 1999.
- [7] W. D. Ellison, Studies of Raindrop Erosion, Agric. Eng., vol 25.
- [8] Uyttendaele, P.G.Y. “Procesos de transporte de sedimentos en áreas de montaña, comparación entre la cuenca del río Cordón (Alpes, Italia) y del estero Tres Arroyos (Andes, Chile)”. Tesis Doctorado en Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, programa de cotutela con Università degli Studi di Padova (Italia). 2006.
- [9] Bogardi, J. “Sediment transport in alluvial streams”, Akadémiai Kiadó, Budapest, (1978).
- [10] Simons, D.B. y Sentürk, F. “Sediment transport technology”, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, (1977).
- [11] Emmett W.W. “Bedload transport in two large gravel-bed rivers, Idaho and Washington”, In: Proceedings of Third Federal Interagency Sedimentation Conference, Sedimentation Committee of the Water Resource Council, Denver, Colorado, 4 (1976) 100-113.
- [12] Jackson W.L. y Beschta R.L. “A model of two-phase bedload transport in an Oregon Coast Range stream”. Earth Surface Processes and Landforms, 7 (1982) 517-527.
- [13] Andrews E.D. “Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado”. Geological Society of America Bulletin, 95 (1984) 371-378.
- [14] Andrews E.D. y Nankervis J.M., “Effective discharge and the design of channel maintenance flows for gravel-bed rivers”. In: Natural and anthropogenic influences in fluvial geomorphology (Costa J.E., Miller A.J., Potter K.W. y Wilcock P.R. eds), American Geophysical Union Monograph Series, 89 (1995) 151-164.
- [15] Ryan S.E., Porth L.S. y Troendle C.A. “Defining phases of bedload transport using piecewise regression”. Earth Surface Processes and Landforms, 27 (2002) 971-990.
- [16] Andrews E.D. y Smith J.D., “A theoretical model for calculating marginal bedload transport rates of gravel”, In: Dynamics of gravel-bed rivers (Billi P., Hey R.D., Thorne C.R. y Tacconi P. eds), Wiley, Chichester, (1992) 41-52.
- [17] Lisle T.E. “Particle size variations between bed load and bed material in natural gravel bed channels”. Water Resources Research, 31(4), (1995) 1107-1118.
- [18] Walling, D.E. y Webb, B.W., “Suspended load in gravel-bed rivers: UK experience”, In: Sediment transport in Gravel-Bed Rivers (Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. eds), Wiley, Chichester, (1987) 545-579.
- [19] Bathurst J.C., Graf W.H. y Cao H.H., “Bed load discharge equations for steep mountain rivers”, In: Sediment transport in Gravel-Bed Rivers (Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. eds), Wiley, Chichester, (1987) 453-491.

- [20] Whittaker J.G., "Sediment transport in step-pool streams", In: Sediment transport in Gravel-Bed Rivers (Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. eds), Wiley, Chichester, (1987) 545-579.
- [21] Billi P., D'Agostino V., Lenzi M.A. y Marchi L., "Bedload, slope and channel processes in a high-altitude Alpine torrent", In: Gravel-Bed Rivers in the Environment (Klingeman P., Beschta R., Komar P. y Bradley J. eds), Water Resources Publications, LLC, (1998) 15-38.
- [22] Beschta, R. L., "Conceptual models of sediment transport in streams", In: Sediment transport in Gravel-Bed Rivers (Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. eds), Wiley, Chichester, (1987) 387-419.
- [23] Slattery M.C. y Burt T.P. "Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow". *Earth Surface Processes and Landforms*, 22 (1997) 705-719.
- [24] U. S. Interagency Committee on Water Resources, A Study of Methods Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams, Rep. 14, Minneapolis, Minn., 1963.
- [25] B. R. Colby, Relationship of Unmeasured Discharge to Mean Velocity, *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 38, October 1957.
- [26] W. B. Langbein and S. A. Schumm, Yield of Sediment in Relation to Mean Annual Precipitation, *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 39, December 1958.
- [27] G. Fleming, Design Curves for Suspended Load Estimation, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. 43, 1969.
- [28] F. E. Dendy and G. C. Bolton, Sediment yield-runoff-drainage area relationships in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol. 31 (6), 1976.