

DESCARGA EFECTIVA COMO HERRAMIENTA PREDICTIVA DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN EL RÍO ITATA, REGIÓN DEL ÑUBLE

R. Barrientos Urquiza¹, D. Caamaño Avendaño² y M. Villagrán Valenzuela³

RESUMEN:

El presente trabajo se enfocó en el análisis morfológico de un tramo del río Itata ubicado en la Región de Ñuble. El tramo comienza en la junta con el río Larqui y se extiende hasta el puente Itata en Nueva Aldea, recorriendo una distancia de 3.2 km. Se seleccionaron seis secciones transversales para representar el tramo de estudio y utilizó teledetección para cuantificar las variables morfológicas de ancho y sinuosidad en cada una de las secciones y el tramo, respectivamente. El periodo estudiado se seleccionó en función de la disponibilidad de información de caudales y sedimentos, estableciéndose entre los años 1985 a 2018. La descarga efectiva se estima por medio de un método analítico y se realiza un análisis de tendencias para evaluar su capacidad predictiva sobre los cambios morfológicos. Los resultados indican un estrechamiento máximo en el ancho de la sección S5 de 90 m y un ensanchamiento máximo de 62 m en la sección S3. Para el periodo de evaluación, el tramo del río presentó un índice de sinuosidad decreciente en el tiempo, lo que implica un aumento de la pendiente longitudinal y de la capacidad de transporte del sistema. Además, se encontró una relación significativa entre los cambios de las variables morfológicas y la descarga efectiva. Esto permite realizar estimaciones y pronósticos del comportamiento futuro del río y así proporcionar una base sólida para futuras investigaciones y estrategias de gestión en obras hidráulicas y conservación fluvial.

PALABRAS CLAVES: Descarga efectiva, cambios morfológicos, herramienta predictiva.

ABSTRACT:

The present work focused on the morphological analysis of a section of the Itata River located in the Ñuble Region. The section begins at the junction with the Larqui River and extends to the Itata Bridge in Nueva Aldea, covering a distance of 3.2 km. Six cross sections were selected to represent the study section and remote sensing was used to quantify the morphological variables of width and sinuosity in each of the sections and the section, respectively. The period studied was selected based on the availability of flow and sediment information, settling between the years 1985 to 2018. The effective discharge is estimated by means of an analytical method and a trend analysis is performed to evaluate its predictive capacity on morphological changes. The results indicate a maximum narrowing in the width of section S5 of 90 m and a maximum widening of 62 m in section S3. For the evaluation period, the river section presented a decreasing sinuosity index over time, which implies an increase in the longitudinal slope and the carrying capacity of the system. In addition, a significant relationship was found between changes in morphological variables and effective discharge. This allows estimates and forecasts of the future behavior of the river to be made, thus providing a solid basis for future research and management strategies in hydraulic works and river conservation.

KEYWORDS: Effective discharge, morphological changes, predictive tools.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rbarrientosu@ing.ucsc.cl

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamano@ucsc.cl

³ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mwillagran@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los ríos desempeñan un papel fundamental en el transporte de caudales líquidos y sólidos desde las cuencas hidrográficas a los océanos. Estos sedimentos pueden ser de distintos tamaños y dependiendo de su diámetro, se comportan de diferentes maneras; pueden arrastrarse, rodar, saltar, transportarse en suspensión o desplazarse en el lecho del río generando áreas de erosión y depositación, produciendo así cambios morfológicos (Mao, L. 2016).

Los cambios morfológicos en los ríos son resultantes de efectos naturales a largo plazo, pero también están influenciados por eventos extremos de corto plazo y el cambio climático. Los cambios de forma pueden producir diferentes impactos en el ecosistema fluvial o en la infraestructura (i.e. erosión de riberas, avulsiones, cambios en el tipo de substrato, etc.), y por lo tanto, son necesarios de considerar para un correcto manejo o administración del sistema fluvial.

La morfología de un río depende de un conjunto de elementos definidos por la hidrología y la carga de sedimentos o caudal sólido, que a su vez están determinados por la morfología de la cuenca y los impactos antrópicos (i.e. uso de la tierra sin supervisión, deforestación y desarrollo de infraestructuras) (Mittal et al., 2022). Cualquier modificación en alguno de estos elementos produce una inestabilidad en el sistema fluvial, y consecuentemente, causa cambios en las variables hidráulicas como la velocidad del flujo, valores máximos para altura de agua y esfuerzo cortante (Mao, L. 2016), y con ello cambios morfológicos (Mittal et al., 2022). La forma del cauce también es un indicador del comportamiento fluvial y por lo tanto ofrece una alternativa para analizar los impactos sobre estructuras fluviales existentes y/o futuras. En este contexto, es relevante conocer una aproximación de los cambios y las variables hidráulicas asociadas. Las diversas formas fluviales producirán distintos patrones de flujo que, eventualmente, pueden superar las condiciones iniciales consideradas en un diseño.

La morfología fluvial es parte integral del ecosistema y es esencial, tanto para el medio ambiente como para la ingeniería fluvial, motivo que impulsa la recuperación de los espacios fluviales para convertirlos en lugares ambientales adecuados que, con el tiempo, puedan ser autosostenibles y resilientes (Fluvial, 2011). Este proceso es denominado “Restauración fluvial” (Fluvial, 2011) y hoy en día, es tema de contingencia mundial.

En este contexto, la teledetección se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada para cuantificar los cambios morfológicos en ríos, tal cual lo indican los estudios realizados por Ahmad et al. (2018), García y Ojeda (2011) y Goswami (2013). Sin embargo, no se ha establecido una herramienta predictiva capaz de indicar las tendencias de cambio de los sistemas fluviales, y por lo tanto, estas relaciones de primer orden son necesarias de explorar. Una manera de estudiar estos cambios es a través de la descarga o caudal efectivo, el cual se define como el flujo que transporta la mayor cantidad de sedimentos durante un periodo determinado (Goodwin, 2004). Chile presenta una variación significativa en las magnitudes de la descarga efectiva, con una marcada distribución de norte a sur (Donoso, 2022), sugiriendo que las herramientas predictivas sean altamente sitio específicas.

Este estudio propone abordar la descarga efectiva como herramienta predictiva de cambios morfológicos en un tramo del río Itata. Se utiliza el método analítico propuesto por Goodwin (2004) para clasificar los cambios de forma que a su vez se cuantifican por medio de herramientas de teledetección.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la descarga efectiva como herramienta predictiva de cambios morfológicos en un tramo del río Itata.

2.2 Objetivos específicos

- i. Cuantificar las variaciones en magnitud de la descarga efectiva para el periodo de estudio
- ii. Cuantificar los cambios morfológicos en la forma de variaciones de ancho y sinuosidad
- iii. Definir la capacidad predictiva de la descarga efectiva para estimar tendencias de cambio de forma en el sistema fluvial estudiado.

3. MÉTODOS

3.1 Área de estudio

La cuenca del río Itata se ubica en la Región del Ñuble y comprende un área de 11,293 km² la cual se extiende desde la Cordillera de Los Andes hasta el océano Pacífico. La Figura 1 muestra la red hidrográfica del río Itata con sus principales afluentes, el río Diguillín, río Larqui y río Ñuble. El área de estudio cubre el segmento del río Itata ubicado al sur de la localidad de Nueva Aldea hasta la junta con el río Larqui, específicamente se extiende entre los puntos geográficos 36.66°S, 72.45°O y 36.68°S, 72.44°O y cubre una distancia de 3.2 km (Figura 2). Este tramo incluye el puente Itata, el cual podría verse afectado por posibles cambios morfológicos en el futuro.

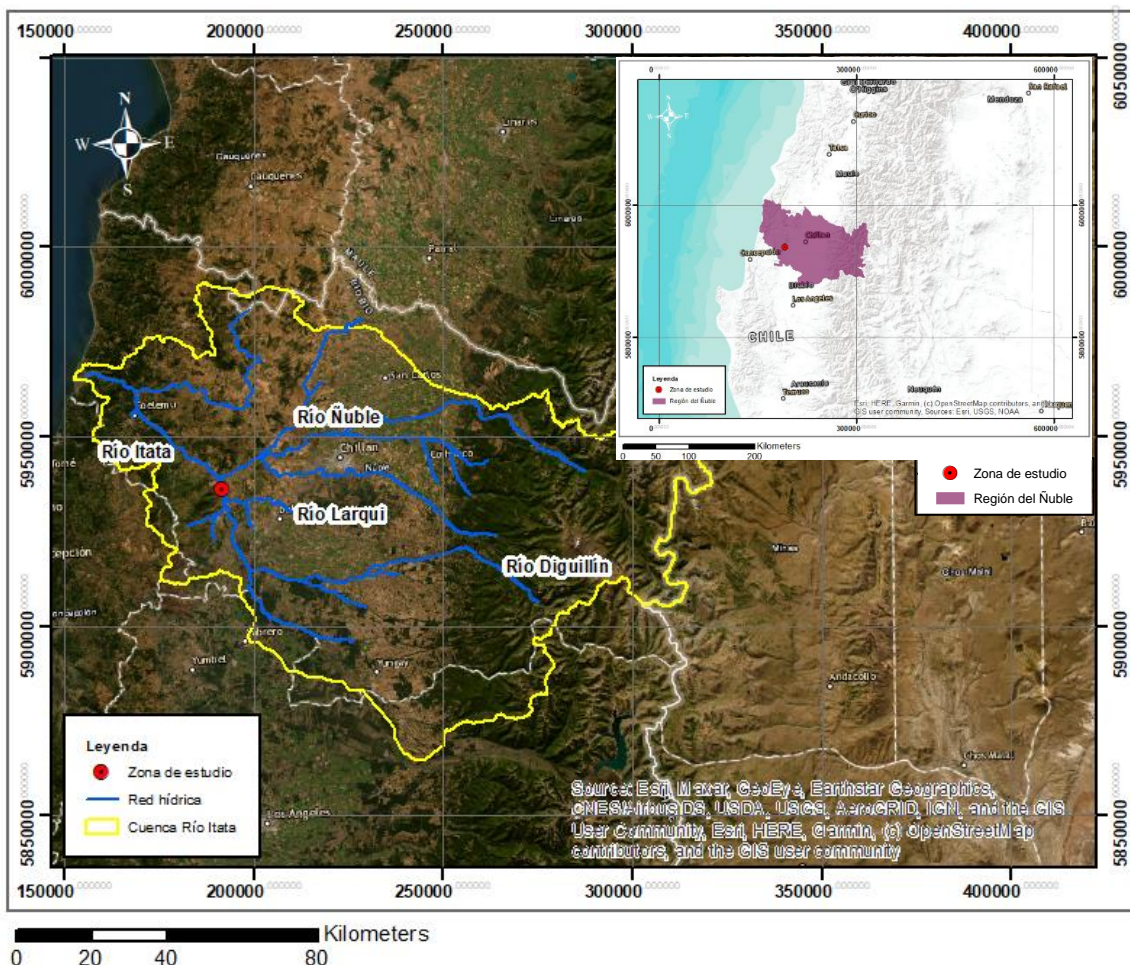


Figura 1: Cuenca del río Itata. (Fuente: elaboración propia).

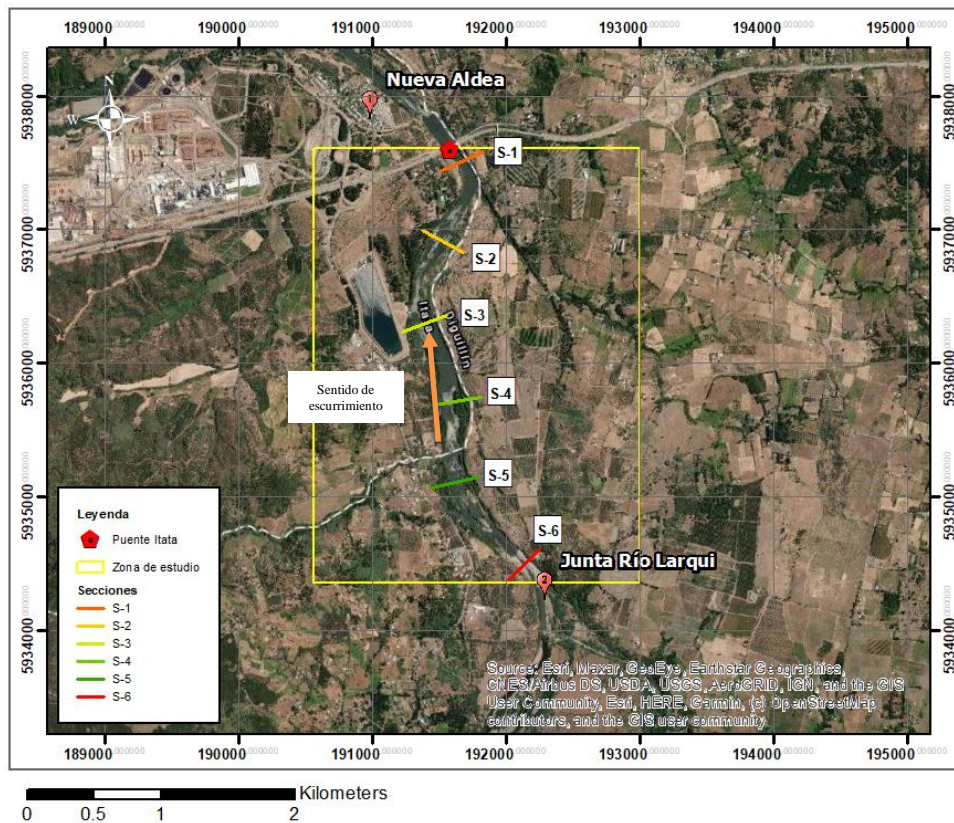


Figura 2: Zona de estudio y secciones transversales. (Fuente: elaboración propia).

Tomando como antecedente el Mapa Geológico de Chile (1:1.000.000) del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), se observa que la zona de estudio se encuentra en depósitos fluviales de grava, arena y limo (**Qf**), referidos al Pleistoceno – Holoceno (Figura 3). Desde el punto de vista hidrogeológico, la zona se caracteriza por presentar permeabilidad primaria (en formación porosa), la cual corresponde principalmente a material de relleno constituido por depósitos no consolidados de alta permeabilidad (Figura 4), característica concordante a la geología del lugar.

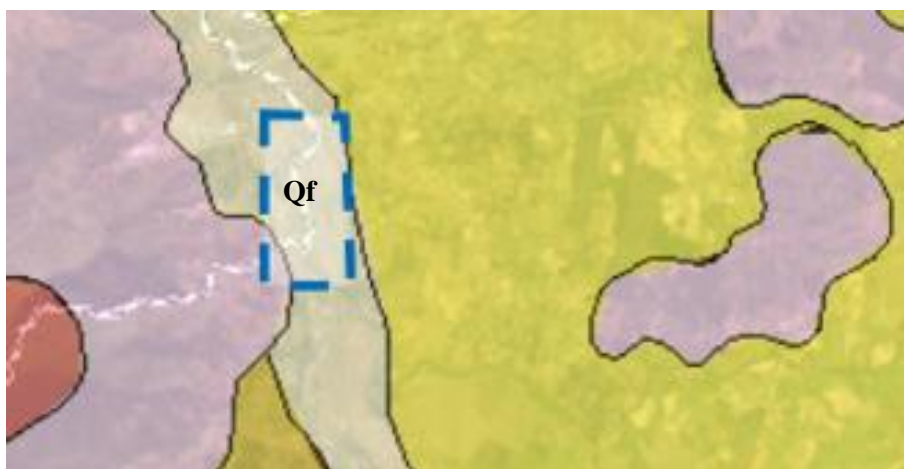


Figura 3: Mapa geológico (1:1.000.000). Se identifica la zona de estudio mediante el rectángulo azul. (Fuente: SERNAGEOMIN).

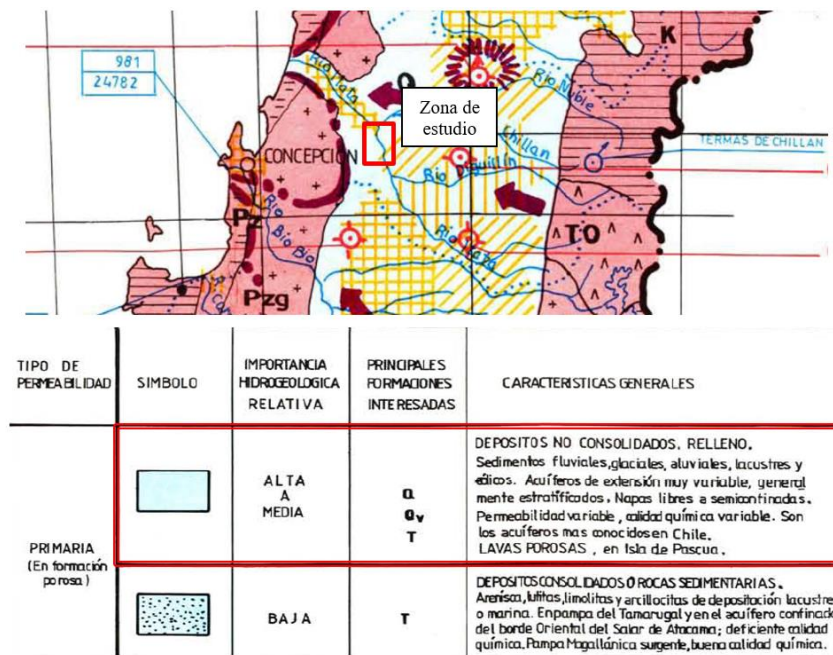


Figura 4: Mapa hidrogeológico de Chile. (Fuente: DGA).

3.2 Método de cálculo para la descarga efectiva

Se define la descarga o caudal efectivo (Q_e) como el flujo que transporta la mayor cantidad de sedimentos durante un periodo determinado y corresponde a un indicador de la forma del cauce con respecto a una condición de equilibrio (Goodwin, 2004). Su importancia radica en que proporciona información clave sobre el comportamiento morfológico de un río y su capacidad de transportar sedimentos (Tranmer, et al., 2022). Si el caudal efectivo se contiene fácilmente en el cauce es indicador que el río podría estar degradándose, es decir, el lecho o las paredes del canal podrían estar erosionándose; en cambio, si el caudal efectivo no puede ser contenido y se extiende hacia las planicies de inundación, el río podría estar agradándose (Goodwin, 2004).

Teniendo en cuenta el método de Goodwin (2004) para el cálculo de la descarga efectiva, se requieren datos de caudales medios diarios (Q), [m^3/s] y datos de sedimentos en suspensión diarios (Q_s), [Ton]. Se ajustó una función de distribución de probabilidad a cada conjunto de datos de caudales Q considerando para ello los modelos de distribución Normal, Pearson, Log-Pearson III, Gamma, Log-Normal y Log-Normal III, y se utilizó la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov (KS) para discriminar la mejor aproximación.

Los datos de Q_s se ajustaron mediante una función potencial (Ec. (1)), donde α y β corresponden a parámetros de clasificación asociados al transporte). Además, Goodwin (2004) concluyó que la constante α , no influye en la estimación de Q_e , por lo que solo es necesario encontrar la tasa de aumento del transporte de sedimentos con el flujo representada por β . (Se incluye gráfica “ Q_s vs Q ” para extraer datos de β en Anexo 2).

$$Q_s = \alpha * Q^\beta \quad (1)$$

3.2.1 Análisis temporal

Se eligió la estación *Río Itata en Balsa Nueva Aldea*, ubicada aguas abajo del puente Itata (Tabla 1) para recopilar datos diarios de caudal y concentración de sedimentos en suspensión (Figura 5), esto mediante el sitio web oficial de la Dirección General de Aguas (DGA). Para este estudio, se seleccionó el periodo de 1985 a 2018, correspondiente a los años disponibles de datos de la estación. Continuando con el enfoque presentado en Donoso et al. (2022), se conformaron dos conjuntos de datos para el periodo de estudio. El primero definido como “ventanas móviles”, cuyo objetivo es analizar la evolución de una señal a lo largo del tiempo, así es como se conforman intervalos fijos de 5 años (Tabla 2), puesto que se observa que los valores máximos de sedimentos se presentan cada 5 años aproximadamente (Figura 5). El segundo conjunto, llamado “ventanas crecientes”, permite capturar información sobre la evolución global de señales y su tendencia a largo plazo (Signal Processing Spain Chapter, s.f), esto debido a la estabilidad observada en los valores de concentración de sedimentos entre los años 2009 y 2018 (Figura 5). Por lo tanto, este conjunto de datos comienza con un intervalo inicial de 10 años y se incrementa en 1 año en cada subsiguiente ventana (Tabla 3)

Tabla 1: Datos estación fluviométrica y sedimentométrica.

Estación	Río Itata en Balsa Nueva Aldea	Código cuenca	081
Altitud (m.s.n.m)	29	Código subcuenca	0813
Estado	Vigente	Región	Del Ñuble
UTM Este	727,913	Provincia	Ñuble
UTM Norte	5,940,281	Comuna	Chillán

Tabla 2: Periodos de análisis para ventana móvil.

Periodo	Ventana móvil (5 años)	Periodo	Ventana móvil (5 años)	Periodo	Ventana móvil (5 años)
1	1985-1989	11	1995-1999	21	2005-2009
2	1986-1990	12	1996-2000	22	2006-2010
3	1987-1991	13	1997-2001	23	2007-2011
4	1988-1992	14	1998-2002	24	2008-2012
5	1989-1993	15	1999-2003	25	2009-2013
6	1990-1994	16	2000-2004	26	2010-2014
7	1991-1995	17	2001-2005	27	2011-2015
8	1992-1996	18	2002-2006	28	2012-2016
9	1993-1997	19	2003-2007	29	2013-2017
10	1994-1998	20	2004-2008	30	2014-2018

Tabla 3: Periodos de análisis para ventana creciente.

Periodo	Ventana creciente	Periodo	Ventana creciente	Periodo	Ventana creciente
1	1985-1994	10	1985-2003	19	1985-2012
2	1985-1995	11	1985-2004	20	1985-2013
3	1985-1996	12	1985-2005	21	1985-2014
4	1985-1997	13	1985-2006	22	1985-2015
5	1985-1998	14	1985-2007	23	1985-2016
6	1985-1999	15	1985-2008	24	1985-2017
7	1985-2000	16	1985-2009	25	1985-2018
8	1985-2001	17	1985-2010	-	-
9	1985-2002	18	1985-2011	-	-

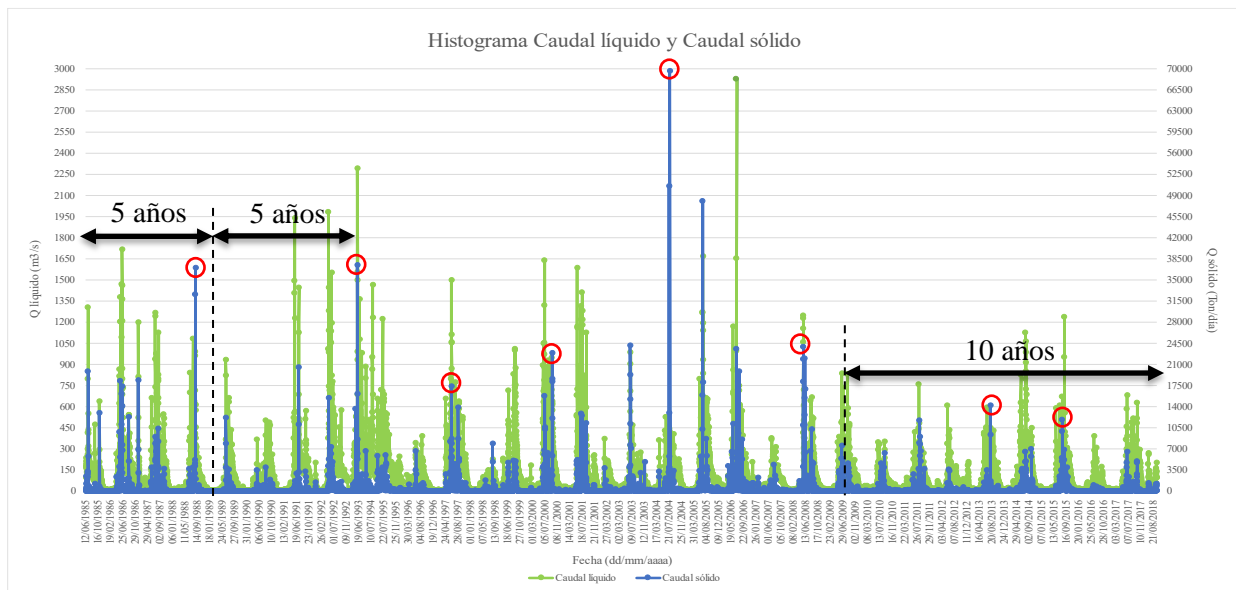


Figura 5: Datos de caudales líquidos y sólidos desde 1985 a 2018. (Fuente: elaboración propia)

3.3 Cambios morfológicos y su cuantificación

3.3.1 Selección y descarga de las imágenes satelitales

Se recopiló información a partir de sensoramiento remoto según lo descrito en Mittal et al. (2022). Se utilizan entonces imágenes satelitales, sensores Landsat 5 y 8, para la cuantificar los cambios morfológicos. Las imágenes fueron obtenidas gratuitamente a través del portal de Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), se utilizó el software ArcGis 10.5 para procesar la información.

El análisis se basó en la comparación de 12 imágenes satelitales de la zona entre los años 1985 y 2018, considerando las fechas previas y posteriores a crecidas de caudal por lo tanto definiendo dos grupos. El primero para caudales bajos del orden de $4\text{ m}^3/\text{s}$ y $12\text{ m}^3/\text{s}$, y un segundo grupo para caudales mayores entre los $70\text{ m}^3/\text{s}$ y $90\text{ m}^3/\text{s}$ (Tabla 4).

Uno de los satélites de las imágenes seleccionadas fue el Landsat 5 que cuenta con los sensores MSS (*Multispectral Scanner System*) y TM (*Thematic Mapper*). El primer sensor es uno de los más antiguos y pero el segundo posee mayor resolución espectral y espacial, puesto fue diseñado para lograr una resolución de imagen más alta, separación espectral más nítida y una mayor precisión y resolución radiométrica. El MSS registraba datos en cuatro bandas espectrales; verde, rojo y dos bandas de infrarrojo, tenía una resolución espacial de 80 metros, una radiométrica de 6 bits y una frecuencia temporal de 16 días. Por otro lado, el sensor TM cuenta con siete bandas: azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio (2 bandas) y un infrarrojo térmico con una resolución espacial de 30 metros (a excepción de la banda 6 que tiene una resolución de 120 metros), radiométrica de 8 bits y frecuencia temporal de 16 días (Landsat Science, 2012).

El Landsat 8 también fue un satélite seleccionado, este posee dos instrumentos científicos, i) el OLI (*Operational Land Imager*), sensor que proporciona información mejorada de la superficie terrestre, mide las porciones visibles, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta y sus imágenes tienen resoluciones espaciales pancromáticas de 15 metros y multispectrales de 30 metros; y ii) el TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), sensor que mide la temperatura de la superficie terrestre en dos bandas infrarrojas térmicas adicionales a las del sensor OLI (Landsat Science, 2012).

Tabla 4: Imágenes satelitales seleccionadas para distintos años.

Imagen satelital	Fecha	Caudal (m ³ /s)	Satélite
Grupo 1			
1	02/10/1985	7.42	Landsat 5 TM
2	12/01/1986	9.46	Landsat 5 TM
3	01/03/1989	5.59	Landsat 5 TM
4	15/01/1990	4.00	Landsat 5 TM
5	14/02/1998	8.59	Landsat 5 TM
6	06/02/2001	11.20	Landsat 5 TM
7	05/03/2005	7.79	Landsat 5 TM
Grupo 2			
8	28/12/2006	85.30	Landsat 5 TM
9	27/11/2009	86.30	Landsat 5 TM
10	30/03/2014	72.60	Landsat 8 OLI/TIRS
11	09/02/2016	75.90	Landsat 8 OLI/TIRS
12	08/09/2018	71.30	Landsat 8 OLI/TIRS

3.3.2 Cálculo del ancho en distintas secciones de río

Se definen 6 secciones transversales y se enumeran en la dirección contraria al flujo mediante las herramientas del programa ArcGis 10.5. La primera sección se ubica 100 m aguas arriba del puente Itata y la última a 3100 m aguas debajo de la primera (Figura 2). Cabe notar que las secciones están separadas a una distancia promedio de 600 m.

El ancho de cada sección se midió de orilla a orilla según lo descrito en Mittal et al. (2022), por lo tanto, se delimitó el contorno del río utilizando el índice de agua de diferencia normalizada NDWI (Ec.(2) y (3)) propuesto por McFeeters (1996). Este método hace uso de radiación infrarroja cercana (NIR) y luz verde visible (GREEN) para resaltar masas de agua y mejorar su presencia en imágenes digitales de teledetección, además de eliminar características del suelo y vegetación terrestre (McFeeters, 1996).

Cabe notar que cada sensor utiliza una ecuación distinta para el NDWI. A continuación, se presentan las ecuaciones para los datos de Landsat 5 (Ec.(2)) y Landsat 8 (Ec.(3)):

$$\text{NDWI} = (\text{Banda 2} - \text{Banda 4}) / (\text{Banda 2} + \text{Banda 4}) \quad (2)$$

$$\text{NDWI} = (\text{Banda 3} - \text{Banda 5}) / (\text{Banda 3} + \text{Banda 5}) \quad (3)$$

Los datos extraídos de las imágenes satelitales mediante el NDWI, se expresan mediante una paleta de colores con valores cuyo rango corresponde a -1 a 1 (McFeeters, 1996). Los valores mayores a cero corresponden a zonas con un alto contenido de agua, es decir, zonas húmedas y/o masas de agua, mientras que valores menores o iguales a cero, indican zonas secas. De esta manera, es posible definir el contorno del río (las imágenes se encuentran en el Anexo 1).

Tabla 5: Valores del NDWI.

Rango	Descripción
0.2 – 1.0	Superficie del agua
0.0 – 0.2	Zonas húmedas
(-0.3) – 0.0	Sequía moderada
(-1.0) – (-0.3)	Sequía, superficie sin agua

Luego de delimitar el contorno del río, se midió el ancho desde la orilla izquierda a la orilla derecha para cada sección transversal y para cada imagen seleccionada.

3.3.3 Cálculo de la sinuosidad

Este concepto se aplica para establecer el comportamiento geomorfológico de un tramo de río y se calcula como la relación entre la longitud del cauce y la longitud del valle (Mittal et al., 2022) (distancia en línea recta entre un punto inicial y uno final) (Ec.(4)). Según Brice (1964), los resultados se pueden interpretar de tres maneras dependiendo de su valor. En caso de que $IS \geq 1.5$, el río se considera meándrico, por el contrario, si $IS \leq 1.1$, el río se considera recto, y consecuentemente para ríos sinuosos, el índice de sinuosidad deber corresponder al rango $1.1 \leq IS \leq 1.5$.

$$IS = \frac{LC}{LV} \quad (4)$$

Donde LC corresponde a la longitud del cauce, [m] y LV a la longitud del valle, [m].

El Índice de Sinuosidad se midió considerando el largo total del tramo de estudio, se obtuvo la longitud del cauce promediando la longitud de la orilla izquierda y la orilla derecha las que se calcularon a partir del NDWI de la misma forma que se realizó para el cálculo de los anchos. Por otro lado, la longitud del valle se midió en línea recta en el tramo desde el puente Itata hasta la junta con el río Larqui. El IS de las secciones transversales se calculó a partir de la longitud del cauce y la longitud del valle para cada tramo parcial definido por la ubicación de las secciones.

3.4 Relación entre la descarga efectiva y los cambios morfológicos

Para relacionar la descarga efectiva con las distintas variables de cambio morfológico, se crearon diferentes gráficos que incluyen información sobre la progresión del ancho del río en cada sección, la sinuosidad del tramo, y la descarga efectiva, para todo el periodo desde 1985 a 2018. De esta manera, se compara el comportamiento de las variables con respecto a los cambios en los valores de las descargas efectivas.

Para complementar este estudio y analizar el efecto del caudal efectivo en los cambios de las variables ancho y sinuosidad, se calculó el caudal mínimo que necesita el sedimento para comenzar a transportarse, esto mediante la *Curva de Hjulström* (Figura 6), la cual nos entrega la velocidad umbral necesaria para la sedimentación, transporte y/o erosión de una partícula de tamaño determinado (Hjulström, 1935), que para efectos de este trabajo y considerando la litología de la zona donde se sitúa el río, se utilizó un tamaño de

partículas de 35 mm (diámetro promedio de las gravas). Luego, a partir de la ecuación de Manning (Ec. (5)), se calcula el caudal correspondiente a la velocidad seleccionada en la curva, y se verifica que dichas magnitudes de flujo corresponden al rango de los resultados de la descarga efectiva.

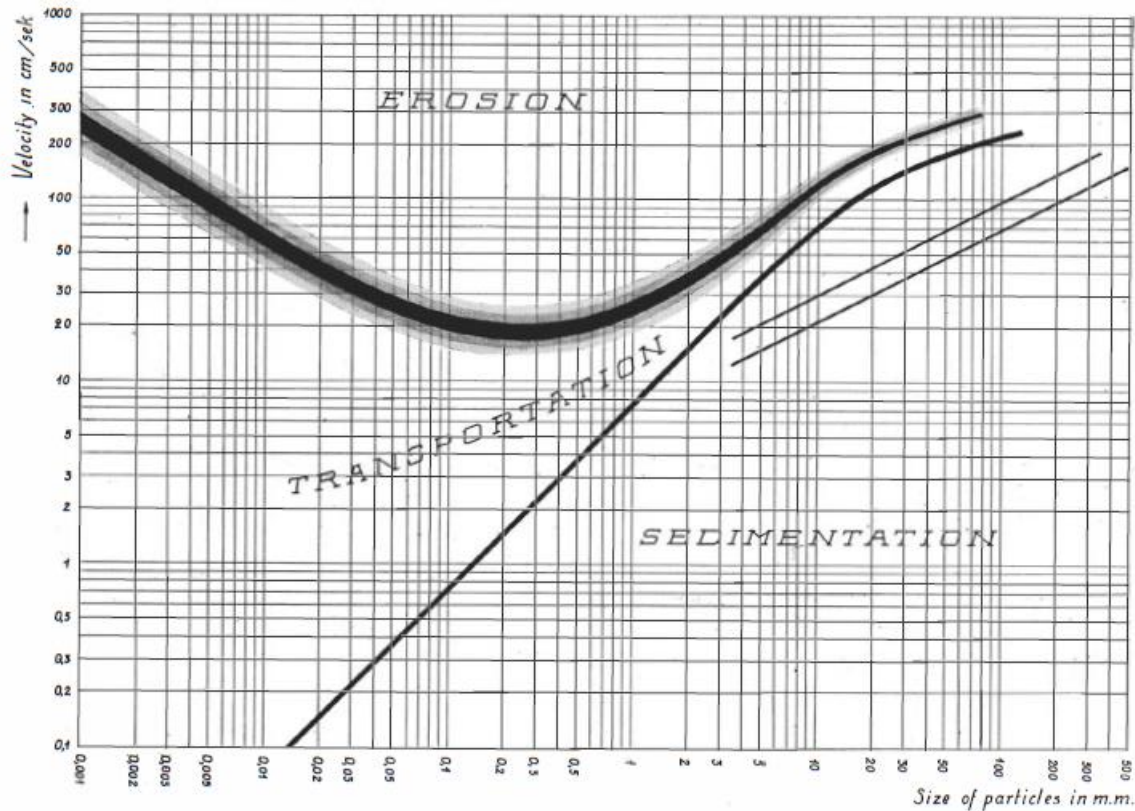


Figura 6: Curvas de erosión y sedimentación de un material uniforme. Escala logarítmica. (Fuente: Hjülström, 1935).

$$V = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{2}{3}} * S_o^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Donde V corresponde a la velocidad, [m/s], n al coeficiente de Manning, Rh al radio hidráulico, [m] y So a la pendiente del tramo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Descarga efectiva

Para el cálculo de la descarga efectiva en ventanas móviles y crecientes, se utilizaron ecuaciones propuestas por Goodwin (2004), donde cada ecuación se define en función del ajuste probabilístico de los caudales líquidos.

Las funciones que presentaron mejores ajustes según la prueba de KS, para ambas ventanas, corresponden a Log-Normal (Ec.(6)) y Log-Normal III (Ec.(7)). Las ecuaciones características para cada distribución se presentan a continuación.

$$Qe = \exp[\mu_y + \sigma_y^2(\beta - 1)], y = \ln Q \quad (6)$$

$$\ln(Qe - \varepsilon) = \mu_\phi + \sigma_\phi^2 \left[\beta - \left(1 + \frac{\varepsilon\beta}{Qe} \right) \right], \phi = \ln(Q - \varepsilon) \quad (7)$$

Donde β corresponde a la tasa de aumento del transporte de sedimentos con el flujo (Tabla 6).

4.1.1 Ventanas móviles

La Tabla 6 indica los resultados específicos para cada uno de los periodos correspondientes a ventanas móviles, los parámetros estadísticos respectivos y los coeficientes de la ecuación de transporte de sedimentos.

Tabla 6: Parámetros utilizados para el cálculo de la descarga efectiva según la ecuación asignada para cada función de probabilidad en periodos de ventanas móviles.

Ventana móvil (5 años)	Nombre	Función de probabilidad	β	σ	μ	ε
1985-1989	Qe 1	Log-Normal	1.414	1.430	3.871	-
1986-1990	Qe 2	Log-Normal III	1.344	1.802	3.420	3.416
1987-1991	Qe 3	Log-Normal	1.250	1.468	3.646	-
1988-1992	Qe 4	Log-Normal	1.261	1.505	3.658	-
1989-1993	Qe 5	Log-Normal	1.231	1.6261	3.780	-
1990-1994	Qe 6	Log-Normal	1.206	1.615	4.089	-
1991-1995	Qe 7	Log-Normal III	1.273	1.409	4.566	-2.289
1992-1996	Qe 8	Log-Normal	1.157	1.486	4.384	-
1993-1997	Qe 9	Log-Normal	1.136	1.519	4.337	-
1994-1998	Qe 10	Log-Normal	1.127	1.384	4.045	-
1995-1999	Qe 11	Log-Normal	1.171	1.358	4.034	-
1996-2000	Qe 12	Log-Normal III	1.187	1.421	3.840	0.942
1997-2001	Qe 13	Log-Normal III	1.249	1.505	3.928	0.968
1998-2002	Qe 14	Log-Normal III	1.230	1.429	3.840	0.801
1999-2003	Qe 15	Log-Normal III	1.269	1.356	4.058	0.447
2000-2004	Qe 16	Log-Normal	1.260	1.298	4.011	-
2001-2005	Qe 17	Log-Normal	1.213	1.288	4.013	-
2002-2006	Qe 18	Log-Normal	1.204	1.202	4.095	-
2003-2007	Qe 19	Log-Normal III	1.170	1.356	3.853	5.715
2004-2008	Qe 20	Log-Normal III	1.156	1.544	3.726	6.260
2005-2009	Qe 21	Log-Normal III	1.203	1.581	3.695	6.346
2006-2010	Qe 22	Log-Normal III	1.234	1.459	3.594	7.212
2007-2011	Qe 23	Log-Normal III	1.264	1.387	3.523	7.135
2008-2012	Qe 24	Log-Normal III	1.302	1.376	3.530	7.128
2009-2013	Qe 25	Log-Normal III	1.287	1.384	3.423	8.624
2010-2014	Qe 26	Log-Normal III	1.224	1.391	3.446	8.644
2011-2015	Qe 27	Log-Normal III	1.232	1.561	3.437	8.555
2012-2016	Qe 28	Log-Normal III	1.202	1.669	3.213	8.592
2013-2017	Qe 29	Log-Normal III	1.188	1.769	3.238	8.001
2014-2018	Qe 30	Log-Normal III	1.250	1.766	3.309	7.976

A partir de los datos mencionados anteriormente y las ecuaciones (6) y (7), se obtiene el siguiente gráfico para las descargas efectivas.

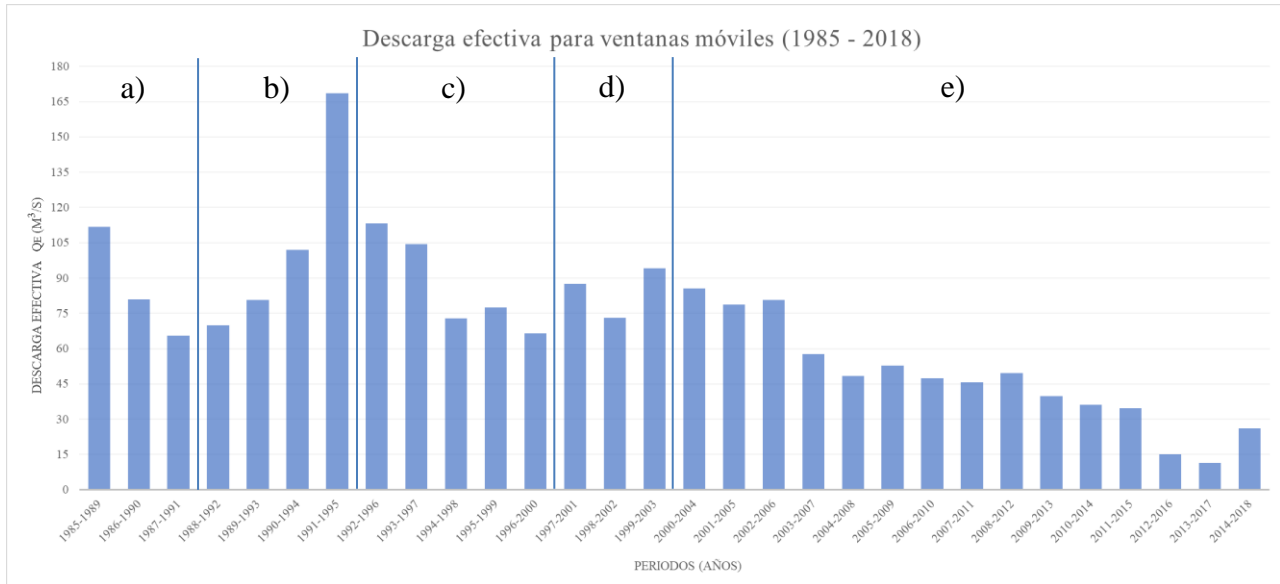


Figura 7: Descarga efectiva – Ventanas móviles. (Fuente: elaboración propia).

Se divide la gráfica en 5 secciones según las tendencias observadas. La primera sección (a) inicia en el periodo [1985 – 1989] y termina en [1987 – 1991] con un caudal efectivo decreciente en el periodo. La segunda sección (b) inicia en [1988 – 1992] y Q_e mantiene una tendencia creciente hasta [1991 – 1995]. La tercera sección (c) comienza en [1992 - 1996] y muestra una disminución del Q_e hasta los años [1996 – 2000]. La cuarta sección (d) indica un aumento del caudal efectivo desde el periodo [1997 – 2001] al [1999 – 2003], mientras que la quinta y última sección (e) muestra una tendencia decreciente en Q_e desde [2000 – 2004] que se sostiene hasta el final del periodo de estudio [2014 – 2018].

4.1.2 Ventanas crecientes

También se calculó la descarga efectiva para ventanas crecientes, que se definen por un periodo base de 10 años que se incrementa en 1 año cada periodo hasta completar el tiempo de estudio. En este caso la función de probabilidad que mejor se ajustó fue la Log Normal. El resumen de los resultados se presenta en la tabla 7.

Tabla 7: Parámetros utilizados para el cálculo de la descarga efectiva según la ecuación asignada para cada función de probabilidad en periodos de ventanas crecientes.

Ventana móvil	Nombre	β	σ	μ
1985-1994	Qe 1	1.311	1.487	3.930
1985-1995	Qe 2	1.331	1.514	4.055
1985-1996	Qe 3	1.288	1.489	4.005
1985-1997	Qe 4	1.287	1.506	4.021
1985-1998	Qe 5	1.271	1.481	3.959

1985-1999	Qe 6	1.275	1.469	3.992
1985-2000	Qe 7	1.279	1.468	3.998
1985-2001	Qe 8	1.275	1.487	3.929
1985-2002	Qe 9	1.269	1.484	3.983
1985-2003	Qe 10	1.275	1.445	3.990
1985-2004	Qe 11	1.273	1.426	3.997
1985-2005	Qe 12	1.267	1.425	4.001
1985-2006	Qe 13	1.269	1.419	4.019
1985-2007	Qe 14	1.259	1.397	4.004
1985-2008	Qe 15	1.255	1.395	3.997
1985-2009	Qe 16	1.261	1.385	3.999
1985-2010	Qe 17	1.262	1.367	3.985
1985-2011	Qe 18	1.262	1.353	3.984
1985-2012	Qe 19	1.261	1.337	3.975
1985-2013	Qe 20	1.256	1.330	3.964
1985-2014	Qe 21	1.254	1.328	3.970
1985-2015	Qe 22	1.257	1.327	3.966
1985-2016	Qe 23	1.252	1.320	3.944
1985-2017	Qe 24	1.249	1.320	3.942
1985-2018	Qe 25	1.250	1.315	3.945

A partir de los datos mencionados anteriormente y las ecuaciones (6) y (7), se obtiene el siguiente gráfico para las descargas efectivas.

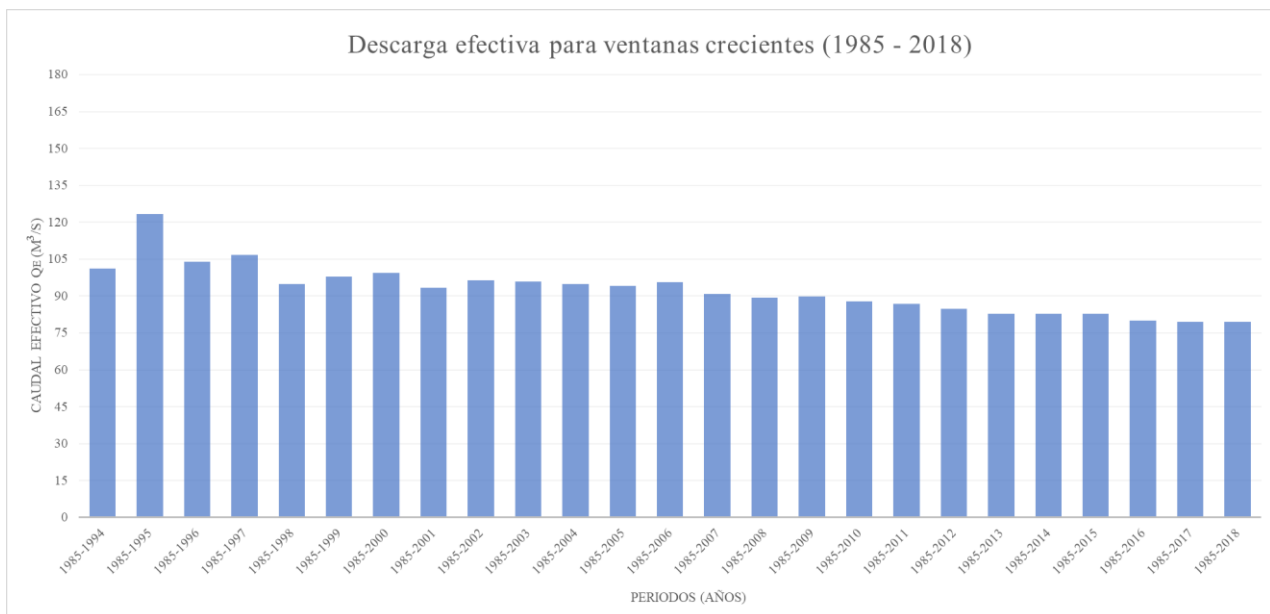


Figura 8: Descarga efectiva – Ventanas crecientes. (Fuente: elaboración propia).

Para las ventanas crecientes se crearon 25 periodos donde los valores muestran un comportamiento decreciente a lo largo del tiempo, variando desde los 79 m³/s a 123 m³/s.

Si comparamos este gráfico con el gráfico de la Figura 7, podemos ver que los caudales efectivos de las ventanas crecientes son mucho más estables y mayores en magnitud en comparación a aquellos presentados para las ventanas móviles. Tal como se mencionó anteriormente, los Qe de las ventanas móviles son mayores en los primeros periodos (secciones a, b, c y d) y disminuyen hasta aproximadamente 12 m³/s en la sección d), a diferencia de las ventanas crecientes, donde la descarga efectiva más baja es de 79 m³/s. Este aumento se debe a que el rango de estudio incluye los primeros años (años con caudales efectivos más grandes).

4.2 Cambios morfológicos en el ancho

Para abordar esta variable, se consideró a Mittal (2022), midiendo en cada una de las 6 secciones la distancia entre las intersecciones del transecto lateral (sección) entre ambas líneas de ribera (orillas del tramo de río) en las doce imágenes satelitales descargadas entre los años 1985 y 2018 que se individualizaron en la Tabla 4.

En la Tabla 8, se entregan los resultados de las mediciones las cuales muestran valores diversos para el Grupo 1, pero con un comportamiento mayormente decreciente para las secciones S1 y S6; y sin variaciones significativas en las secciones S1 y S3 para el Grupo 2. El máximo ensanchamiento ocurrió entre los años 1998 y 2001 en la sección S3. Mientras que el estrechamiento máximo se encontró entre los años 1990 y 1998 en la sección S5 para el Grupo 1 y entre los años 2016 y 2018 en la sección S5.

Tabla 8: Ancho del río durante los años de evaluación.

Fecha (dd/mm/aaaa)	Ancho secciones (m)						Promedio
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
Grupo 1							
02/10/1985	80.78	85.62	123.86	144.27	122.20	127.85	114.09
12/01/1986	99.44	125.51	95.94	91.69	113.72	126.29	108.77
01/03/1989	99.02	64.40	83.43	121.46	125.99	87.73	97.01
15/01/1990	99.78	65.64	84.05	121.53	125.26	85.51	96.96
14/02/1998	69.49	118.12	66.96	118.93	66.75	124.65	94.15
06/02/2001	68.22	70.26	129.17	149.91	123.67	125.29	111.09
05/03/2005	48.03	109.12	158.52	154.39	124.29	85.85	113.37
Grupo 2							
28/12/2006	65.34	138.53	150.14	125.59	170.44	121.98	128.72
27/11/2009	70.01	136.99	134.64	153.26	171.29	87.49	125.61
30/03/2014	69.51	104.69	133.09	95.88	154.94	86.54	107.44
09/02/2016	60.31	139.62	127.39	92.55	156.08	78.18	109.02
08/09/2018	59.34	111.42	125.56	91.87	66.16	78.68	88.84

A continuación, se presentan los anchos de cada sección por fecha.

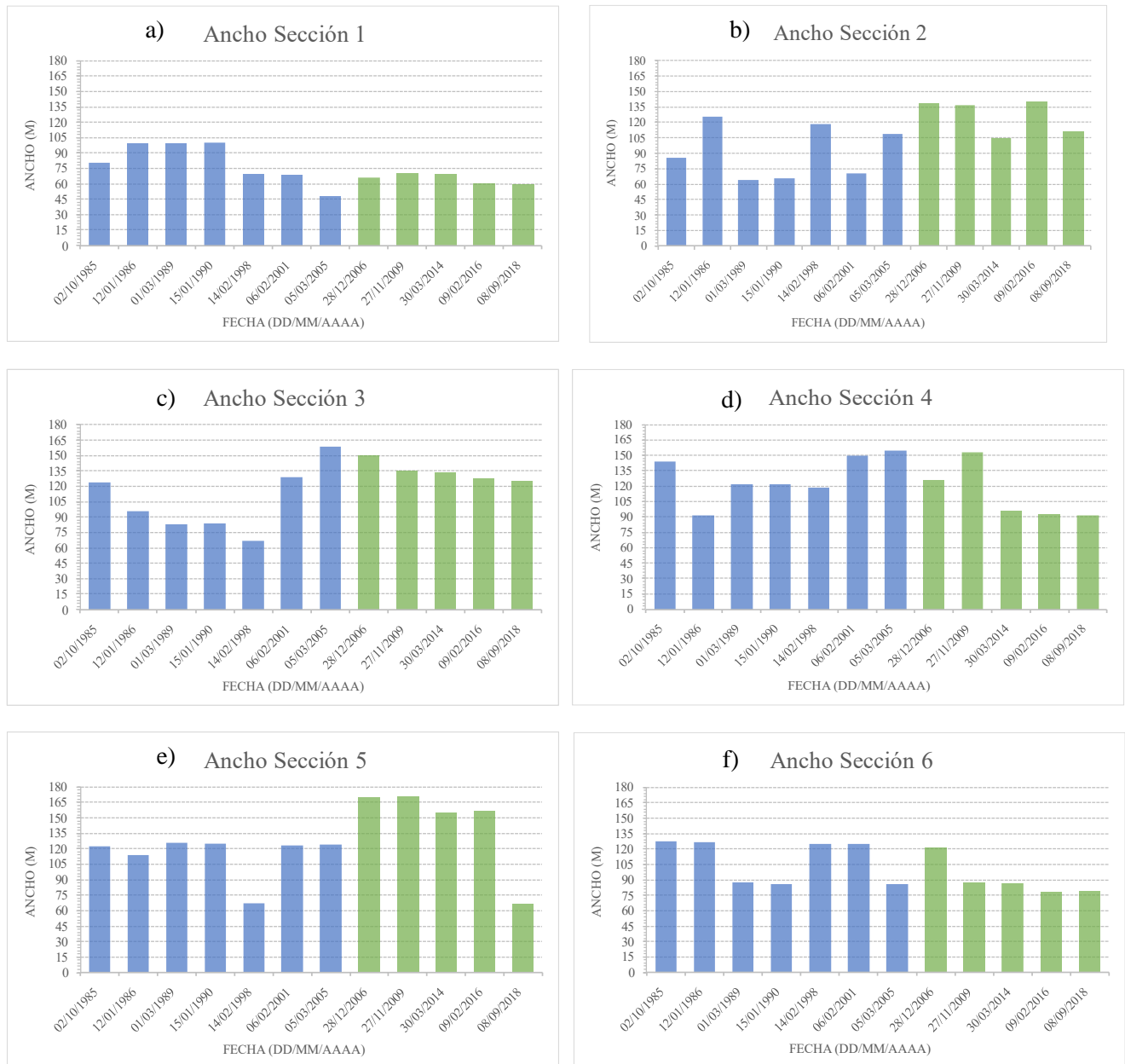


Figura 9: Gráficos de anchos para cada sección entre los años 1985 y 2018 agrupados por colores representando el Grupo 1 en azul y el Grupo 2 en verde. a) Sección 1, b) Sección 2, c) Sección 3, d) Sección 4, e) Sección 5 y f) Sección 6 (Fuente: elaboración propia)

De la Figura 9 es importante mencionar los siguientes análisis: del gráfico a), podemos notar que la sección 1 es la sección con menos cambios a lo largo del tiempo con una pequeña disminución en el ancho después del año 1990, periodo que coincide con la construcción del puente Itata en el año 1993, ubicado aguas abajo de la sección según imágenes obtenidas desde Google Earth Engine. Esta construcción pudo haber ocasionado una alteración en la morfología del río debido a una acumulación de sedimentos en la orilla izquierda aguas arriba del puente, generando una posible barra (Ayala et al., 2007), por otro lado, las personas han utilizado esta zona para efectos recreativos utilizándola como una entrada al río y deteniendo el ensanchamiento en esa dirección. En la orilla derecha, el río se encuentra confinado de vegetación, lo cual se considera como un sistema de

control de la erosión debido a su capacidad de aumentar la resistencia hidráulica y, por lo tanto, disminuir la capacidad erosiva del agua (Díaz, 2011), es por esto que las variaciones en el ancho son mínimas.

Si bien, cada uno de los años son relevantes para esta investigación, hay que señalar un hito importante que podría ayudarnos a comprender algunos de estos valores. Entre el año 2006 y 2007, se construyó una “Planta de agua” perteneciente a la *Celulosa en Nueva Aldea* a la altura de la sección 3 (Figura 2) y si vemos el gráfico c), es posible notar que los valores para los anchos, en los años 2009, 2014, 2016 y 2018, se mantienen sin mayores variaciones, por lo que este comportamiento se podría asociar a esta obra. Cabe destacar que no hubo ninguna otra construcción dentro de la zona de estudio de tal magnitud que pueda interferir directamente estos valores, sin embargo, es posible notar confinamiento debido a la presencia de vegetación en la orilla derecha, lo que mantendría sin mayores cambios esta variable.

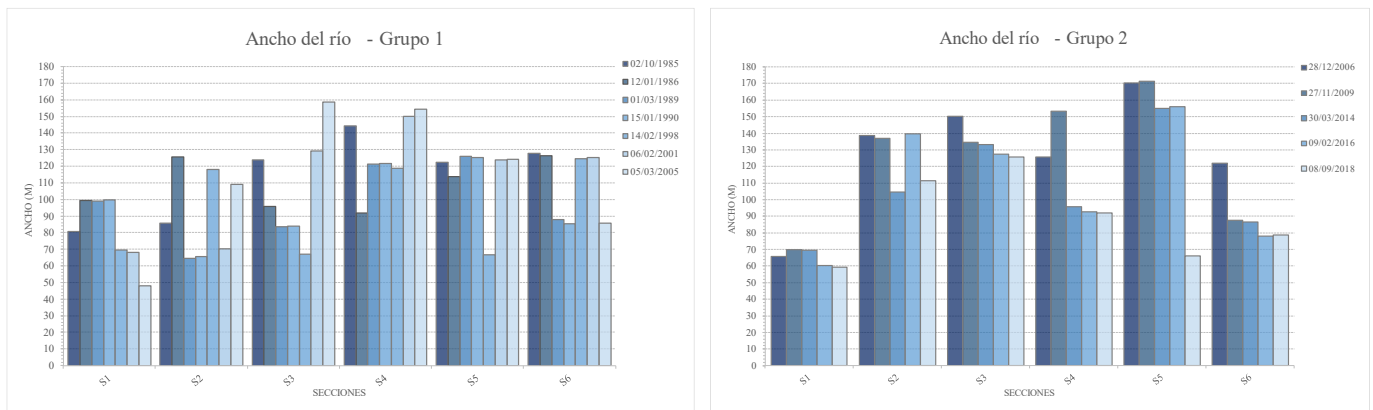


Figura 10: Resumen ancho del río en las secciones para todo el periodo de estudio. (Fuente: Elaboración propia)

4.3 Cambios morfológicos en la sinuosidad

La sinuosidad se calculó a lo largo de todo el tramo del río (S1 a S6). Los valores estimados para el IS se presentan en la Tabla 9 y gráficamente en la Figura 11. Se observa que el tramo del río presentó características sinuosas durante todo el periodo de estudio, con un IS para el tramo completo desde los 1.15 a los 1.20.

Tabla 9: Índice de Sinuosidad

Fecha	IS para el tramo completo
Grupo 1	
02/10/1985	1.18
12/01/1986	1.20
01/03/1989	1.18
15/01/1990	1.20
14/02/1998	1.16
06/02/2001	1.16
05/03/2005	1.18

Grupo 2	
28/12/2006	1.16
27/11/2009	1.15
30/03/2014	1.15
09/02/2016	1.16
08/09/2018	1.16

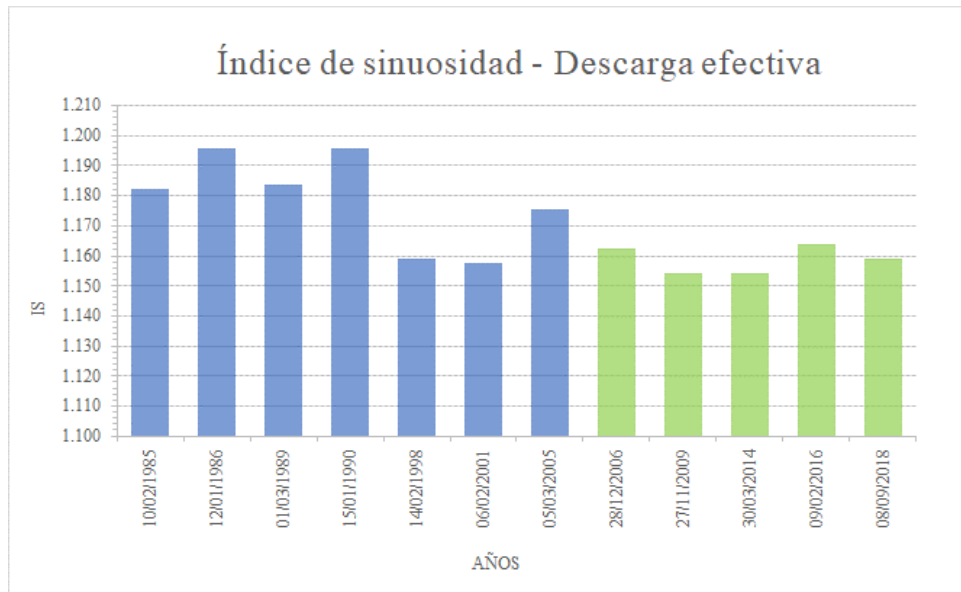


Figura 11: Índice de Sinuosidad por secciones en todo el tramo de río. (Fuente: Elaboración propia)

La Figura 11 corresponde a un gráfico de los valores del IS (Índice de Sinuosidad) de cada año seleccionado para este estudio. De acuerdo con el gráfico, el tramo del río se caracteriza como “sinuoso”, pues los valores se encuentran dentro del rango $1.1 \leq IS \leq 1.5$. Sin embargo, es posible ver que en el Grupo 2 (verde), el IS es más bajo en comparación al Grupo 1 y si analizamos el periodo completo, su valor tiende a decrecer, por lo que se puede esperar que se siga comportando de la misma manera a lo largo del tiempo. Esto puede deberse a la disminución de caudal y sedimentos, tal como se ve en la Figura 5, la cual indica una baja de caudal líquido y sólido a partir del año 2004.

4.4 Relación descarga efectiva y cambios morfológicos

4.4.1 Ventanas móviles

En la Figura 12, se muestra la descarga efectiva en ventanas móviles junto las variaciones en el ancho de cada sección en el periodo de evaluación.



Figura 12: Gráficos de anchos para cada sección entre los años 1985 y 2018 agrupados por colores representando el Grupo 1 en azul y el Grupo 2 en verde y descarga efectiva para ventanas móviles. a) Sección 1, b) Sección 2, c) Sección 3, d) Sección 4, e) Sección 5 y f) Sección 6. (Fuente: elaboración propia)

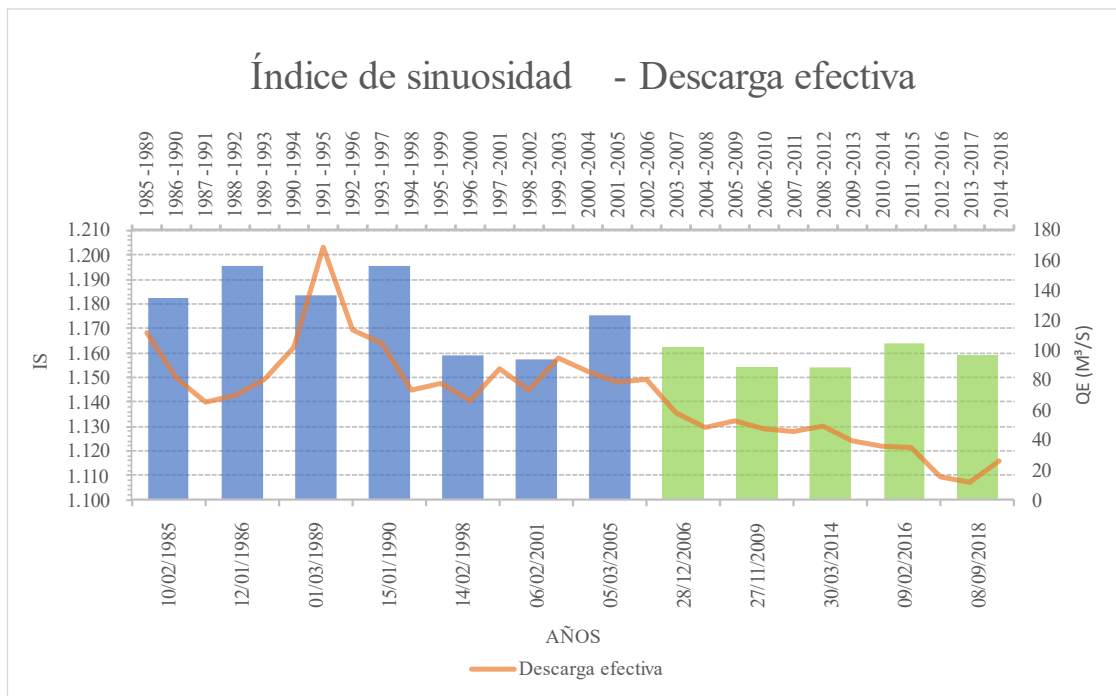


Figura 13: Gráficos del índice de sinuosidad para el tramo completo y descarga efectiva para ventanas móviles. (Fuente: elaboración propia)

Del gráfico a), b), c) y f) podemos ver una relación negativa entre la descarga efectiva y el ancho para el Grupo 1, es decir, si Q_e disminuye, el ancho aumenta y para el Grupo 2 se observa una relación positiva, pues mientras Q_e disminuye, el ancho sigue la misma tendencia. A diferencia de los gráficos mencionados anteriormente, los gráficos d) y e) responden a un comportamiento positivo en ambos grupos.

El Grupo 2 muestra un comportamiento positivo en todas las secciones, sugiriendo que dicha tendencia debería mantenerse en el tiempo, con una consecuente disminución del ancho para el mediano plazo. Esto podría asociarse a los impactos producto del cambio climático.

El IS tiende a comportarse de manera positiva con una leve disminución durante el periodo de estudio, sin embargo, hay que tener presente que los valores se mueven entre 1.15 y 1.20 y si consideramos los cambios climáticos que mencionamos anteriormente, este índice debería seguir disminuyendo al igual que la descarga efectiva, incluso hasta obtener valores de IS menores a 1.1, pasando de ser un río “sinuoso” a “recto”.

4.4.2 Ventanas crecientes

En la Figura 14, se muestra la descarga efectiva en ventanas crecientes junto las variaciones en el ancho de cada sección en el periodo de evaluación.



Figura 14: Gráficos de anchos para cada sección entre los años 1985 y 2018 agrupados por colores representando el Grupo 1 en azul y el Grupo 2 en verde y descarga efectiva para ventanas crecientes. a) Sección 1, b) Sección 2, c) Sección 3, d) Sección 4, e) Sección 5 y f) Sección. (Fuente: elaboración propia)

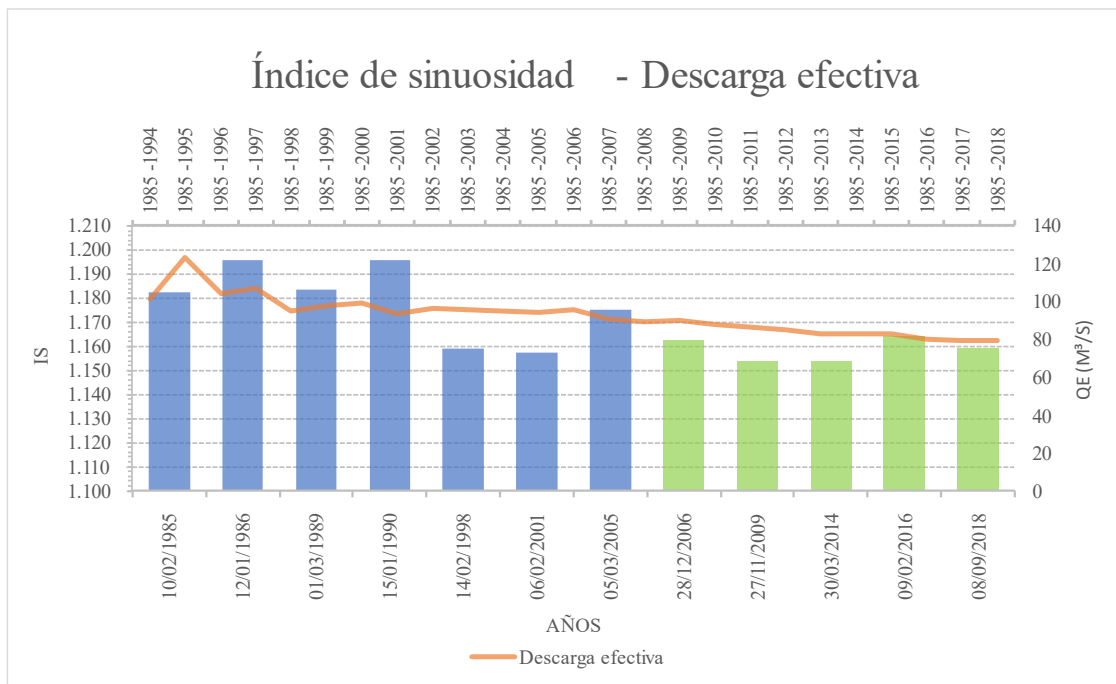


Figura 15: Gráficos del índice de sinuosidad para el tramo completo y descarga efectiva para ventanas crecientes. (Fuente: elaboración propia)

Del gráfico a), d) y f) podemos ver una relación directa entre la descarga efectiva y el ancho para todo el periodo de estudio, es decir, Q_e disminuye en conjunto con el ancho. En cuanto a los valores para el Grupo 2 de todas las secciones podemos encontrar una relación positiva entre Q_e y el ancho. En cuanto al Grupo 1 de los gráficos b), c) y e), se observa una relación negativa. La Figura 15 indica un comportamiento decreciente para IS, que es equivalente a lo ocurrido con la descarga efectiva.

5. CONCLUSIONES

Se analizaron 12 imágenes satelitales Landsat para fechas determinadas entre los años 1985 a 2018 para un tramo de 3.2 km del río Itata que abarca desde la junta con el río Larqui hasta el puente Itata en Nueva Aldea, región de Ñuble.

El estudio se basó en la cuantificación de los cambios morfológicos de 2 variables, ancho y sinuosidad, en el tramo de estudio. Los que se comparan con las variaciones de la descarga efectiva, con el fin de definir relaciones que permitan predecir el comportamiento del río.

Los resultados cumplen con los objetivos propuestos y se confirma una relación entre la descarga efectiva y los cambios morfológicos en ambas variables. Los resultados de sinuosidad sugieren que la tendencia de cambio de esta variable en el tramo del río podría estar condicionada por los cambios en la descarga efectiva.

Los cambios más significativos para ambas variables ocurren entre los años 1985 y 2005 (Grupo 1) principalmente. Desde el año 2006, los valores muestran un comportamiento decreciente y se genera una relación positiva con la descarga efectiva, pues a medida que esta disminuye, ambas variables también muestran una tendencia a decrecer, que es lo que se esperaría que siga ocurriendo de mantenerse las condiciones del río.

El Grupo 1 indica una relación negativa del ancho con la descarga efectiva, es decir, con comportamiento opuesto, el Q_e aumenta y el ancho disminuye y viceversa. Esto puede deberse a la gran variación de caudales líquidos durante dicho periodo.

Los resultados obtenidos son indicativos de que el río Itata necesita ser monitoreado para generar un registro de los cambios morfológicos. También se considera importante implementar medidas para controlar y gestionar estos cambios. Esta información debiese considerarse para complementar los antecedentes necesarios para la planificación de futuras obras civiles en el río.

6. REFERENCIAS

- Ahmad, N., Ahasan, N., & Said, S.** (2018). “Assessment of changes in morphological characteristics of River Yamuna (Wazirabad-Okhla) in *Delhi* using remote sensing data”. *i-Manager’s Journal on Future Engineering and Technology*, 14(2), 55–65.
- Ayala, L., Suárez, J., Donado, L.** (2007). “Análisis cualitativo de los efectos morfológicos y sedimentológicos relacionados con la construcción de puentes aplicado al Río Magdalena y el puente Guillermo Gaviria Correa”. XIV jornadas geotécnicas de la ingeniería de Colombia y VII Foro sobre geotecnia de la Sabana de Bogotá, 10.13140/2.1.5123.3607.
- Brice, J. C.** (1964). “Channel patterns and terraces of the Loup River in Nebraska”. US Geological Survey Professional Paper, 422-D.
- Camels-cl: Explorador de cuencas.** (s.f). Camels.cr2. <https://camels.cr2.cl>
- Díaz, C.** (2011). “Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización”. *Ingeniería e investigación* vol. 31, No 3, 80-90.
- Dirección General de Aguas.** (s.f). Ministerio de obras públicas. <https://dga.mop.gob.cl>.
- Dirección General de Aguas.** (2004). “*Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*”. Santiago de Chile: Ministerio de Obras Públicas (Chile).
- Donoso, L.** (2022). “Variación espacio-temporal del caudal efectivo en Chile Continental”. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.
- Fluvial, C. C. I. D. R.** (2011). “¿Qué es la restauración fluvial? Boletín del *CIREF*, (4).
- García, J. H. G., Ojeda, A. O.** (2011). “Clasificación geomorfológica de cursos fluviales a partir de sistemas de información geográfica (SIG)”. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (56), 373-396.
- Gogoi, C., & Goswami, D. C.** (2013). “A study on bank erosion and bank line migration pattern of the Subansiri River in Assam using remote sensing and GIS technology”. *Int J Eng Sci*, 2(9), 1-6.
- Gonzales, O.** (2016). “Factores que influyen en la sinuosidad del río Portuguesa, Llanos centro-occidentales venezolanos”. *Revista Geográfica Venezolana*, vol. 58, núm. 2.
- Goodwin, P.** (2004). “Analytical solutions for estimating effective discharge”. *Journal of hydraulic engineering*, 729-738.
- Google earth engine.** (s.f). Google.com. {“<https://earthengine.google.com/>”}
- Hjülström, F.** (1935). “Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by River Fyris. Bulletin of the Geological Institute of the University of Uppsala, 25.
- Jiang, C., Pan, S., Chen, S.** (2017). “Recent morphological changes of the Yellow River (Huanghe) submerged delta: Causes and environmental implications. *Geomorphology*, 293, 93-107.
- Landsat Collections in Earth Engine.** (2021). Google Developers. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat>.
- Mao, L.** (2016). “Sedimentos, hidráulica y efectos morfológicos”. Mesa de Hidroelectricidad Sustentable, Ministerio de Energía, Pontificia Universidad Católica de Chile.

McFeeters, S. K. (1996). “The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features”. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, 1425-1432.

MEDIOAMBIENTE, A. (2013). *Modelación Hidrogeológica Cuenca Itata-Bajo, Región del Bío Bío*. Ministerio de Obras Públicas.

Mittal, R., Said, S., Beg, M. (2022). “Assessment of changes in planform morphology of the upper Yamuna River segment, India, using remote sensing and GIS”. UK limited, trading as Taylor & Francis Group.

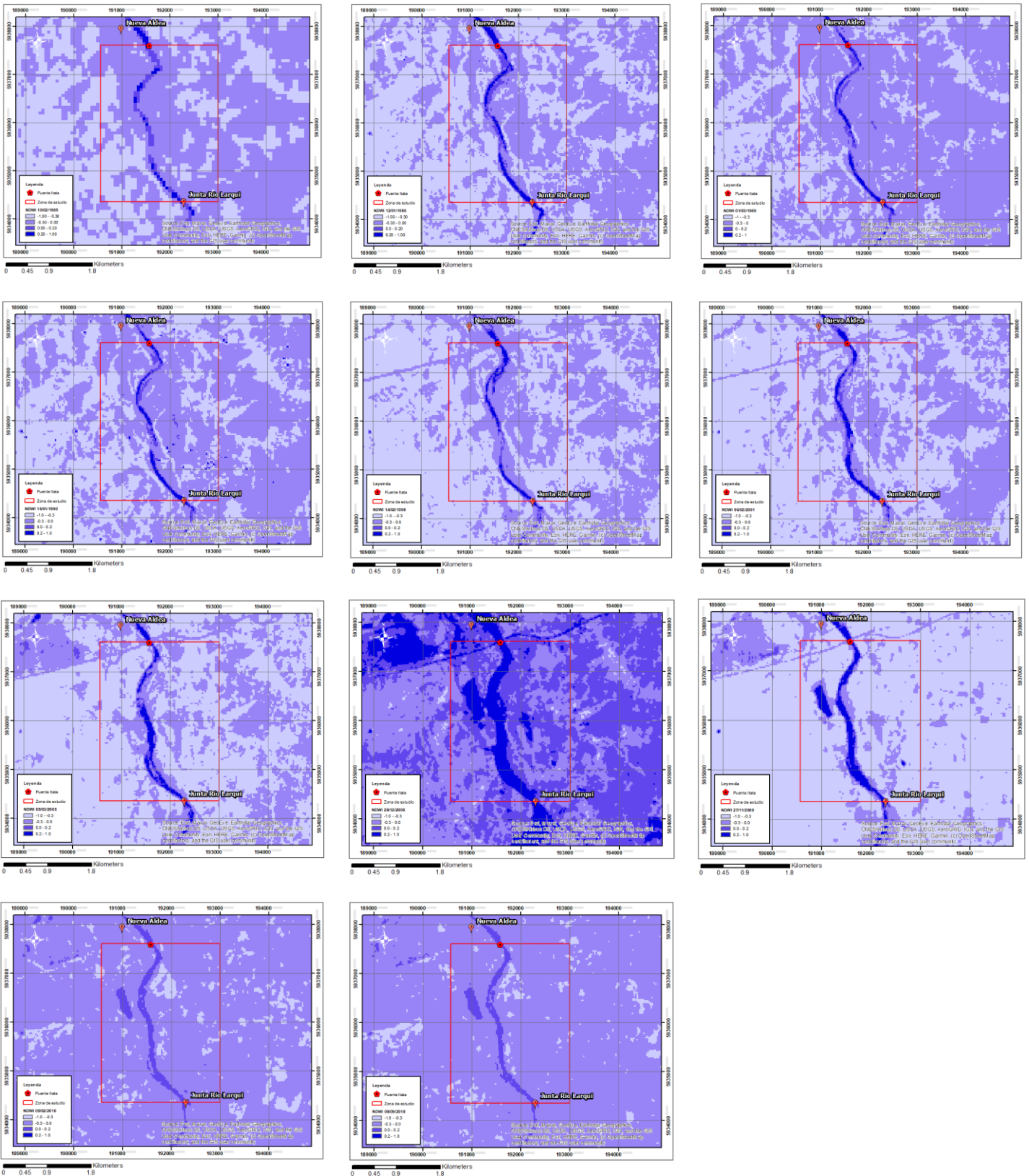
Santibáñez, F. (s.f). “El cambio climático y los recursos hídricos en Chile”. Segunda Sección – Reflexiones y desafíos al 2030: Perspectiva de especialistas externos, cap. 11, 147-178.

Signal Processing Society Spain Chapter (SPS Spain Chapter). (s.f.). Ventana móvil temporal y ventana creciente temporal, [presentación de diapositivas]. {“https://www.ugr.es/~jesusm/SPS_Spain2009/slides/ventanas.pdf”}.

Tranmer, W., Goodwin, P., Caamaño, D. (2018). “Assessment of alluvial trends toward dynamic equilibrium under chronic climatic forcing”. *Advances in water resources* 120, 19-34.

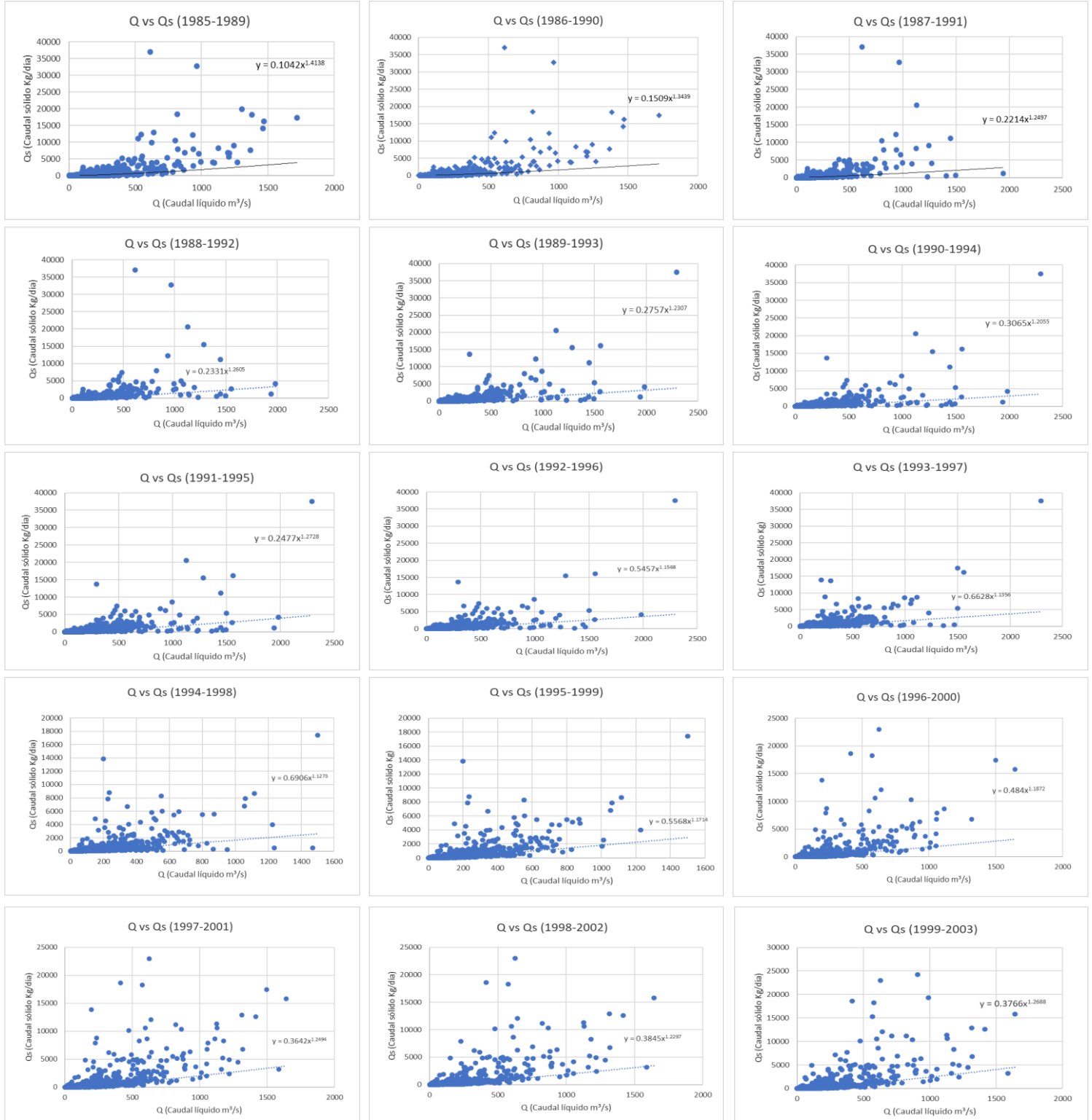
ANEXO 1

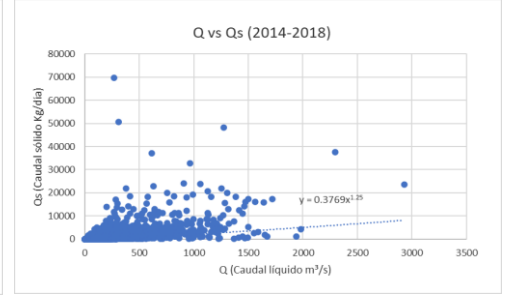
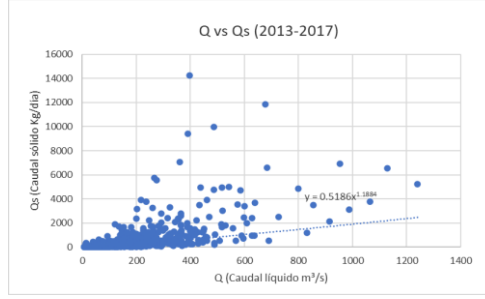
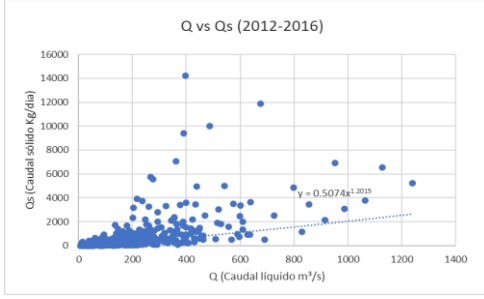
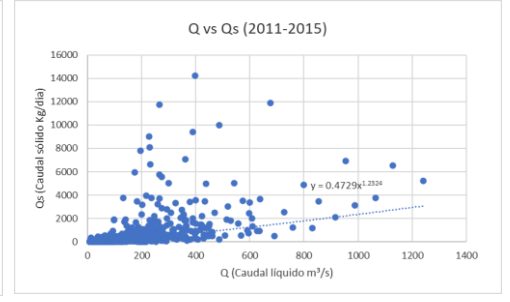
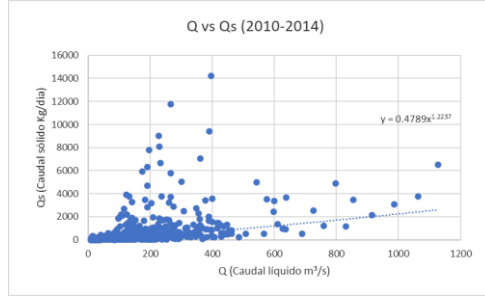
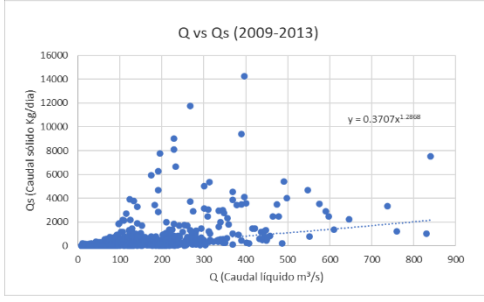
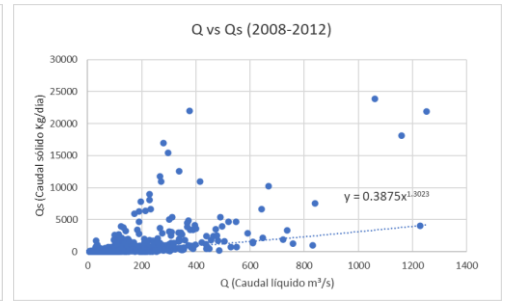
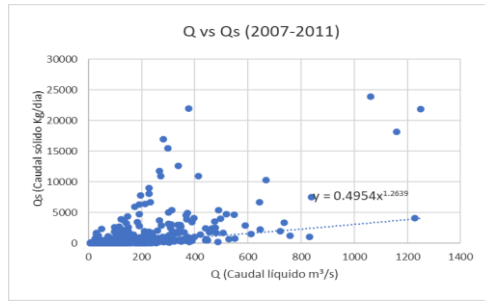
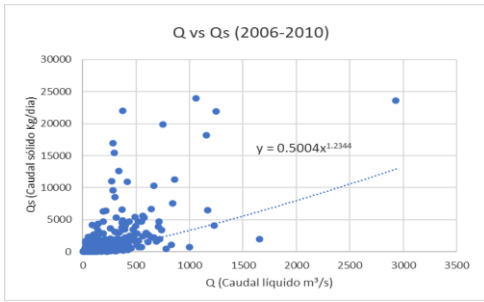
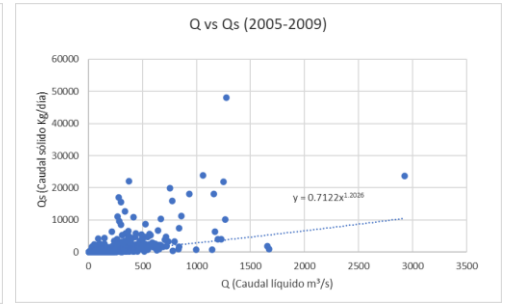
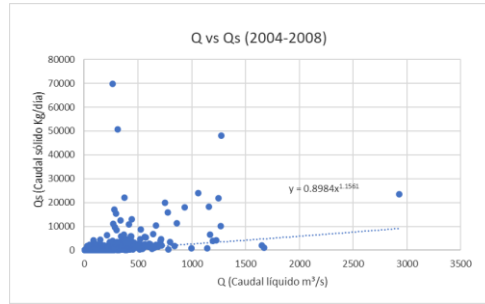
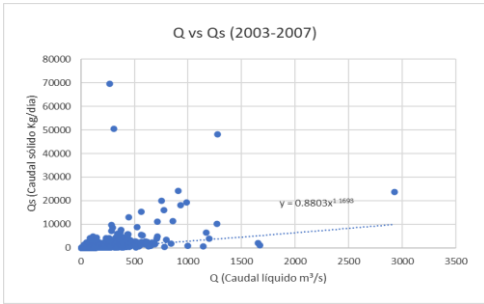
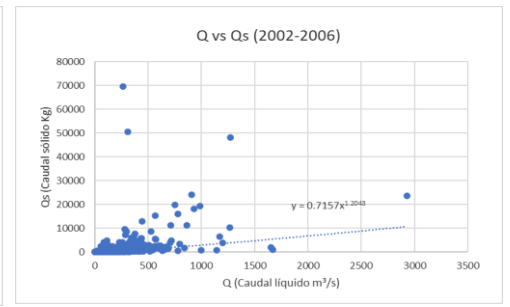
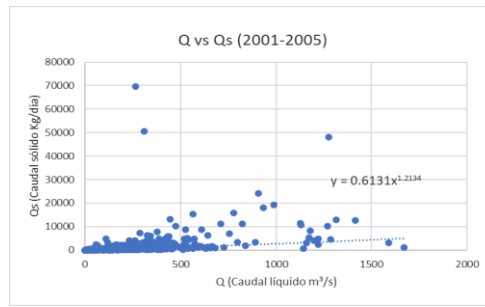
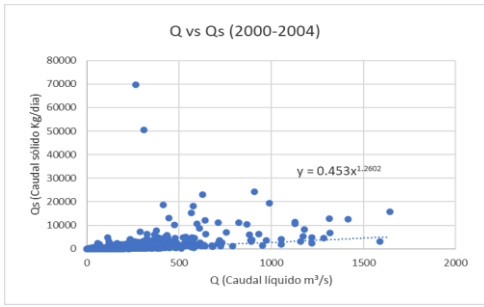
A continuación, se presentan las imágenes satelitales con cálculo de NDWI.



ANEXO 2

A continuación, se presentan los gráficos “Q v/s Qs” para ventanas temporales móviles, para obtener los parámetros α y β .





A continuación, se presentan los gráficos “Q v/s Qs” para ventanas temporales crecientes, para obtener los parámetros α y β .

