

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA- FACULTAD DE CIENCIAS
MAGISTER EN MEDIO AMBIENTE**



CARACTERIZACIÓN DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS EN LA PARTE MEDIA DEL RÍO BIOBÍO

IGNACIO EDUARDO SALAZAR CÁRDENAS

**PROYECTO DE HABILITACIÓN DE GRADO (MCA 0400)
MAGISTER EN MEDIO AMBIENTE**

Profesor Guía : Diego Caamaño

Profesor
Informante Interno : Robert King

Profesor
Informante
Externo : Hernán Alcayaga

Concepción, mayo 2019

Contenidos

I. Introducción	5
Situación internacional	7
Situación nacional	9
II. Objetivos	10
Objetivo general	10
Objetivos específicos	10
III. Antecedentes	11
Área de estudio	11
Sistema fluvial	13
Sensoramiento remoto	16
IV. Metodología	19
Imágenes satelitales	19
Mapas temáticos	19
El Índice de Calidad Morfológica de monitoreo y variables	19
Desplazamiento lateral	21
Ancho promedio	23
Sinuosidad	23
Trenzado	25
V. Resultados	27
El Índice de Calidad Morfológica de monitoreo	27
Variables planimétricas	27
Desplazamiento lateral y ancho promedio	28
Sinuosidad	29
Trenzado	31
Variación temporal de MQIm	34
VI. Discusión y Conclusiones	35
VII. Referencias Bibliográficas	37

Índice de tablas

Tabla 1: Principales diferencias entre MQI y MQIm	20
Tabla 2: Clasificación de los tipos de cauces	26

Índice de figuras

Figura 1. Efectos de una presa sobre el balance de sedimentos de un tramo fluvial	6
Figura 2: Ubicaciones de flujo base, lecho del río y llanuras de inundación	8
Figura 3: A) Área del río Biobío delimitada. B) Cuenca del río Biobío	11
Figura 4: Centrales hidroeléctricas en el río Biobío	12
Figura 5: Esquema de clasificación de ajustes de canales para ríos italianos	13
Figura 6. Ejemplo de clasificación de los sistemas fluviales	15
Figura 7: Imagen satelital con Landsat 5	17
Figura 8: Imagen satelital con Landsat 7	17
Figura 9: Clasificación de un cauce fluvial	21
Figura 10: Tipos de llanuras inundables de la clasificación que muestran entornos de energía media	22
Figura 11: Variables morfológicas según Mueller	23
Figura 12: Índice de entrelazamiento según Rust	25
Figura 13: Modelo en Arcgis10.3	28
Figura 14: Mapa cambios morfológicos de los años 1989; 2005 y 2018	29
Figura 15: Área de estudio sectorizados	31
Figura 16: Cambio morfológico sector 1	31
Figura 17: Cambio morfológico sector 2	32
Figura 18: Cambio morfológico sector 3	32
Figura 19: Cambio morfológico sector 4	33
Figura 20: Parámetro de entrelazamiento en escala tiempo	33

Índice de gráficos

Gráfico 1: Índice de Sinuosidad a escala tiempo	30
Gráfico 3: Sinuosidad del valle a escala tiempo	30
Gráfico 2: Sinuosidad total a escala tiempo	30
Gráfico 4: Variación temporal del parámetro entrelazado en el río Biobío, según Rust (1978)	34

Índice de anexos

Anexo 1 Efecto de impacto ambiental para proyectos	38
Anexo 2: Métodos específicos de evaluación de impacto ambiental	39
Anexo 3: Leyes	40
Anexo 4: Thalweg	44
Anexo 5: Resultado Sinuosidad	45
Anexo 6: Resultados trenzado	48

Resumen

Esta investigación corresponde a la caracterización de cambios morfológicos en la cuenca media del río Biobío. La cuenca representa, a nivel nacional un importante centro de desarrollo económico. Los sectores productivos más dinámicos están ligados al sector forestal, sector agropecuario, sector industrial representado fundamentalmente por las industrias metalúrgicas, químicas, refinerías de petróleo, industrias textiles, industrias de la celulosa, entre otras. También se encuentra el sector hidroeléctrico que constituye la principal fuente de suministro de energía eléctrica a nivel nacional.

El río se origina en la ribera oriental de la laguna Gualletué en la cordillera de los Andes, recorre 380km y termina en el océano pacífico. Este estudio evalúa y caracteriza los cambios de forma (i.e. morfológicos) en un tramo de la parte media del río Biobío, aguas debajo de las centrales hidroeléctricas Pangue, Ralco y Angostura.

Los cambios morfológicos existen de forma natural respondiendo a un equilibrio entre las cantidades de agua y sedimento disponible en la cuenca. Regularmente estos cambios se manifiestan en el largo plazo, acentuándose producto de intervención antrópica.

Por lo tanto, y a través de análisis de sensoramiento remoto se trabajan las variables planimétricas de forma como el desplazamiento lateral, ancho promedio, sinuosidad (Mueller 1968) y niveles de trenzado (Rust 1978). Estas variables indicarán de manera cuantitativa los cambios en el área de estudio y permitirán evaluar las transformaciones en el tiempo.

Este trabajo entrega resultados e interpretaciones con el objetivo de identificar la ubicación de los cambios de forma dichos cambios y muestra las diferencias entre los años establecidos en el análisis de los resultados, estableciendo como línea de base los años anteriores a las construcciones de centrales hidroeléctricas.

I. Introducción

Los cambios morfológicos de ríos son un proceso natural de los sistemas fluviales (Camporeale et al., 2005; Kleinhans, 2010) y son causados por procesos físicos que intervienen en el flujo de caudal, la erosión y el transporte de sedimento. En cuanto a la erosión y sedimento, los cambios en el río pueden asociarse al efecto del cambio climático (Shugar, Clague, Best, Schoof, Willis, Copland y Roe. 2017), que altera el volumen de las aguas superficiales y la composición del sedimento, además de producir variaciones en el régimen hidrológico (Schumm, 1969). Sin embargo, cualquier intervención del hombre sobre una cuenca genera un impacto y puede acelerar los cambios naturales de los procesos físicos, como es el caso de las construcciones de centrales hidroeléctricas (Surian y Rinaldi, 2003; Wellmeyer et al., 2005; Ortega et al., 2014)

Las grandes centrales hidroeléctricas utilizan el agua que portean los cursos fluviales; almacenan el recurso a través de un gran muro retenedor por dos razones principales: generar capacidad de regulación y aumentar la cota de la superficie del agua (energía potencial). De esta forma el agua desciende a través de grandes tuberías transformando la energía potencial en energía cinética, que finalmente se transforma en energía eléctrica a través de una turbina y un generador. La electricidad producida se distribuye a las ciudades transmitidas por cables conductores.

Las ventajas de la energía hidroeléctrica se relacionan con la alta calidad de la energía útil y los bajos costos operacionales y de mantenimiento, además de un bajo nivel de residuos. Operadas correctamente pueden también utilizarse para mitigar el impacto de inundaciones o generar nuevas fuentes de agua para riego (Ascar, 2002). Las principales desventajas del embalse están asociadas a la zona inundada y la consecuente destrucción de terrenos, además de la alteración del paisaje y el hábitat de varias especies ubicadas en la parte del reservorio (Petts y Gurnell 2005). Sin embargo, los impactos continúan hacia aguas abajo producto de la interrupción en la conectividad longitudinal, y la consecuente alteración del régimen de caudales y sedimentos provenientes de la parte alta de la cuenca. Esto genera diversos impactos a largo plazo, que tienen relación con la forma del río y consecuentemente producen alteraciones en el ámbito ecológico (Petts y Gurnell 2005).

La construcción de represas modifica las condiciones de equilibrio de los ríos, generando una serie de cambios en los procesos fluviales. Diversos autores han estudiado los efectos hidrológicos y geomorfológicos de las grandes presas. Cabe destacar los trabajos de Leopold et al. (1964), Petts (1984), Williams y Wolman (1984), y Kondolf (1997).

Los cambios hidrológicos están relacionados generalmente con las características del embalse, especialmente su tamaño con relación a la aportación hídrica de la cuenca, el funcionamiento de la presa y los usos del agua almacenada. En algunos casos la aportación hídrica se reduce aguas abajo del embalse (Collier et al., 1996). Sin embargo, en muchos otros, la reducción no es drástica, pero se produce una alteración importante de la frecuencia de caudales. La reducción de las crecidas debido a la construcción de embalses es la modificación hidrológica más importante y significativa por su implicancia en la morfología del cauce, el transporte de sedimento, y la ecología del sistema fluvial. Incluso la simple laminación de las crecidas en embalses con poca o nula capacidad de regulación puede reducir los peaks de las crecidas hasta en un 50% (Moore, 1969).

En presas estudiadas en Estado Unidos por Williams y Wolman (1984), se observó que la reducción del caudal máximo después de la construcción que oscila entre el 3% y 91%, aunque en algunos casos puede llegar a ser superior. En California, las crecidas en la cuenca de los ríos Sacramento y San Joaquín se han reducido considerablemente debido a la construcción de numerosos embalses. El caudal asociado a un período de retorno de 2 años ha disminuido entre un 35% y 95%. Para períodos de retorno superiores, la reducción oscila entre el 2% y 78% (Kondolf y Matthews, 1993).

Los efectos que demuestran los cambios morfológicos de un río se observan principalmente aguas abajo. Las principales modificaciones que sufren los cauces situados aguas abajo de los embalses pueden ser relacionadas con la incisión o la sedimentación del lecho (Collier et al., 1996). La mayoría de los cambios ocurren habitualmente en los primeros veinte años después de la construcción de la presa (Williams y Wolman 1984). La erosión del cauce se produce porque la presa retiene la mayor parte del sedimento que circulaba por el río en condiciones naturales. El agua que la presa libera durante crecidas erosiona el lecho aguas abajo pero no aporta nuevos sedimentos, por lo que el balance sedimentario del río entra en una fase de desequilibrio, como se ilustra en la figura 1. La erosión por aguas claras empieza inmediatamente después de la construcción de la presa y va disminuyendo a medida que el lecho del río se va acorazando. Los principales efectos sobre la dinámica del río son a modo de resumen:

- I. Degradación de los ecosistemas fluviales y deltaicos (Kondolf y Wolman 1993, Day et al. 1989),
- II. Incisión por erosión del cauce con impactos sobre la estabilidad de infraestructuras (Kondolf 1997, Kondolf y Mathews 1993),
- III. Disminución del ancho del cauce (Wilcock et al. 1996, Williams y Wolman 1984),
- IV. Colonización por la vegetación de ribera de áreas anteriormente activas (Inbar, 1990) y
- V. Sedimentación en el cauce se produce cuando los caudales que libera la presa son inferiores a los naturales y no tienen capacidad para transportar los sedimentos que llegan al lecho aguas abajo desde:
 - a. Materiales provenientes de la misma construcción de la presa,
 - b. Aportes de tributarios,
 - c. Sedimentos derivados de tramos donde se produce un proceso de erosión,
 - d. Aportes eólicas, y
 - e. Redistribución del sedimento del lecho o de las barras (Petts, 1984).

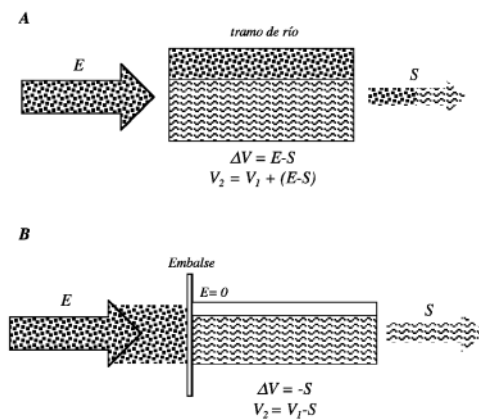


Figura 1. Efectos de una presa sobre el balance de sedimentos de un tramo fluvial. (A) Situación de equilibrio en ausencia de embalses y (B) cambios en la transferencia de sedimentos aguas abajo de la presa: retención en el embalse y erosión aguas abajo. En ambos escenarios se expresan las relaciones entre las entradas (E), las salidas (S), y el volumen de sedimentos acumulados en el cauce de manera atemporal, partiendo de un estadio inicial (V_1) con tendencia a la acumulación, y transcurrido un período de tiempo (V_2) en el que se ha producido incisión.

Fuente: Williams y Wolman 1984; Petts 1984

El presente trabajo se enfoca en caracterizar los cambios morfológicos del río Biobío aguas abajo de las centrales Pangué (1996), Ralco (2004) y Angostura (2013), utilizando para ello información remota recopilada desde bases de datos internacionales y nacionales. En este trabajo se explicará la evolución de los cambios morfológicos del río Biobío durante los últimos 40 años. El análisis se basó realizando una comparación de imágenes aéreas a escalas de tiempo anual, estacional y mensual para el curso principal. Por ende, para analizar y detectar cambios en la morfología se definieron previamente, las variables de planimetría, clasificación de cauces según lo plantean Leopold & Wolman, (1957), y los parámetros como los que establece Mueller (1968). Se espera que los resultados puedan considerarse en el diseño de futuras centrales a nivel mundial.

1.1 Situación internacional

En ámbitos internacionales se conocen distintos casos con respecto al análisis y método en cambios morfológicos, en donde se aborda con mayor relevancia es en la forma de calcular y obtener los resultados de variables físicas.

Tales casos se dan a conocer en distintos territorios fluviales, como en España sobre un análisis en relación de los cambios operados en la dinámica fluvial y los cambios morfológicos observados por el Instituto Geológico y Minero de España (2016) en el cauce del río Serpis, en un tramo de 7,5km. En este río existen construcciones de represas y embalses a lo largo del tramo. El objetivo principal es evaluar el impacto de estas obras hidráulicas en la evolución geomorfológica del cauce, para el estudio de los cambios en la dinámica de barras y morfología. Se emplearon diversas fotografías aéreas anteriores y posteriores a la construcción del embalse.

Asimismo, se ha efectuado una estimación de los procesos de incisión fluvial en las terrazas identificadas en el cauce. Los resultados muestran un cauce que ha experimentado un proceso de estrechamiento con una reducción del 99% y colonización vegetal, así como de disminución del número de canales activos. También se observa una incisión moderada en comparación a lo observado en otros cauces mediterráneos en el mismo período. Dada la escasa relevancia de los cambios operados en los usos del suelo en el período de estudio y la ausencia de otras actividades que afectan a la disponibilidad de sedimentos se ha podido establecer una relación directa entre la modificación del régimen de crecidas y los cambios observados en la morfología fluvial.

Otro caso por presentar corresponde al río Paraná en Argentina. Es uno de los grandes sistemas fluviales del planeta, y comparte con los de esta categoría un patrón de cauce múltiple en torno a islas de dispar tamaño, lecho arenoso y baja pendiente (Latrubesse, 2008). Este río ha sido objeto de varios estudios de evolución morfológica, entre los que se destacan los de Cabral (1973), Popolizio et al. (1980), Toniolo (1999), Ramonell et al. (2000), Amsler et al. (2005), Castro (2007) y FICH (2008, 2012), por ser los más extensivos tanto en la longitud de los tramos considerados como en las series de tiempo analizadas, que llegan a cubrir gran parte del siglo XX. Una parte de esos trabajos vincularon los cambios históricos detectados con variaciones en el caudal formativo o dominante del río (e.g., Amsler et al., 2005), que a lo largo del siglo XX osciló entre los aproximadamente 24.400 y 16.400 m³/s en las partes del río donde el flujo está concentrado en un cauce único o de varios brazos relativamente cortos, y los 15.400 a 12.500 m³/s en las secciones en las que el cauce principal coexiste con brazos secundarios importantes, de gran longitud y persistencia a través del tiempo. En tal sentido, es bien conocido que los cauces aluviales suelen ser afectados por más controles en la dirección del escurrimiento, que pueden condicionar sus dimensiones y cambios morfológicos de manera diferencial en segmentos sucesivos (Sobrero, Ramonell y Pereira. 2014).

Por tal razón, en estos casos de ríos con gran longitud resulta apropiado segmentarlos, a fin de indagar sobre el grado de influencia de la suma de controles en la morfodinámica fluvial, o de individualizar, siguiendo fines aplicados, las partes morfológicamente más estables o inestables de un río.

La Comisión Mundial de Represas (2000) publicó un informe en el cual señala que uno de los principales beneficios de las represas es el control de inundaciones disminuyendo así las amenazas para la vida, la salud, medios de subsistencia y propiedad, sin embargo, en este contexto se reconoce que hay casos en que las represas han creado o empeorado las inundaciones debido a rupturas, a la operación deficiente de embalses y a cambios en las pautas de sedimentación río abajo, lo que disminuye la capacidad de canalización del río.

Después de exponer lo anterior, el informe indica que se requiere no sólo de un control de inundaciones sino de una gestión integrada de las mismas, gestionar la relación entre las inundaciones y las personas ya que el establecer una represa se incentiva el establecimiento de personas aguas abajo de las obras poniendo en riesgo a esta población, esto con el fin de minimizar daños y maximizar beneficios económicos. Sin embargo, para que sea posible la implementación de esta gestión la comisión concluye que se debe realizar investigación para desarrollar conocimiento acerca de hasta qué punto las inundaciones administradas pueden contrarrestar los impactos de represas en ecosistemas y en medios de subsistencia río abajo mencionada por la Comisión Mundial de Represas (CMR).

Internacionalmente este no ha sido el único estudio realizado para determinar los verdaderos impactos de las represas, uno de estos es el realizado por el CMR con el apoyo de International Rivers en Estados Unidos (2009) en donde aseguran que la construcción de una central hidroeléctrica trae como consecuencia la elevación de los niveles de agua en relación con los naturales, que ocasiona una disminución de la velocidad del flujo además de inundar temporal o permanentemente áreas próximas al río, lo que tiene impactos sobre el medio físico y biológico.

La magnitud de dichos impactos está relacionada con la fragilidad del sector donde se emplace el proyecto y con el tamaño del proyecto. Algunos impactos son:

- Alteración de los ecosistemas terrestres y de la biodiversidad.
- Alteración de los ecosistemas acuáticos y biodiversidad, e impactos en la pesca.
- Cambios en el régimen del río, alteración de ciclos naturales de crecidas.
- Alteración de paisaje
- Impactos socioeconómicos y arqueológicos
- Impactos en comunidades indígenas

La figura 2 ilustra la relación entre flujo base, lecho del río y la llanura de inundación. El ancho del canal se determina mejor ubicando a la primera parte de la superficie que depositaria de forma plana y que ocurre sobre el lecho de la corriente, es decir, una llanura de inundación activa. El más bajo es la elevación a la cual podría ocurrir la superficie de sedimentos y es en la parte superior de las barras de puntos u otros depósitos de sedimentos en la cama del canal. Otros indicadores del bankfull como la superficie incluye una ruptura en la pendiente en la orilla, cambio de vegetación, sustrato y escombros.

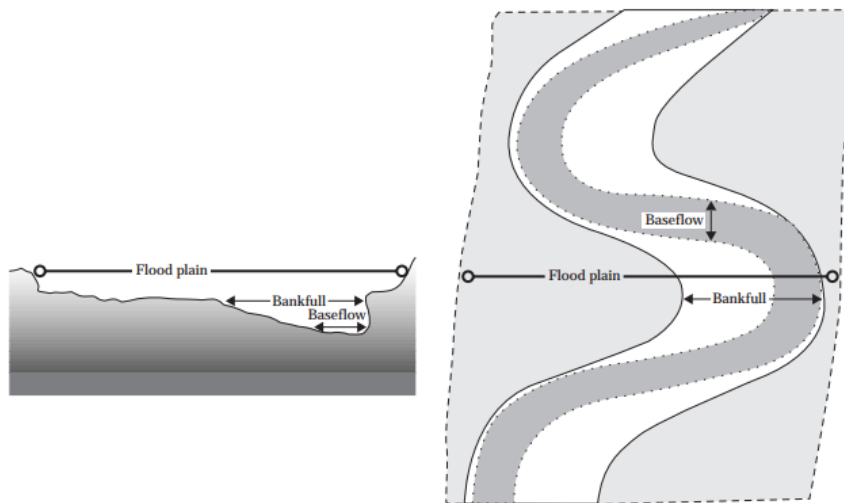


Figura 2: Ubicaciones de flujo base, lecho del río y llanuras de inundación. Fuente: Rosgen 1996

Al estar el flujo de agua controlado y sin suministro de sedimentos, las formas fluviales tienden a estabilizarse, el patrón de la forma del río cambia sufriendo un ensanchamiento y disminuye la fuerza del caudal. También las áreas costeras que reciben suministro de sedimentos de los ríos son especialmente vulnerables a los impactos de la reducción de sedimentos, y hay evidencias de desaparición de playas a tasa acelerada debido a la falta de suministro de sedimentos (Gaillot y Piégay, 1999). De la misma forma, los deltas se pueden erosionar a causa de la reducción del suministro de sedimentos desde las áreas represadas (Yang et al., 2006). Cabe destacar que hay más investigación disponible acerca de los impactos de represas y embalses sobre dinámicas de sedimentos, y menos sobre los efectos de obras de paso (run-of-the-river). Sin embargo, se evidencian impactos, que dependen sobre todo de la modalidad de retención de sedimentos en las tomas de agua, manejo de estos, y longitud de los tramos entre toma y devolución de los flujos.

Una de las características más importantes con las que cuentan los sistemas de transporte a superficie libre es su capacidad de autorregularse, permitiéndoles adaptarse a factores externos para mantener un cierto estado de equilibrio. Este estado de equilibrio en el caso del río es logrado mediante la regulación de sus factores morfológicos y dinámicos ante la modificación de sus variables independientes o de control, como el régimen de caudales y sus sedimentos. Cuando se considera un cauce estable, o en equilibrio, es porque sus formas en planta y perfil se mantienen en el tiempo, aunque de manera local existan procesos de erosión o socavación (Díaz, 2010). Una de las teorías que se usan para explicar la forma en que el río se ajusta para alcanzar su estado de equilibrio, es la propuesta por Yalin (1976), según la cual el río ajusta su geometría hidráulica para un determinado gasto, de manera tal que se minimice la tasa de trabajo efectuado, o la energía utilizada por unidad de superficie, es decir minimizar el producto de la pendiente por la velocidad. En general se asume que un cauce está en equilibrio cuando ha adquirido una pendiente suficiente para transportar el material que el sistema fluvial le suministra. Dicha situación de equilibrio es aplicable momentáneamente, pues ningún curso de agua se encuentra en equilibrio permanente, por esta razón es preferible decir que un río se encuentra en régimen cuando es en un largo período de tiempo, el cual no hay transporte de materiales y tampoco efecto de erosión en su cauce. (Díaz, 2010).

El equilibrio o ruptura en la morfodinámica fluvial mediterránea en los sistemas fluviales naturales rara vez alcanzan un perfecto estado de equilibrio. No sólo varían las características hidrodinámicas de las corrientes, sino también sus formas y procesos. El resultado de este continuo cambio es una variación concomitante con la morfología global del sistema, que al cabo de los años termina dando paso a una estabilidad relativa (García, 1999).

En cuencas y cursos de agua fuertemente alterados por la acción del hombre, como la mayoría de los que vierten al Mediterráneo Occidental, se observa una aceleración en estos cambios morfológicos, acordes con los rápidos ajustes de los caudales sólido y líquido, de la pendiente del cauce y del tamaño de las partículas transportadas. Hay incluso modelos de cauces especialmente activos, como los cursos trezados (Ollero, 2008). El origen básico de estas alteraciones se encuentra en el propio desarrollo socioeconómico de las áreas, con actividades que consumen territorio, agua y sedimentos, y con exigencias sociales de protección, estabilidad e integración en medios urbanos (Ollero, 2007).

1.2 Situación nacional

La morfología fluvial se menciona tangencialmente en la Guía de Caudales Ambientales (2016). La Dirección General de Aguas (DGA) realiza mediciones de transporte de sedimento en suspensión en estaciones fluviométricas en algunas cuencas, a través de una toma diaria de muestra de agua. Mediciones planimétricas no se miden rutinariamente, o no hay un registro ordenado de ellas, aunque algunas puedan ser monitoreadas por asociaciones de usuarios o empresas.

Algunas mediciones o registros han sido cuantificados en un estudio recientemente comisionado por el Ministerio de Energía (2016) en el marco de un proyecto-estudio sobre planificación del desarrollo hidroeléctrico, que caracterizó los tipos morfológicos de los ríos (planimétricamente) considerando islas y barras, ancho del cauce, continuidad de la vegetación riparia, el grado de confinamiento lateral, entre otros. Estas características morfológicas se evaluaron en Google Earth con la foto más reciente disponible, por lo que no se ha hecho un monitoreo de los cambios morfológicos en años anteriores.

Una búsqueda de literatura científica, indica que en Chile hay algunos estudios de morfología fluvial, pero se caracterizan por ser experiencias puntuales, que no se guían por protocolos similares o comparables. Al mismo tiempo, todavía no existe una política país que impulse el conocimiento, monitoreo y cuidado en este tema.

II. Objetivos

2.1 Objetivo general

Análisis de los cambios morfológicos en un tramo río Biobío aguas abajo de las represas Pangué, Ralco y Angostura.

2.2 Objetivos específicos

- i) Identificar la existencia de cambios morfológicos en la porción media del río Biobío aguas abajo de las represas
- ii) Cuantificar los cambios morfológicos a través de parámetros morfológicos en la porción media del río Biobío aguas abajo de las represas
- iii) Describir las posibles razones de los cambios identificados, de manera de proponer sugerencias futuras sobre intervenciones en el río Biobío

III. Antecedentes

3.1 Área de estudio

La cuenca del río Biobío ubicada en la región del Biobío en Chile (Figura 3A), se extiende desde la cordillera de los Andes hasta el Océano Pacífico. El caudal medio anual, en la parte baja del río, es de $994\text{m}^3/\text{s}$ y posee una marcada variación estacional (Parra et al., 2009). El río fluye en dirección norte occidental a través de 110km de un promontorio montañoso y 270km de llanura abierta. La transición de promontorio está abierta a una distancia muy corta dentro de la llanura con un cambio abrupto en la pendiente del 0.39% a 0.046% en sólo 5km (Petersen y Sangfors 1991).

Luego de escurrir 380 km el río alcanza el Golfo de Arauco, cerca de la ciudad de Concepción. En su desembocadura suele presentar normalmente crecidas de hasta $8.000\text{ m}^3/\text{s}$. Pero se estima que podrían registrarse crecidas sobre los $17.000\text{ m}^3/\text{s}$ (referencias)

La hidrología del cauce principal y de sus afluentes, sigue comportamientos diferentes debido a las distintas unidades morfológicas presentes (Cordillera de los Andes, Valle Central o Depresión Intermedia y Cordillera de la Costa) que influyen en la precipitación nival y/o pluvial, en toda la extensión de la cuenca (EULA, 2006)

Tomando los caudales medios mensuales medidos en la estación Biobío en Desembocadura, perteneciente a la DGA, se observa que el régimen del río es del tipo pluvio-nival, con un caudal máximo medio mensual de aproximadamente $2.200\text{ m}^3/\text{s}$ en los meses de junio-julio, que corresponde a los meses de máximas precipitaciones en la cuenca. Los caudales mínimos medio mensuales se ubican en los meses de marzo-abril con valores cercanos a los 180 a $220\text{ m}^3/\text{s}$, cuando se termina el verano y aún no se registran las primeras precipitaciones. Este caudal mínimo se mantiene gracias a algunos aportes nivales remanentes y a la napa subterránea (EULA, 2006).

El río Biobío entre la represa Angostura y la localidad de San Rosendo recorre 80 km con una pendiente suave de $0,05\%$, la que favorece la formación de meandros y la sedimentación. Al final de su recorrido desemboca en el mar, al costado sur de las ciudades de Concepción y Talcahuano. En este lugar, una importante barra obtura la salida e impide la navegación de embarcaciones incluso de escaso calado.

El tramo en que se enfocará el análisis será de aproximadamente 61.900 metros de longitud, y está ubicado en la parte central de la cuenca y aguas abajo de las represas (Figura 3B), tomando en cuenta que la medición será sobre el sector de talweg en el río.

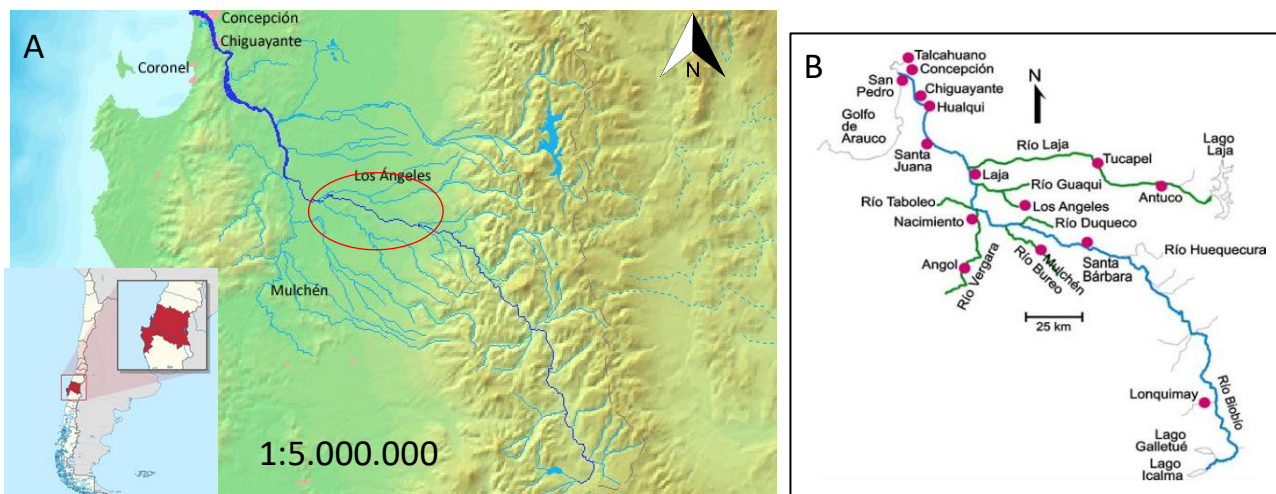


Figura 3: A) Área del río Biobío delimitada. B) Cuenca del río Biobío. Fuente: EULA, 2006

Se identifican tres represas instaladas aguas arriba del tramo de estudio, Pangué, Ralco y Angostura construidas en los años 1996, 2004 y 2013 respectivamente.

En la figura 4 se observan los tres embalses de cada una de las centrales los cuales se encuentran ubicadas aguas arriba de la comuna de Santa Bárbara y, por lo tanto, se encuentran al este del área de estudio delimitada en la figura 3A



Figura 4: Centrales hidroeléctricas en el río Biobío. Fuente: Google Earth

3.2 Sistema fluvial

En un sistema fluvial se manifiestan distintos procesos físicos, siendo uno de ellos el proceso denominado erosión y sedimentación. Ambos procesos son de gran relevancia para determinar el rendimiento del cauce, por ejemplo, si se transporta en menor grado material de sedimento, es porque hay menor erosión o un obstáculo en el trayecto, siendo estos procesos directamente proporcionales tal como menciona Ferguson (1981). Ferguson presenta un método para calcular la velocidad y el comportamiento de los procesos dentro del sistema fluvial como erosión y sedimentación, no obstante, se debe recopilar datos en terreno.

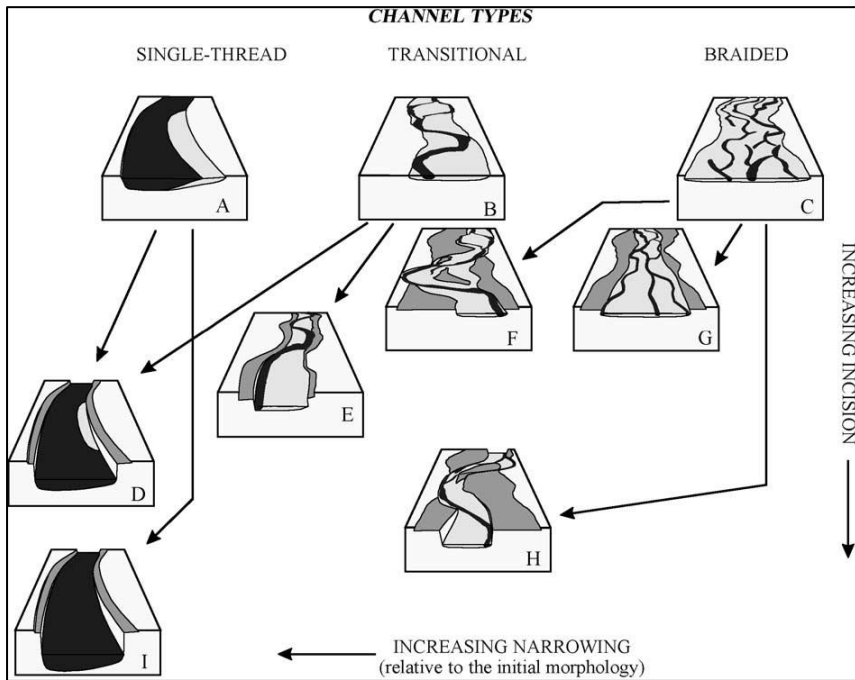


Figura 5: Ejemplo de un esquema de clasificación de ajustes de canales para ríos italianos. A partir de tres morfologías iniciales: A) Rectilíneo, B) Transitorio y C) Trenzado, diferentes canales los ajustes tienen lugar debido a los grados variables de incisión y estrechamiento. Fuente: Surian y Rinaldi (2003)

Continuando con el enfoque de los procesos físicos, Milliman y Syvitski (1993) mencionan la relación del área de la cuenca y sedimento para estimar el rendimiento. Con el análisis de estos procesos físicos de la cuenca, se llevaría a cabo la probabilidad de interpretar cambios morfológicos junto a las causas de aquellos cambios identificados.

También los indicadores en ríos pueden interpretar cambios morfológicos esperados, como nivel del suelo, estrechamiento del canal y cambios en la ampliación y gradiente del cauce del río demostrado en la figura 5. Estos cambios de la forma del cauce se identificaron, a través de variables en ríos sinuosos y trenzados. En la evaluación a escala tiempo, con una alta probabilidad, los ríos tendrán cambios donde se registrarán porcentajes diferentes entre incisión del canal y estrechamiento y donde los efectos se observarán con la reducción de los sedimentos.

Otra variable por destacar es el índice de calidad morfológica (MQI) que cumple con el propósito en la evaluación tanto del cauce como el transporte y distribución de condiciones morfológicas, ya sea nivel macro escala como una cuenca o microescala como un tramo de un río, el cual se debe tomar variadas muestras de imágenes a través del tiempo. Este método representa una forma con mayor detalle la morfología de un río, el cual destaca los cambios de períodos cortos en el tiempo, denominado Índice de Calidad Morfológica de Monitorio (MQIm) y que establece el detalle de los cambios encontrados en escala tiempo y de un área más acotada (Rinaldi et al, 2015).

Además de las variables, existen Modelos de Evolución de Canales (CEM) propuestos para ríos incisos en aluvión (Schumm et al., 1984; Simon y Hupp, 1986), validando las causas de los cambios morfológicos en valles fluviales, y que dan énfasis al estudio específico de la problemática de la degradación geomorfológica en los ríos.

Los ríos desaguan caudales procedentes de la cuenca hidrográfica. Sin embargo, los caudales líquidos transportan también sedimentos, erosionados a escala de cuenca o de red hidrográfica, y los ríos funcionan entonces como cinta transportadora de sedimentos, ya que hacen el trabajo de transportar sedimentos desde aguas arriba de la cuenca hasta el mar, a través de la erosión, transporte y deposición de sedimentos. Estos sedimentos pueden ser transportados en suspensión o arrastrados en el fondo del lecho, dependiendo del tamaño de las partículas y del esfuerzo cortante que la corriente puede ejercer en el lecho.

En el transporte del fondo de un río corresponde el desplazamiento de partículas de arenas o material de diámetros mayor, que se mueven aguas abajo en el lecho, deslizándose, saltando o rodando. Por otra parte, partículas de limo y de diámetro inferior, son transportadas en suspensión, es decir en la columna de agua, por efecto de la turbulencia del flujo. Considerando la cuenca bajo un punto de vista geomorfológico, es posible considerar tres zonas claves por la dinámica de transporte de sedimentos. La primera zona corresponde a la parte alta de la cuenca, la zona montañosa de alta pendiente, donde predominan los procesos erosivos y donde se originan y se producen la mayor cantidad de sedimentos que van a ser transportados aguas abajo. Estos procesos que aportan sedimentos son variados, incluyen deslizamientos de tierras, caídas de rocas, coladas detríticas, sedimentos glaciares, entre otros. En una segunda porción de la cuenca, más aguas abajo, se puede conceptualmente entender que los sedimentos pasan por una zona de transferencia, en donde la pendiente disminuye y los procesos de erosión y deposición están en equilibrio entre sí.

A medida que el río se aproxima al mar, la pendiente disminuye, y por lo tanto el proceso de deposición comienza a ser mayor que el de erosión, por lo que se llega a la tercera zona, siendo una zona de deposición. La pendiente es casi nula, y los sedimentos se depositan, especialmente en zonas denominadas deltas. En transportar sedimentos, y por efectos de procesos de erosión-sedimentación localizada, los ríos modelan sus formas, determinándose la dimensión y la localización de pozones, barras, islas, meandros, etc. Estas formas son cruciales en determinar la diversidad de hábitats fluviales, y por ende la biodiversidad potencial que un sistema fluvial puede albergar. La forma de los ríos es entonces el fruto de un delicado e inestable equilibrio entre la hidráulica (caudales líquidos), el transporte de sedimentos (caudales sólidos) y la geomorfología (dimensión de sedimentos, geometría del lecho).

Cualquier cambio en la cantidad de agua o sedimentos en el río puede afectar la morfología, cambiando el tamaño de los sedimentos, la pendiente, y erosionando o depositando sedimentos en el río. Esto va a afectar el patrón de la forma del cauce, el cual puede cambiar en dos dimensiones: longitudinal y transversalmente. A su vez, los cambios en los patrones del canal van a estar restringidos por las condiciones físicas del valle. Así mismo, esta geometría y patrón del canal van a afectar el flujo hídrico proveniente de cierto régimen hídrico (pluvial, nivel, glaciar), y este, con sus variabilidades, va a afectar el transporte de sedimentos. Éste transporte, está relacionado estrechamente con el suministro de sedimentos, una variable difícil de cuantificar, pero que se ha comprobado ser una limitante en el transporte de sedimentos. Por lo tanto, la relación entre el régimen hídrico, el suministro de sedimentos y la geometría del valle, son un tridente fundamental para comprender la geomorfología fluvial y sus procesos, y el cambio en el flujo, magnitud y régimen de estos va a afectar las formas y procesos que ocurren en los ríos.

De acuerdo con lo anterior, los ríos van a presentar diferentes formas y características según donde se encuentren en la cuenca, su suministro de sedimentos y los flujos hídricos (cantidad promedio, pero también magnitud, frecuencia, y duración de las crecidas). Debido a esto, cada río tiene cierta forma y ecología asociada. La morfología de los ríos se puede clasificar de varias formas, y una manera simple e intuitiva de hacerlo es según su forma planimétrica (Figura 6). Ejemplificando, los ríos de montaña van a tener formas rectilíneas, ya que usualmente están confinados lateralmente y no pueden migrar y generar otras formas (Shen, 1981). Al encontrarse en un lugar donde el suministro de sedimentos que proviene de las laderas, y por tener la corriente mucha energía para arrastrar los sedimentos más finos, los sedimentos del lecho son en general gruesos. En estos casos la pendiente es alta y por lo tanto hay mucha energía disponible para transportar sedimentos, y el transporte de fondo es la forma predominante de transporte.

Hacia aguas abajo, la pendiente disminuye, los valles se vuelven menos confinados, y el río va a tener más espacio para migrar y menor velocidad ya que baja la pendiente. Aquí los ríos pueden generar canales múltiples con barras de sedimento mediales. Así mismo, los sedimentos tienen menor diámetro. Finalmente, en el trayecto hacia la desembocadura, cuando la pendiente disminuye aún más, ya que habrá menos energía para transportar sedimentos, con la excepción del transporte de sedimentos muy finos, el lecho del río aumentará su diámetro.

Bajo esas condiciones los ríos pueden generar meandros. En general, los sedimentos que llegan a esta zona son finos, es decir arcillas hasta arenas, debido a la menor energía presente en esta zona. En definitiva, las formas fluviales dependen de los procesos asociados al transporte de sedimentos, y dependen de la zona en donde se ubiquen en la cuenca.

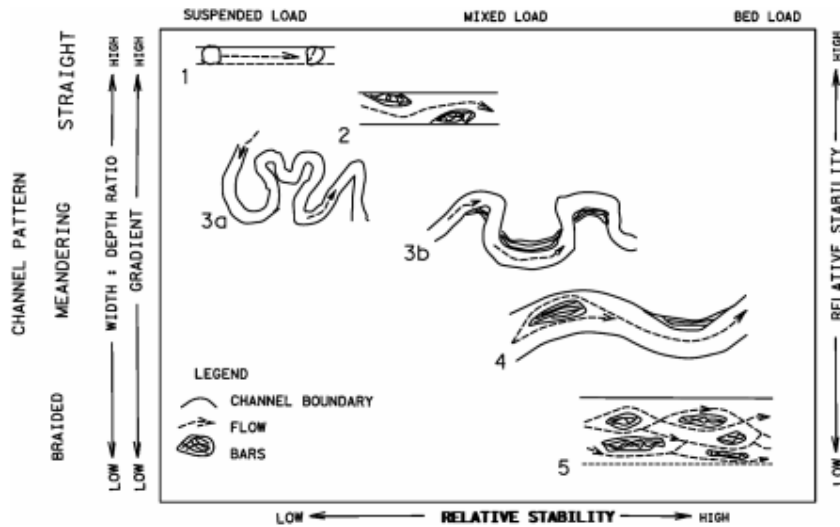


Figura 6. Ejemplo de clasificación de los sistemas fluviales, basada en las formas planimétricas. Fuente: Shen, 1981.

Las formas que presentan los ríos a través de una cuenca permiten identificar los procesos que ocurren. Además, las diferentes formas fluviales son la base para el desarrollo de hábitats y por la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos y de toda la faja ribereña. El desarrollo de las cadenas tróficas en los ríos está directamente relacionado con la calidad de hábitats fluviales. La morfología fluvial no sólo tiene importancia en los ecosistemas, ya que entender las formas e inferir procesos ayuda a la planificación y el manejo integrado de las cuencas.

Todo lo que ocurre en la cuenca se refleja en cómo se presenta o se comporta un río, tanto en la hidráulica como en su morfología. Por lo mismo, cada intervención en el cauce debe considerar la morfología fluvial para determinar los efectos que la intervención tiene en el río. De la misma forma, comprender la morfología fluvial es fundamental para ver los efectos que puede tener éstas sobre las obras en el corto, mediano y largo plazo, sobre todo con eventos extraordinarios de crecidas.

Una vez formado un valle sobre un terreno recién emergido, experimenta una serie de cambios interrelacionados. Haciendo una cruda analogía con la evolución de una vida humana, los valles presentan etapas de Juventud, Madurez y Vejez. El concepto de Thomas (1974), en el caso de la evolución de los suelos y de las formas del terreno, se trata de sistemas abiertos, en los cuales los conceptos evolucionarios están fuera de lugar. En realidad, esta analogía sirve para analizar el estado de desarrollo, más que la edad absoluta de un valle.

La formación de un relieve nuevo sobre la superficie de la tierra y toda la serie de cambios que operan sobre él a través de sus distintas etapas de evolución, constituyen el "Ciclo Geomórfico". Este ciclo es controlado por erosión y movimientos en masa, en desarrollo del "Ciclo Fluvial".

Según expone Longwell (1982), "si bien, en el período de una vida humana nadie ha podido presenciar un ciclo geomorfológico completo, si podemos observar por todas partes rasgos geomorfológicos característicos de los distintos estados de desarrollo del relieve y a partir de esas evidencias, somos capaces de inferir la manera cómo va a evolucionar una corriente en el futuro."

3.3 Sensoramiento remoto

Los sistemas de teledetección espacial tienen una importancia muy significativa y es la información que entregan sobre el espectro. El infrarrojo cercano, térmico o las microondas son fenómenos para los cuales estamos limitados a percibir. Con el fin de comprender todos los aspectos, resulta importante investigar la forma en que se comportan las distintas superficies en esas bandas del espectro.

Como la investigación presenta un gran uso del método en sensoramiento remoto, el más relevante dentro de la categoría teledetección, que son los sistemas satelitales, donde la plataforma o soporte y el sensor son los dos componentes esenciales. La plataforma es la encargada de transportar el sensor y ubicarlo para desarrollar su labor. La plataforma puede ser espacial, aérea o terrestre.

A las terrestres se le conoce comúnmente como camiones, los que están equipados para el manejo con mucha exactitud del sensor remoto. Lo que respecta a las aéreas, usualmente corresponden a aviones que realizan trabajos de reconocimiento a áreas que son difícil acceso (García y Caselles.2008). Finalmente, los espaciales lo conforman claramente los satelitales que son utilizados para lograr una cobertura de toda la superficie de la tierra. Existen una variación de satélites, el que más se utilizó en la investigación fueron los satélites Landsat, que corresponden a un conjunto de satélites creados en Estados Unidos. Estos satélites se utilizan para la observación de la superficie terrestre en alta resolución (Shumuggea y Bindlisha. 2009). La órbita a la que estos satélites giran alrededor de la tierra es circular helio sincrónica, la inclinación que adoptan es de 98.2° respecto del Ecuador, la altura a la que están estos satélites es de 705 km y gira en un período de 99 minutos.

Otra herramienta que ocupa los últimos satélites es el ETM+ (Mapeador temático mejorado), corresponde al nuevo sensor que se encuentra en el último satélite que fue lanzado en abril de 1999. La operación de este dispositivo está en manos de la NASA, luego la comercialización y producción de las imágenes que se pueden obtener de este sensor restan a cargo de la USGS (Estudio Geológico de los Estados Unidos).

Una imagen que se obtenga del Landsat 7ETM+, está compuesta por ocho bandas espectrales, estas bandas pueden combinarse utilizando diferentes algoritmos según las aplicaciones del usuario final.

Entre el satélite Landsat 5 y el Landsat 7 existe diferencia en cuanto a mejoras técnicas, por ejemplo, se adiciona una banda espectral conocida como una banda pancromática que posee una resolución de 15m. Sus mejoras van también por el ámbito de las características geométricas y radiométricas (Shumuggea y Bindlisha. 2009). Además, se mejoró la resolución espacial de la banda térmica que corresponde a 60m. Tal diferencia de resolución se muestra en la figura 7 y 8.

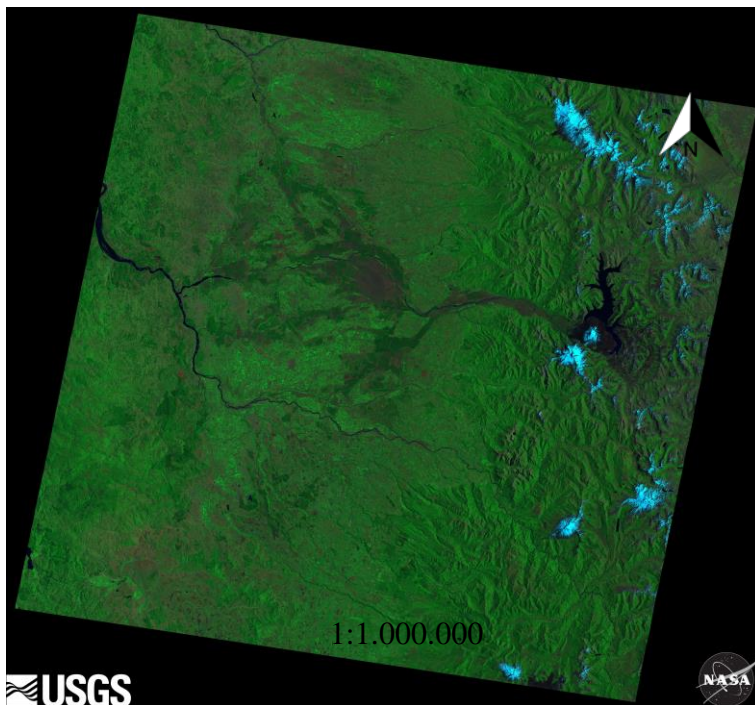


Figura 7: Imagen satelital con Landsat 5. Fuente: Fuente: <https://glovis.usgs.gov/app/#>

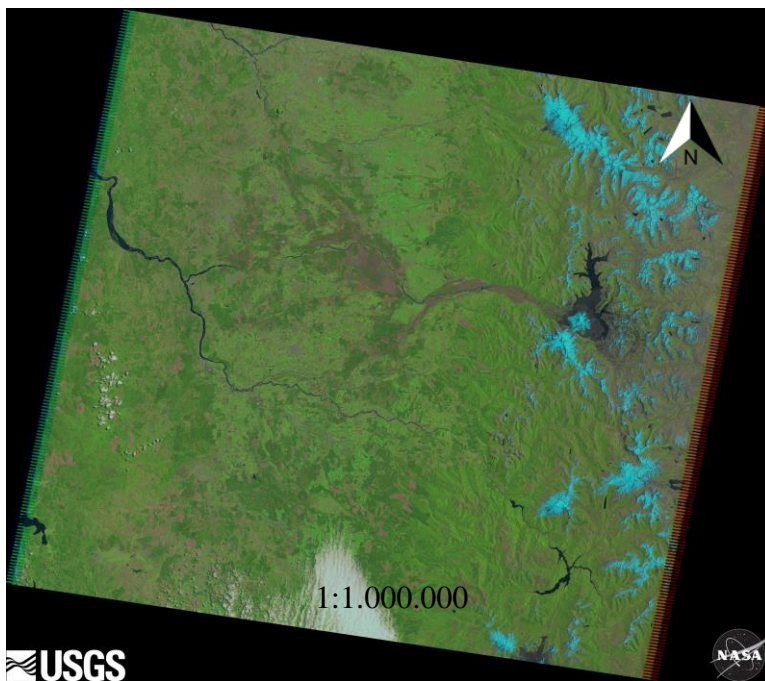


Figura 8: Imagen satelital con Landsat 7. Fuente: Fuente: <https://glovis.usgs.gov/app/#>

El Landsat 7, gracias a sus nuevos avances tecnológicos, está clasificado como uno de los satélites más importantes al momento de genera imágenes a una escala de 1:25.000. Las imágenes que se adquieren a través del sensor ETM+, presentan mejor relación en el tema costo-beneficio. Esto en comparación con satélites que generan imágenes de resolución media que son ofrecidas actualmente en el mercado.

En tanto Landsat 5 y Landsat 7 poseen el mismo período de revolución, que corresponde a 16 días, destacándose como un factor muy importante. Además, sus imágenes cubren la misma área que corresponde a 185x185 km por escena. Es muy importante conservar estos parámetros técnicos, ya que facilitan que la captura de imágenes pueda realizarse con la misma grilla de referencia y que permita una perfecta integración entre los datos históricos del Landsat, existente desde el año 1985 y el procesamiento de imágenes del Landsat 7.

IV Metodología

Se recopilan imágenes donde se encuentran instaladas las centrales hidroeléctricas, y la zona inmediata aguas abajo del río Biobío. Luego se acotará el área de estudio sobre la base de cambios morfológicos evidentes a escala regional. La metodología se compone en distintas etapas el cual será mencionadas y descritas a continuación.

4.1 Imágenes satelitales

Uno de los sistemas para trabajar son programas como Arcgis y Google Earth, el cual se puede editar las imágenes georreferenciada en el área de estudio. El gran potencial es trabajar en conjunto para georreferenciar las imágenes para luego editar con el fin de realizar los cálculos según las variables morfológicas que se necesiten demostrar.

Para lograr delimitar el área de estudio se necesita caracterizar las tres centrales hidroeléctricas en el río Biobío, el cual se revelarán imágenes satelitales y luego analizar preferentemente en las centrales de grandes dimensiones, a través de imágenes LANDSAT que se podrá descargar de forma online en la página: <https://glovis.usgs.gov/app>, y se descargarán las imágenes antes y después de la centrales en el área de estudio, donde este punto del método es de mayor importancia por la razón en que se observara de mejor forma los cambios morfológicos y sobre todo identificar las diferencias tomando en cuenta las fechas de instalación de las centrales hidroeléctricas como Pangué, Ralco y Angostura respectivamente y tomando en cuenta la forma del río antes y después de las instalaciones usando una escala no más de 1:30.000.

4.1.1 Mapas temáticos

En esta etapa los mapas a trabajar se obtienen para diferentes tiempos para el área del río delimitada en la figura 3A, debido al método de diferenciar y representar los cambios según las variables a calcular. Se utilizarán imágenes entre los años 1990, 1998, 2003, 2004, 2005, 2012, 2013 y 2014 para revelar de mejor manera los detalles los cambios morfológicos temporales. Sin embargo, en el caso de la central Pangué, las imágenes del año posterior a 1998 tiene pocas imágenes satelitales y con ello se tiene una baja probabilidad en demostrar los objetivos del tema en una escala menor, a diferencia de la central Ralco, ya que existe un rango de mayor cantidad de imágenes mostrando los cambios mensualmente. Producto del análisis se obtendrán imágenes finales en que se podrá interpretar los resultados esperados y demostrados en tablas por cada año.

Finalmente, se hará una comparación entre los resultados esperados y evaluando los resultados por año y a través de gráficos, representado de mejor manera dichos cambios que se manifiestan en los resultados de los indicadores a utilizar.

4.2 El Índice de Calidad Morfológica de monitoreo (MQIm) y variables

En cuestión al control y seguimiento de MQIm (Shen, 1981), las condiciones morfológicas se describen de las siguientes acciones, complementado en la Tabla 1:

- El MQIm puede ser adoptado, en integración con el MQI, para la Declaración mundial de evaluación en monitoreo (2012), con una frecuencia espacio-temporal que puede definirse en función del tipo de seguimiento (vigilancia, operativo, investigativo).
- Evaluación del impacto de nuevas intervenciones. El MQIm es particularmente adecuado para evaluar los posibles impactos de una intervención (incluidos los proyectos de restauración de ríos) durante la etapa de diseño, dado que este índice es sensible al impacto de las intervenciones incluso de una longitud limitada en comparación con la longitud de alcance.

Tabla 1: Principales diferencias entre MQI y MQIm, según Rinaldi et al, 2015

	Objetivo	Escala temporal	Resultado	Aplicaciones
MQI	Evaluación, clasificación y monitoreo de la corriente estado morfológico	50 a 100 años	Clases discretas	Herramienta para evaluar alteraciones morfológicas comparado con no perturbado condiciones
MQIm	Seguimiento de morfológico condiciones en el término corto	5 a 10 años	Continuo funciones y clases discretas	Herramienta para evaluar cambios. De calidad morfológica a corto plazo

En el caso MQIm se destaca el proceso de seguimiento en áreas fundamentales de cada segmento de un cauce y que se requiere el detalle de la evaluación descrita por la gestión de calificación de ríos establecido por La Directiva Marco del Agua (WFD) de la UE:

- Intervenciones de restauración de ríos. En el caso de la implantación de una restauración, el proyecto que involucre una porción significativa del alcance es recomendable llevar a cabo la evaluación algún tiempo después de la intervención, por ejemplo, después de algunas inundaciones formativas. En cualquier caso, un período de al menos 5 años posterior a la intervención en aconsejable. Esto es particularmente cierto en el caso de intervenciones de “morfolología reconstrucción”, en cuyo caso es necesario que el río pueda adaptarse a nuevas condiciones.
- Grandes eventos de inundación. En el caso de ocurrencia de un evento de inundación de alta intensidad, se debe prestar especial atención a la interpretación de eventuales cambios morfológicos. De hecho, los efectos de tales eventos podrían influir fuertemente en la interpretación de formas y procesos.

La inestabilidad de un río se puede detectar mediante el denominado “patrón de cauces”, que es el término utilizado para describir la vista en planta de un tramo de un río o la totalidad del cauce vista desde una perspectiva aérea (Ezizshi, 1999).

Por lo anterior, se clasificó el río Biobío siguiendo el criterio de Leopold and Wolman (1957), donde a través de un gráfico logarítmico (Figura 9) establecieron una relación entre pendiente y caudal, para lechos de arena y de grava, para distinguir los ríos trezados de los meándricos. Ellos lograron determinar en base a estos ensayos una delimitación designada como una zona de transición entre un cauce meándrico (parte baja de la recta) y uno trezado (parte superior de la recta):

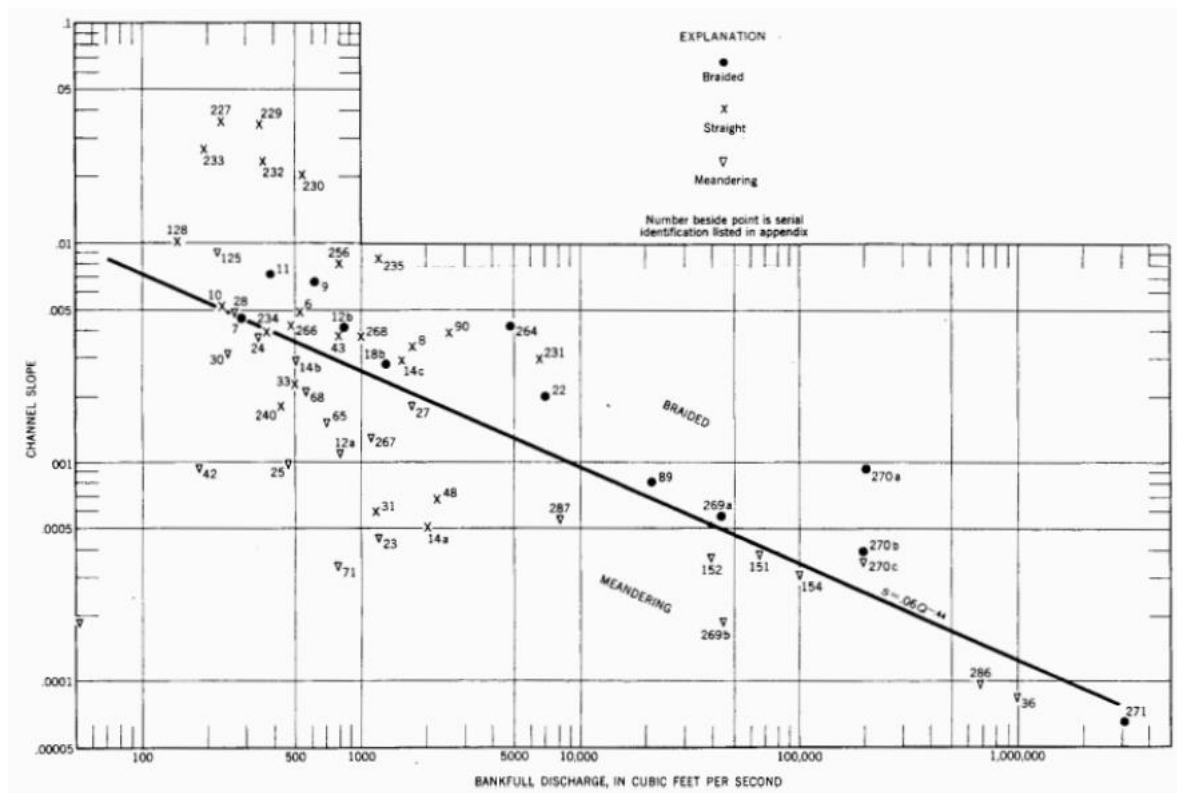


Figura 9: Clasificación de un cauce fluvial. Fuente: Leopold & Wolman, 1957

Luego se deben identificar las variables planimétricas, considerando los factores morfológicos del sistema fluvial. Posterior a ello, serán los indicadores y parámetros las principales herramientas para evaluar los cambios morfológicos usando citas y documentos en las referencias bibliográficas en las que se describen a continuación.

4.2.1 Desplazamiento lateral

Respecto a la naturaleza y origen de los mismos, podemos considerar una fracción que se encuentra representada en el lecho del río y eventualmente en movimiento por los caudales mayores durante un corto periodo de tiempo en lo que se denomina “carga de fondo” y otra fracción más pequeña procedente de la erosión de las laderas y orillas del cauce que no está representada en el lecho y sí en suspensión en el agua efectuando recorridos mucho más largos constituyendo lo que se llama “carga de lavado” (Ortiz, 1964). Esta diferenciación no siempre es clara, pero responde a fines prácticos y así es considerada en la mayoría de los tratados de hidráulica fluvial.

En el movimiento del agua intervienen dos factores o fuerzas: la gravedad que actúa en la dirección aguas abajo y la fricción que se opone a este movimiento. La relación resultante de ambas fuerzas determina la capacidad de la corriente para erosionar y transportar sedimentos (Ortiz, 1964). La fuerza de fricción que determina la resistencia que opone el contorno puede expresarse por unidad de superficie como tensión de arrastre, siendo proporcional al gradiente de velocidades y equivalente a la componente del peso del agua paralela a la superficie de desplazamiento.

En uno de los primeros enfoques realizado por Melton (1936) sintetizó el trabajo de estudio para clasificar cauces en base a llanuras de inundación formados por meandros, sobre-banco (acreción vertical), o procesos de trenzado.

En esta clasificación de las planicies de inundación de Nanson y Croke (1992) interpretaban a los ríos de manera similar vinculados a la llanura de inundación. Las morfologías reflejan estilos específicos de procesos fluviales y la energía que se manifiesta en la llanura, tal energía se traduce en el rendimiento real de un cauce. Esto se basa en pruebas de potencia efectiva (W) clasificando cada tipo de llanura por el rendimiento de su máxima potencia del cauce. Este valor de potencia es considerado para la construcción de represas (Figura 10) y destaca secuencias genéticas de la morfología del canal y la planicie de inundación en respuesta a las perturbaciones identificadas. Los procesos también se utilizan en la clasificación de estilos de río (Brierley y Fryirs, 2005), que además reconoce que las interacciones canal-llanura de inundación pueden ser moduladas por extrínseca, factores físicos en ríos parcialmente confinados (Brierley y Fryirs, 2005; Jain, 2008; Fryirs y Brierley, 2010), a veces se denomina semialluvial.

En la figura 10 se manifiesta las interacciones entre el río y su llanura de inundación circundante, que puede ejercer fuertes controles sobre los procesos físicos, en morfología, potencial de respuesta, y la calidad de diversidad del hábitat para, tanto el río como la llanura de inundación. La clasificación de las planicies de inundación de Nanson y Croke (1992) reconoce que la llanura de inundación forma parte de las características de la morfología de un río el cual reflejan estilos específicos de procesos fluviales y destacan secuencias genéticas, el cual existe una evolución dentro de la morfología del canal y de la planicie de inundación en respuesta a las condiciones ambientales, que pueden alterar y cambiar el flujo de la corriente y el tipo de sedimento. Otros procesos también se utilizan en la clasificación de estilos de río que plantean Brierley y Fryirs (2005), que además reconoce que las interacciones canal-área de inundación pueden ser moduladas por extrínsecos y mencionan factores importantes como acumulación de roca, morrenas glaciales, terrazas en ríos parcialmente confinados que son de forma transitoria entre valles de ríos confinados y no confinados, siendo algunas veces confundido como semi-aluvial.

Debido a que los enfoques de canal y zona de inundación se centran en el flujo donde son capaces de erosionar en todo el lecho del río y hacer transformar las planicies de inundación, tienden a manifestar procesos a largo plazo y reconocer que las condiciones del canal y la planicie de inundación representan una distribución de eventos de inundación, modificando y esculpiendo la morfología del cauce (Melton, 1936; Stevens et al., 1975).

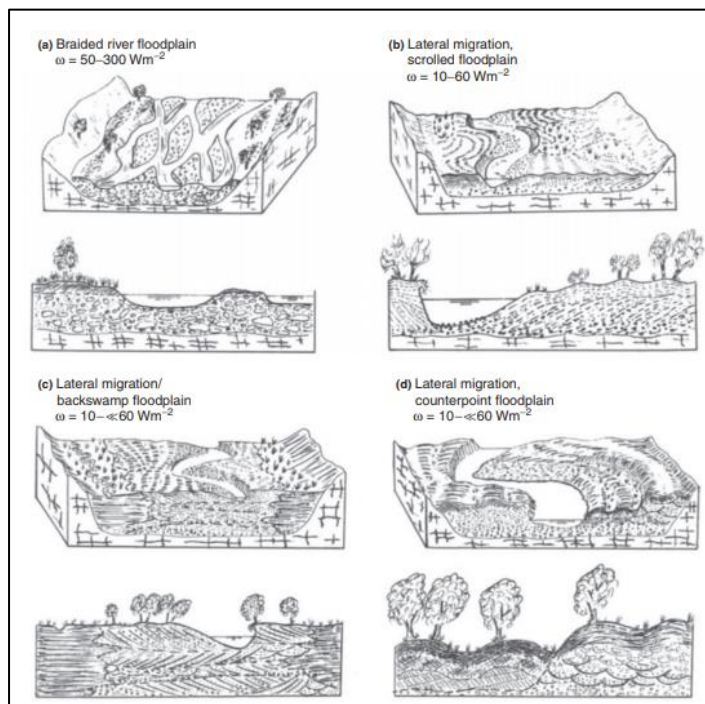


Figura 10: Tipos de llanuras inundables de la clasificación que muestran entornos de energía media. Fuente: Nanson y Croke, 1992

4.2.2 Ancho promedio

En el caso del estudio sobre el ensanchamiento promedio, se debe realizar mediciones geométricas planas de canal para cada año, así como área de canal y los cálculos de la tasa de contracción del canal para cada período a lo largo del alcance del río se recopilaron a través de un análisis SIG imágenes satelitales (Nanson y Hickin, 1986; Petts, 1989; Gurnell, 1997; Wellmeyer, 2005). Para reducir errores en el depósito de canales los cuales se recopilan imágenes de sensoramiento remoto utilizadas en el área de estudio obteniendo diferentes interpretaciones por estaciones, y teniendo en cuenta tanto los canales anchos como los poco profundos, en la orilla del río.

El límite de vegetación se usó para delimitar el cauce activo. Para eliminar la influencia de promedio del nivel del agua por sobre el ancho del canal, agregando la información del canal utilizando la orilla del río y el límite de vegetación. Es un método generalmente adoptado por Gurnell (1997); Winterbottom (2000); Yao (2012); y Wang (2014). Cabe destacar que se puede observar de otra forma el ancho de un canal observando el límite de canal, para las secciones de canal individuales, ausente de la vegetación de la ribera, puede considerarse como la ribera del río recién formada para cada año y con ello identificar los cambios a través del tiempo en las imágenes satelitales.

4.2.3 Sinuosidad

Mueller (1968) determinó que con respecto a los procesos de evolución de un cauce natural se podían considerar una serie de ocho parámetros con tal de conocer las características de la estabilidad lateral de un río (tres parámetros de medición y cinco de cuantificación). Estos cinco índices cuantificables se determinan considerando tres parámetros que pueden ser medidos desde una perspectiva aérea. Los parámetros de medición son la longitud del thalweg, aquella trayectoria donde se sitúa el punto de mayor profundidad del cauce, la longitud del valle que es un promedio entre las longitudes de los extremos del río y finalmente la distancia aérea que es aquella distancia medida en una trayectoria recta entre los dos puntos de control (Figura 11). Luego de cuantificar estos 3 parámetros, se procede a evaluar los restantes 5 índices, que serán presentados a continuación:

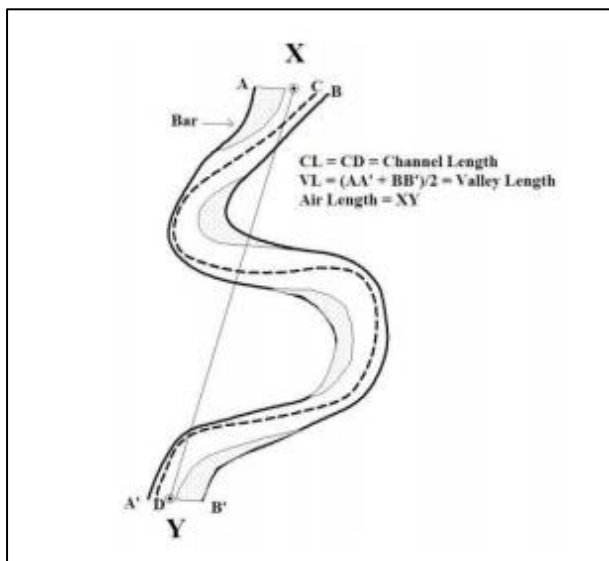


Figura 11: Variables morfológicas según Mueller (1968). Fuente: Ghosh y Mistri, 2012

- a. El índice de sinuosidad (IS) es definido como una relación entre la longitud del talweg con respecto a la longitud del valle. La línea del talweg es aquella por donde se sitúa la zona más profunda del cauce. Por otro lado, la longitud del valle es la distancia que sigue el contorno en ambos extremos del cauce y se expresa a través de la siguiente fórmula.

$$IS = \frac{\textit{Longitud del Talweg}}{\textit{Longitud del Valle}}$$

- b. La sinuosidad total (ST) se define como el índice que se obtiene entre la longitud del talweg y la distancia entre los puntos de control medido desde una vista aérea.

$$ST = \frac{\textit{Longitud del Talweg}}{\textit{Distancia Area}}$$

- c. La sinuosidad del valle (SV) es una expresión matemática entre la trayectoria cuantificada en un promedio de ambas longitudes de márgenes y la distancia más corta del tramo de estudio.

$$SV = \frac{\textit{Longitud del Valle}}{\textit{Distancia Area}}$$

- d. Es una expresión que designa en base a factores hidráulicos la preponderancia del comportamiento del cauce del río. Las sinuosidades total (ST) y del valle (SV) son relevantes para cuantificar este aspecto.

$$SH = \frac{\textit{Sinuosidad Total} - \textit{Sinuosidad del Valle}}{\textit{Sinuosidad Total} - 1} \times 100$$

- e. Es una expresión que designa en base a factores topográficos la preponderancia del comportamiento del cauce del río. Las sinuosidades total (ST) y del valle (SV) también manifiestan preponderancia en este análisis, aunque la expresión matemática sugiere modificaciones, que son presentadas a continuación.

$$STp = \frac{\textit{Sinuosidad del Valle} - 1}{\textit{Sinuosidad Total} - 1} \times 100$$

4.2.4 Trenzado

EL trenzado se desarrolla en tramos donde la carga sólida es elevada, y se caracteriza por la formación de un curso ancho y poco profundo, que se divide en varios brazos dejando islas intercaladas, uniéndose hacia aguas abajo y volviéndose a separar, a modo de trenzas.

Rust (1978) introdujo dos modificaciones para la medición del índice de trenzado de un cauce que había efectuado previamente Brice (1964). Rust (1978) estudio las variaciones de longitud que se conseguían cuando una isla sobresalía de la cota de agua y que podrían ser causados por las fluctuaciones del nivel de agua, y propuso que el thalweg del canal pueda ser utilizado para medir el índice de trenzado para el punto aguas arriba del elemento (divergencia) hasta la condición aguas abajo (convergencia). El parámetro de entrelazamiento (PE) entregado por Rust (1978) fue medido de la siguiente manera (Figura 12).

$$PE = \frac{\sum Lb}{Lm}$$

Donde, Lb es la distancia entre los puntos de convergencia y divergencia de un elemento sedimentado como puede ser una barra o isla, siempre y cuando se encuentre ubicada en el interior del río. En cambio, Lm es la longitud del valle para el canal delimitado por ambos márgenes extremos.

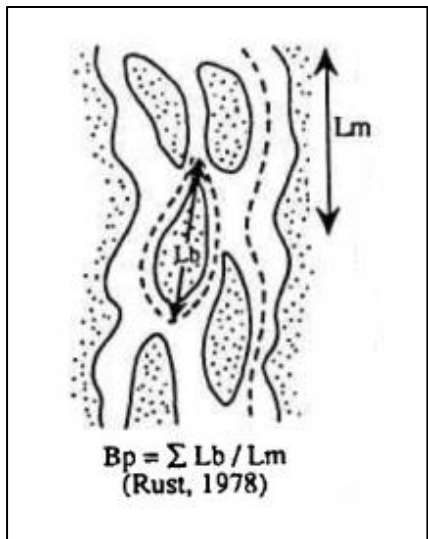


Figura 12: Índice de entrelazamiento según Rust (1978). Fuente: Friend y Sinha. 1993.

Tabla 2: Clasificación de los tipos de cauces. Fuente: Miall (1977)

Tipo de cauce	Morfología	Sinuosidad	Tipo de carga	Tipo de acción erosiva	Tipo de sedimentación
Rectilíneo	Un sólo cauce con poza y rápidos, talweg meandrante	<1,05	En suspensión mixta o carga de fondo	Ensanchamiento e incisión del cauce menor	Barra oblicuas y longitudinales
Ligeramente sinuoso	Un sólo cauce, pozas y rápidos. talweg meandrante	>1,05 <1,5	Mixta	Ensanchamiento e incisión del cauce menor	Barra oblicuas
Meandriforme	Un sólo cauce	>1,50	En suspensión o carga mixta	Incisión del cauce, ensanchamiento del meandro	Formación de barra puntual
Trenzado	Dos o más cauces con barras y perímetro inestable	>1,3	Carga de fondo	Ensanchamiento del cauce	Acumulación en el cauce y formación de barras centrales y diagonales
Anastomosado	Dos o más cauces con grandes islas estables	>2	Carga en suspensión	Lento ensanchamiento del meandro	Lenta acreción del margen

Los resultados de las variables planimétricas serán clasificadas según los parámetros indicados en la Tabla 2 donde se interpretarán el resultado en las dimensiones obtenidas por las imágenes satelitales el tramo de las instalaciones de las centrales hidroeléctricas en el río Biobío.

V Resultados

Los resultados demostraran si es que los cambios morfológicos acelerados provienen de las instalaciones de centrales hidroeléctricas, es decir, que la gran causa de los cambios observados es por razones antrópicas, y que se agrega a factores producido por el cambio climático.

Aun siendo varias las razones antrópicas, se debe verificar las principales causas para lograr identificar cuáles son las de mayor importancia y donde se debería formular en primera instancia una estrategia, de manera tal que se mitigue o remediar aquellos cambios que repercuten en la ciudadanía

Se desarrollará algunos tipos de mapas temáticos donde se encuentren las centrales hidroeléctricas a trabajar en la investigación, y luego se elaborará mapas en base a los mapas temáticos realizados anteriormente de las variables mencionadas en la metodología donde reflejen el estado del canal en el área de estudio, observando aspectos físicos en el modelo digital, además de proyectar los efectos del cambio climático. A fin de cuentas, el mayor factor para observar los cambios es a través de escala de tiempo en años, es decir, en las diferencias a través de los años, captando cuales han sido la razón de aquellos cambios encontrados. A su vez, se dará a conocer por medio de gráficos en rango numérico para representar en una fase de muestras, el impacto de aquellos cambios geomorfológicos en los canales analizados. Se tomará la parte de talweg del río como referencia de la forma que presenta el tramo.

Luego se zonificará las áreas con mayores cambios, es decir, en sectores en que exista impactos de daños irreparables, tomando en cuenta la normativa en estos casos de grandes transformaciones, los cuales deben considerar las exigencias mínimas como parámetros en que constituya la existencia de una falta a la norma.

5.1 El Índice de Calidad Morfológica de monitoreo

En el caso del MQIm se interpretan como los patrones comunes que se deben realizar un seguimiento para su análisis, y luego usar las variables nombradas en el método. Por ello, la interpretación y la delimitación del área son de vital importancia para manifestar los puntos georreferenciados y el tramo (Figura 3A) que se procederá a usar las variables según corresponda en el mapa. Tomando en cuenta las imágenes satelitales a trabajar y observar a escala tiempo las diferencias a macro escala y analizar dentro del tramo y acotar el estudio tanto escala como en el tiempo, trabajando a su vez por estaciones. Esto indicaran cuales son los cambios en detalle aguas abajo.

5.2 Variables planimétricas

En la figura 13 se muestra el modelo aplicado en el programa Arcgis 10.3 con el propósito de realizar los diferentes mapas temáticos y aplicar las variables según los objetivos específicos. En el proceso de mapas se utiliza geoprocetos. Esta herramienta se encuentra dentro del programa mencionado anteriormente y con ello entrega el mapa que se requiere.

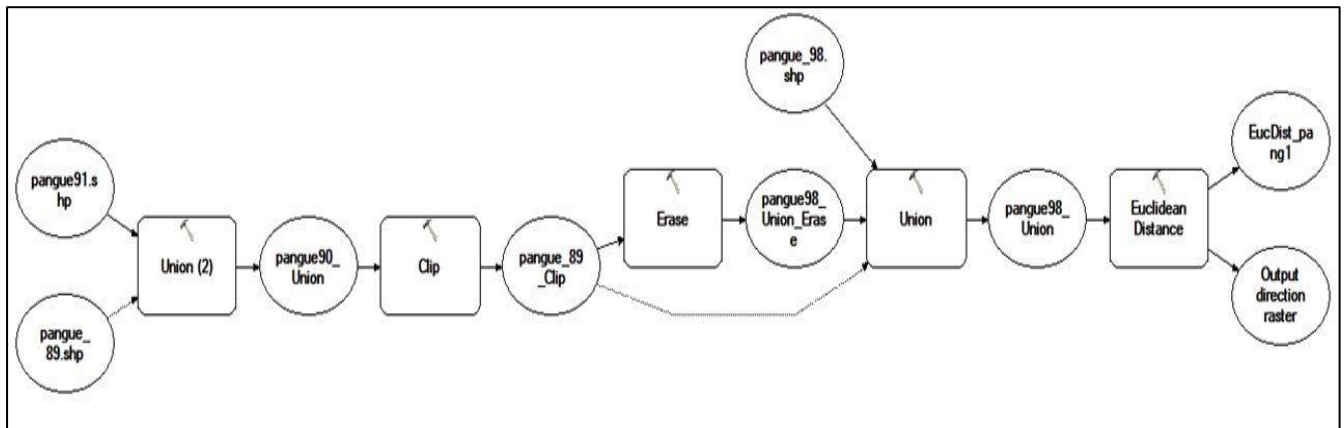


Figura 13: Modelo en Arcgis10.3. Fuente: Elaboración propia

En el modelo se utilizaron geoprocursos como Union, Recorte, Borrar y por último una herramienta de análisis espacial como la Distancia Euclidiana. Los geoprocursos facilitaron el tratamiento de mapas, ya que se utilizó imágenes de Pangue en los años 89, 91 y 98. Con estas imágenes se georreferenciaron para luego formar distintas capas, demostrando de mejor manera las diferencias en formas de líneas y lo más importante, calculando cuanta distancia fue el cambio que surgió a través de los años. Finalmente se utilizó la Distancia Euclidiana para segmentar líneas de área de estudio, es decir, cercana a cada central hidroeléctrica, obteniendo los indicadores necesarios para las variables planimétricas. Ese modelo se replicó en los años referentes a las etapas de inicio y término de las centrales, con la diferencia que en la central Ralco y Angostura hubo mayor cantidad de imágenes y transformaciones a pequeña escala.

5.2.1 Desplazamiento lateral y Ancho promedio

Para abordar el desplazamiento lateral y el ancho promedio se utilizó las herramientas del programa Arcgis, elaborando un modelo que se observa en la figura 14. Dicho modelo facilitó en los resultados y su interpretación dando como resultado mapas en el tramo del río analizado los cambios a simple vista y donde se tomó en cuenta tres años: 1998; 2005 y 2018 para demostrar sus transformaciones. Cada año es relevante, no obstante, se dio a conocer los hitos que pueden mostrar de mejor manera los cambios a través de los años. En 1989 aun no existían construcciones de centrales hidroeléctricas, luego en 2005 ya existe una central (Pangue) y terminando una segunda central (Ralco) y por último el año 2018 es ver la imagen más actual del río Biobío.

Con respecto a la figura 16 se observa el cauce del río y como ha sido su desplazamiento a través de los años desde las primeras imágenes satelitales y compararlas con el año más reciente, es decir, el año 2018. Estos cambios se demuestran tanto en el mapa como datos en el cual se observa el desplazamiento y el ancho promedio que ha sido transformado de forma acelerada. Incluso, se toma en cuenta las variables de sinuosidad de manera tal que se compruebe la transformación del río, como el caso de ser un tipo rectilíneo.

En promedio de las primeras secciones del área delimitada del río, ha disminuido en promedio unos 98 metros, desde el año 1998 hasta 2018, y ha sufrido un desplazamiento de tipo migratoria lateral en la planicie de inundación, el cual pierde potencia del tanto caudal como de la energía hidráulica, el cual desde sus inicios el río se clasificaba como un río trezado.

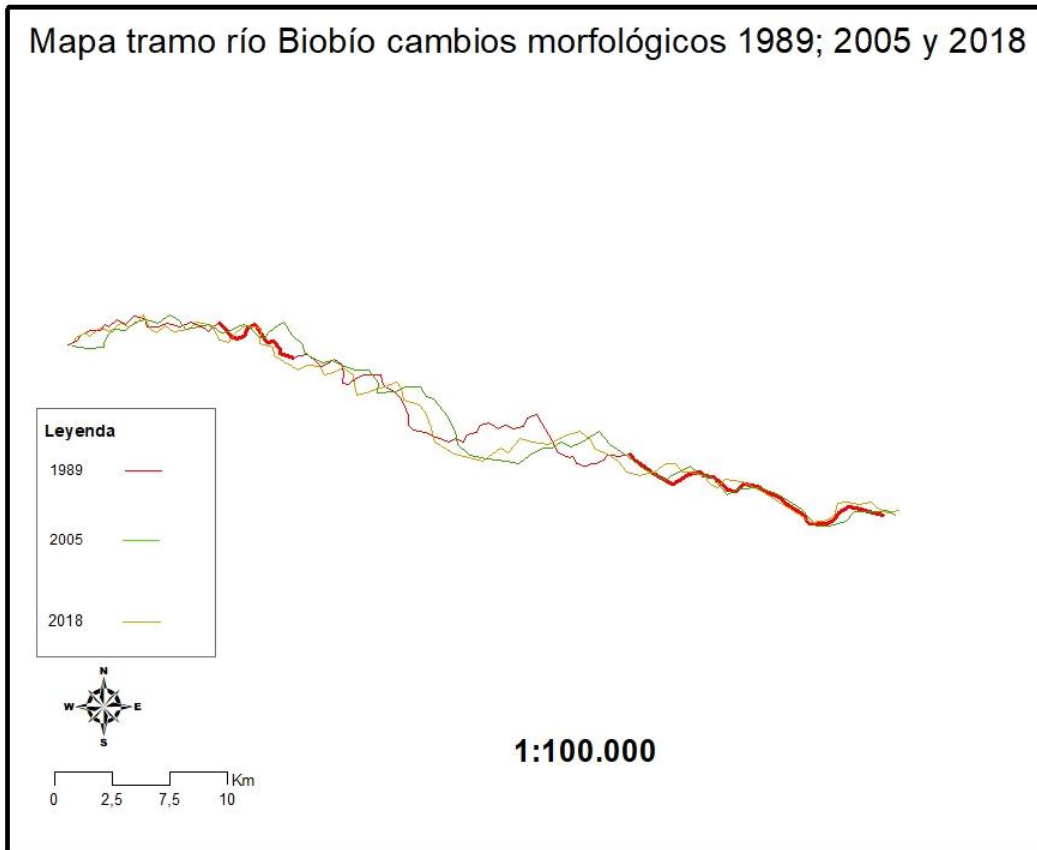


Figura 14: Mapa cambios morfológicos de los años 1989; 2005 y 2018. Fuente: Elaboración propia

Continuando con los análisis, las proyecciones arrojaban en que iba a disminuir aún más el ancho promedio del río entre los años 2005-2018 y se observa que los cambios se han mantenido con respecto al año 2005 que no tuvo grandes transformaciones. Esto se debe que los cambios naturales han tomado su curso a una velocidad normal, el cual ayuda a que los cambios sean más regulares y a largo plazo, con el fin que no causen transformaciones aceleradas.

5.2.2 Sinuosidad

En la variable sinuosidad se demuestra los cambios que han tenido en los años iniciales propuestas en la investigación, el cual se ha mantenido sin grandes transformaciones desde del año 2001, este se debe en que se ha modificado el uso de la cuenca y la intervención con la construcción de represas lo que forma diferencia de datos en la variable a través de los años. Los resultados indican que los cambios no alcanzaron el mínimo ($S=1,05$) del parámetro establecido por Miall (1977) mostrado en la tabla 2, por lo que el río tiene una categoría rectilínea.

A continuación, en los siguientes gráficos 1, 2 y 3, el Índice de Sinuosidad (IS) empieza con un crecimiento y luego se regula y permanece estable hasta los últimos años del análisis. Luego de obtener los resultados (Anexo 5) se interpretó disminución en la potencia y carga de en toda el área de estudio, principalmente desde el año 2004, ya que el año mencionado se da a la segunda central en la cuenca del Biobío.

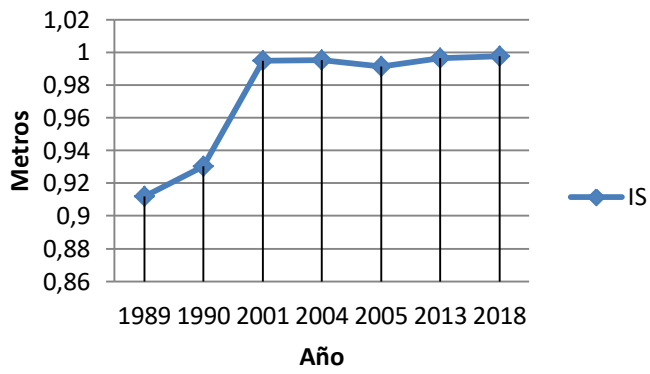


Gráfico 1: Índice de Sinuosidad a escala tiempo. Fuente: Elaboración propia

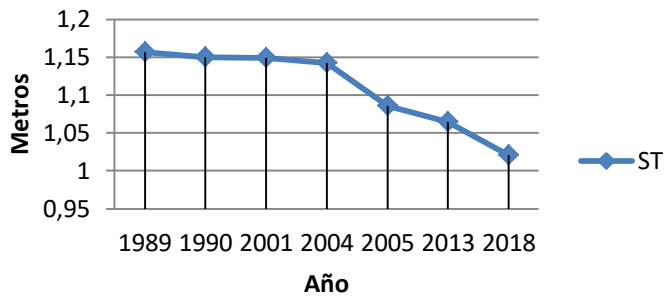


Gráfico 2: Sinuosidad total a escala tiempo. Fuente: Elaboración propia

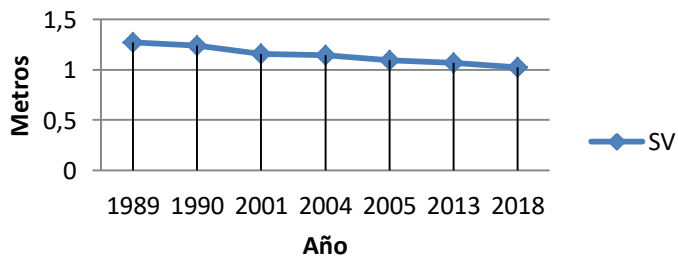


Gráfico 3: Sinuosidad del valle a escala tiempo. Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Trenzado

Para observar el río de cauce trenzado, donde posee varios canales y brazos que se entrelazan y separan dentro del cauce principal debido a cambios de pendiente longitudinal y transversal, se debe analizar el tramo del área de estudio (Figura 3A) en sectores demostrada en la figura 15, que en conjunto a la variable de desplazamiento y ancho promedio se determinó los sectores con mayores cambios visibles y donde se identifican áreas con trenzado y luego analizar a una escala 1:50.000 y analizar en profundidad aquellos cambios esperados en los años de inicio y termino de cada central hidroeléctrica.

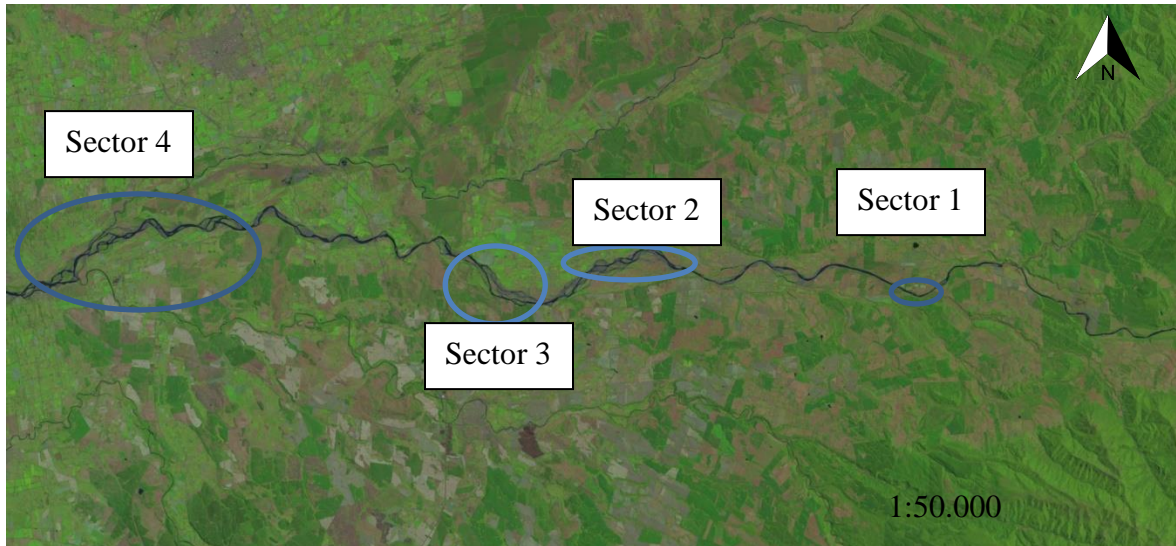


Figura 15: Área de estudio sectorizados. Fuente: Elaboración propia

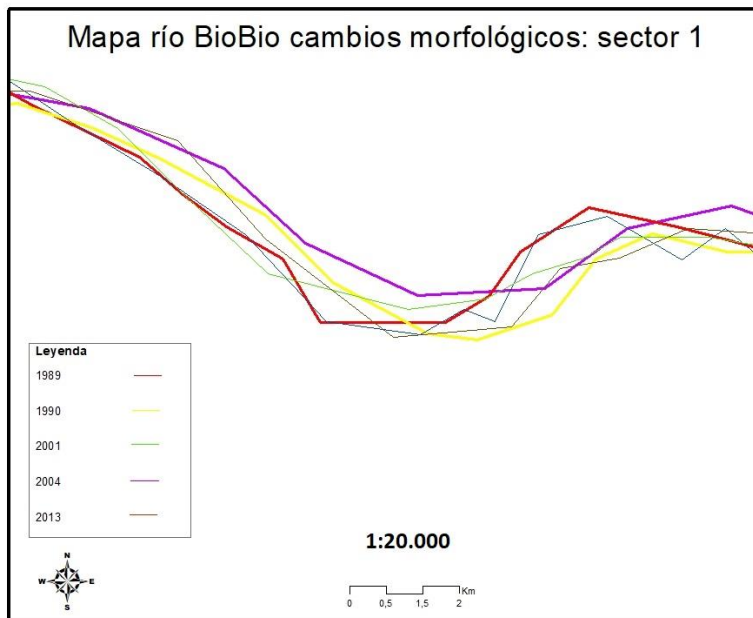


Figura 16: Cambio morfológico sector 1. Fuente: Elaboración propia

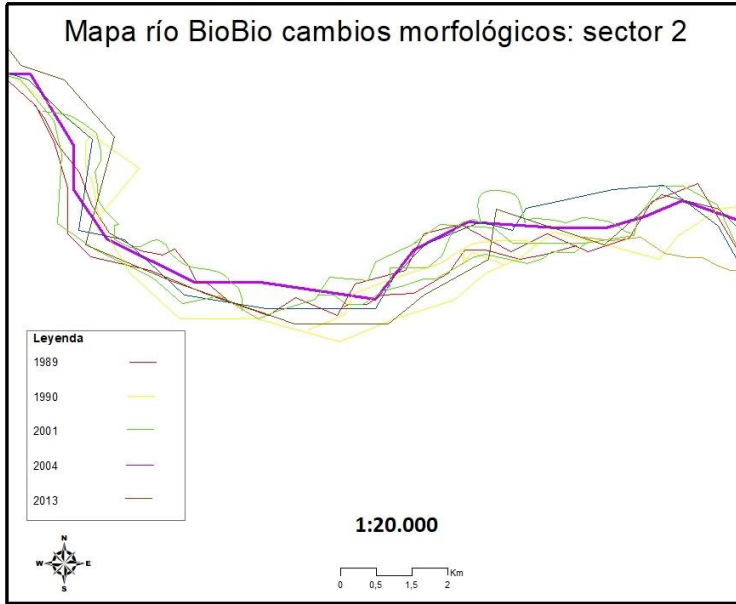


Figura 17: Cambio morfológico sector 2. Fuente: Elaboración propia

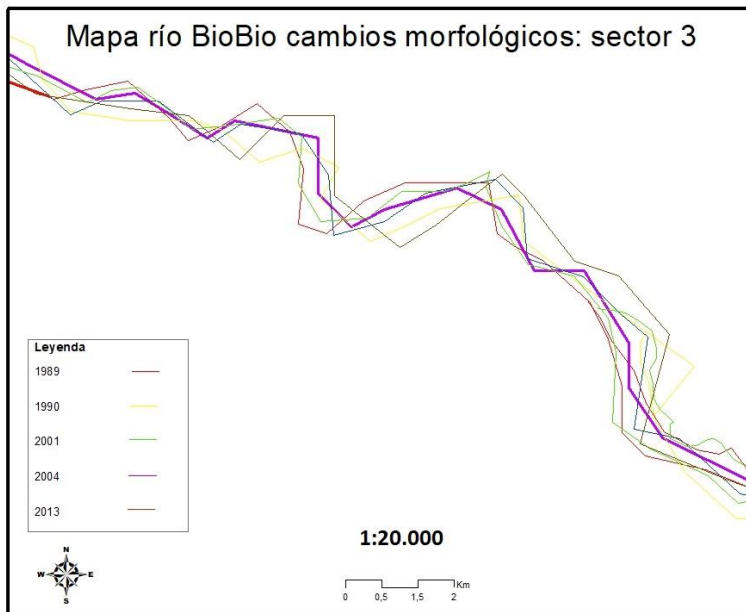


Figura 18: Cambio morfológico sector 3. Fuente: Elaboración propia

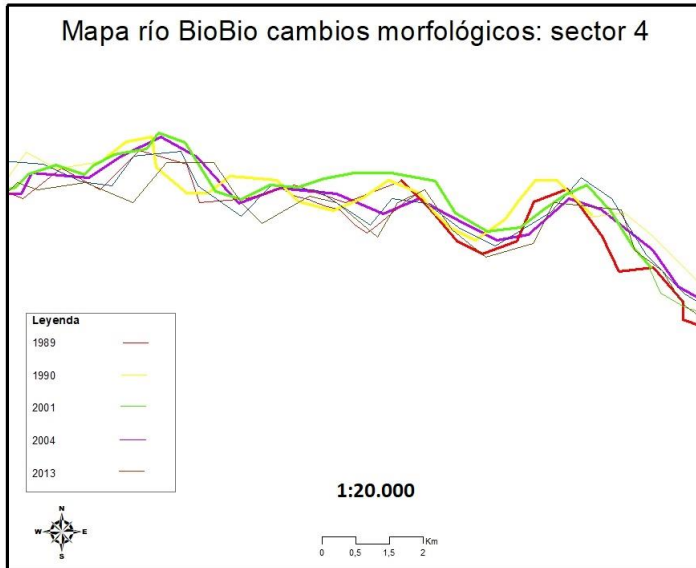


Figura 19: Cambio morfológico sector 4. Fuente: Elaboración propia

En los mapas de trenzado demuestran en cada sector los cambios a una escala más acotada y con ello profundizar el análisis en la variable de trenzado. Los valores de sinuosidad son relevantes para este análisis, ya que se deben clasificar es sectores de meandros regularizados inferiores a 1.5.

Si sólo se consideran los tramos meandriformes, el índice de entrelazamiento muestra una baja sinuosidad y que el río tiene la forma de una sola línea de conducción, ya que el parámetro de $PE=0.15$ (Conesa. 1992) que es el límite para determinar las zonas que han aumentado la cantidad de islas dentro del río, demostrado en la figura 20 inferidos por los resultados de la fórmula de PE que se encuentra en el anexo 6.

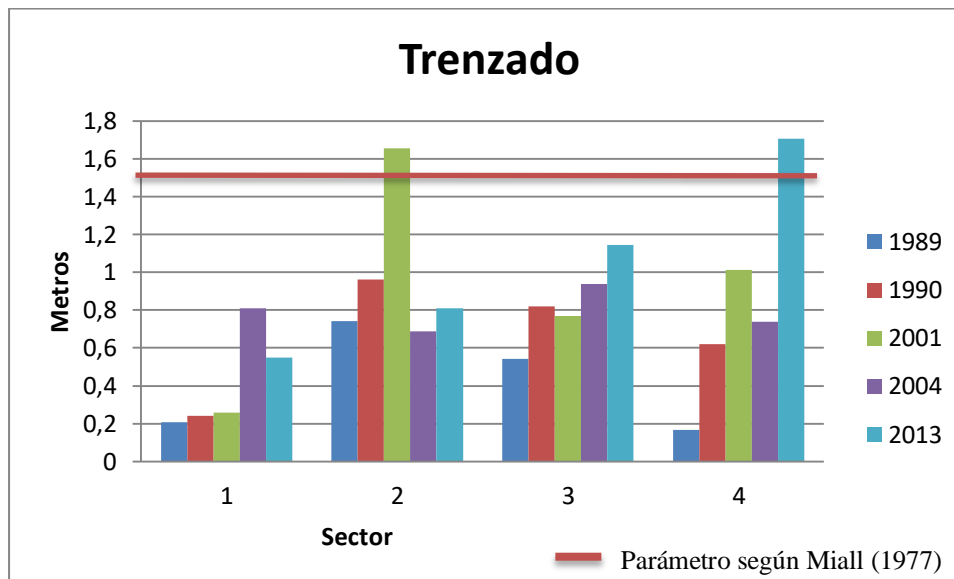


Figura 20: Sectores del tramo del río delimitado con variable trenzado en escala tiempo. Fuente: Elaboración propia

5.2.4 Variación temporal de MQIm

Tomando en cuenta que según datos de Santana (2007 y 2015) y los parámetros según Miall (1977) mencionados en la Tabla 2, se obtuvo en el tramo del área de estudio una clasificación de cauce tipo rectilíneo. En la figura 10 se muestra la clasificación del río Biobío según Leopold y Wolman (1957).

Los ríos rectilíneos de baja pendiente son aquellos cauces que se caracterizan por presentar canales amplios y poco profundos, en los que durante los períodos aguas bajas se observan múltiples cursos que se bifurcan y reagrupan entorno a barras o islas. En general, se definen como cursos de agua de múltiples canales y baja sinuosidad (Sánchez y Sopeña, 2010).

Por último, el gráfico 4 se demuestra la tendencia de aumento en correlación de las variables entre sinuosidad y trezado, el cual aumenta considerablemente en los últimos años.

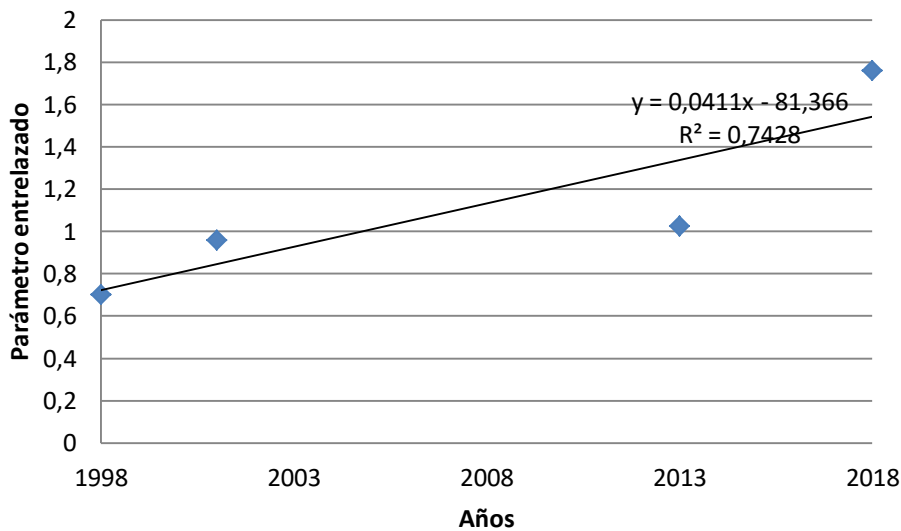


Gráfico 4: Variación temporal del parámetro entrelazado en el río Biobío, según Rust (1978). Fuente: Elaboración propia

VI. Discusión y Conclusiones

Los resultados entregan importantes descubrimientos y a su vez confirman los objetivos propuestos en el trabajo. Se da por hecho que existen cambios morfológicos, y cabe destacar que los cambios son de forma natural y con períodos extensos, lo que se ratifica con los gráficos de sinuosidad donde el crecimiento de los indicadores proyectaba que el tramo analizado cambiara su forma a un tipo meandro en el largo plazo. Sin embargo, las construcciones y el uso antrópico dieron como resultado un río con baja sinuosidad y de forma rectilínea, perdiendo notoriamente las propiedades de la llanura que se encontraba desde el comienzo de los años analizados.

El análisis por estaciones comparado con los años anteriores indica que el impacto a gran escala fue entre los años 1998 y 2004, ya que las variables planimétricas como desplazamiento y ancho promedio dan por resultado una disminución del cauce del río promedio entre 58,3m y 98m de longitud. Por otro lado, no se desplazó de forma significativa el tramo analizado.

La variable de sinuosidad no arrojó cambios de alto impacto, sin embargo, se observó claramente cómo se mantuvo su índice de sinuosidad desde el 2004 hasta los años actuales. Esto se debe con no existen variaciones naturales en las entradas de agua, y esto se debe a la regulación por parte de las represas instaladas en la cuenca.

En cuanto a la variable de trenzado, los cambios en cada sector del río (Figura 17), si bien no cambia su curso, es probable que el sedimento transportado se acumule, en este caso en la sección 4, ya que no tiene la fuerza suficiente para mover la materia erosionada aguas arriba, con ello se proyecta a largo plazo que pueda causar un impacto mayor en esa área y la zona de desembocadura de del río, incluso puede que cambie los compuestos fisicoquímicos en la zona agua abajo, debido a las variables físicas que se observan.

Se logró desarrollar una caracterización de la morfología en el tramo delimitado en el sector medio del río Biobío. Por medio de las imágenes satelitales y parámetros morfológicos se comprobó que en el tramo estudiado está sometido a una transformación de tipo rectilíneo, según el criterio de Leopold & Wolman (1957). Sin embargo, el tramo estudiado tiende a formar como principal propiedad bancos de deposición alternos, característicos de los cursos meándricos

Puede concluirse en este punto que las centrales hidroeléctricas que utilizan embalses y las que operan con la cantidad necesaria de agua, suponen una intervención en el cauce natural de los ríos lo que afecta las corrientes de los mismos que sufren de diversos cambios, los cuales pueden afectar posteriormente a la comunidad que vive en las cercanías del río.

Es por esta razón que se deben regularizar los proyectos, ya que saber cómo se afectarían los cambios naturales de una cuenca y observar si el impacto puede ser reversible dependiendo del grado de daño que pueda causar, puede mitigar los posibles cambios morfológicos y no alterar de forma abrupta el curso natural de un río. Actualmente se regula el uso del agua y las emisiones que pueden ser encontradas en el río, desafortunadamente no existen normas como tal para determinar los parámetros del impacto de los cambios producto de las instalaciones de centrales, lo que genera dificultad a la hora de proponer alguna medida de mitigación para que los cambios morfológicos puedan producirse de forma natural y a largo plazo, evitando los cambios radicales, sin embargo, se encuentra una guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas realizada por el SEIA, el cual se enfoca principalmente en dar un mayor resguardo a las especies existentes en el área a construir, y generar el menor impacto posible.

Finalmente se debe considerar realizar un seguimiento del estudio en escala tiempo y observar el comportamiento de los cambios morfológicos, de manera en que se pueda monitorear los cambios y medir los efectos, dando cuenta que aquellos cambios puedan ser de forma natural. Logrando una remediación a largo plazo y no agregar impactos en gran parte de la cuenca y de su sistema fluvial.

VII. Referencias Bibliográficas

- Camporeale, C., Perona, P., Porporato, A., Ridolfi, L., 2005. On the long-term behavior of meandering rivers. *Water Resour. Res.* 41 (12).
- Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sens. Environ.* 113 (5), 893–903.
- Conesa C. 1992. Trazados de baja y alta sinuosidad en ríos españoles. Departamento de Geografía. Universidad de Murcia.
- Charlton R. 2007 *Fundamentals of fluvial geomorphology*
- ESRI, 2015. ArcGIS Version 10.4.1. Environmental System Research Institute, Redlands, CA, USA.
- Fapeng L, Chesheng Z, Zongxue X, Shanshan J, Jun X. Remote sensing monitoring on regional crop water productivity in the Haihe River Basin. Development Research Center, Ministry of Water Resources. Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing, China 2013.
- Ferguson, R.I., 1981. Channel form and channel changes. In: J. Lewin (ed.), *British Rivers*. Allen & Unwin, London, pp. 90–125.
- González J.E. y L. Montoya. 2010. Propuesta metodológica para el análisis morfo-sedimentológico en cuencas altamente urbanizadas. caso de estudio quebrada doña maría. *Revista ingenierías universidad de Medellín*. Colombia.
 - Gurnell, A.M., 1997. Channel change on the River Dee meanders, 1946–1992, from the analysis of air photographs. *Regul. Rivers Res. Manag.* 13 (1), 13–26
 - Leopold L y Wolman M. River channel patterns: braided, meandering and straight. *US Geol. Surv. Prof. Paper*, 282-B 85pp. 1957
 - Meyer-Peter, E., & Müller, R.. Formulas for bed-load transport. In *IAHSR 2nd meeting*, Stockholm, appendix 2. IAHR. 1948
 - Nanson, G.C., Croke, J.C. Una clasificación genética de las llanuras de inundación. *Geomorfología* 4 (6), 459–486. 1992
 - Ortega, J.A., Razola, L., Garzón, G., 2014. Recent human impacts and change in dynamics and morphology of ephemeral rivers. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14 (3), 713–730.
 - Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussetini, M., 2013. A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: the Morphological Quality Index (MQI). *Geomorphology* 180, 96–108.
 - Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, N., Bussetini, M., Gurnell. Guidebook for the evaluation of stream morphological conditions by the Morphological Quality Index (MQI). ISPRA. 2016

- Sánchez, Y. y Sopeña, A. Sistemas aluviales de baja sinuosidad. En: Arche, Alfredo (Ed.). Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Madrid, España, Consejo superior de investigaciones científicas, 2010. pp. 225-259.
- Schumm, S.A. River Adjustment to altered Hydrologic Regimen: Murrumbidgee River and Palaeochannels, Australia. United States Geological Survey Professional Paper 598. 1968
- Surin N, Rinaldi M. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. Received 2 February 2002; received in revised form 19 July 2002; accepted 21 July 2002
- Tarbuck E y Lutgens L. Ciencias de la Tierra. 2009
- Wheaton J, Brasington J, Darby S. and Sear D. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. Department of Watershed Sciences, Utah State University. Institute of Geography & Earth Sciences, Aberystwyth University, Aberystwyth. School of Geography, University of Southampton, Highfield, Southampton. USA, 2009
- Yang, X., Damen, M. C. J., & Zuidam, R. A. V. . Satellite remote sensing and GIS for the analysis of channel migration changes in the Active Yellow River Delta, China. Journal of Applied Geomorphology, 1(2), 146–157. 1999

VIII. Anexos

Anexo 1 Efecto de impacto ambiental para proyectos

Debido a cambios en el uso del suelo (por la implantación de todo tipo de instalaciones de energía) o a cambios en los ecosistemas.

En el caso de los embalses transforman un sistema de aguas corrientes en un sistema de aguas lentas o semi-lacustre, lo que incide en procesos fisicoquímicos y geobiocénóticos que se desarrollan a lo largo de los ríos, pero a la vez se generan nuevos biotopos con unas condiciones ambientales relativamente estables. Permiten el mantenimiento de humedales y dan estabilidad a las condiciones de los ríos aguas abajo. En España, país sin lagos naturales de importancia, los embalses constituyen una alternativa a estos ecosistemas, existiendo ejemplos significativos de su integración en el medio natural.

Por otro lado, en la generación hidráulica influye en la eutrofización de las masas de agua de forma mínima. El responsable principal es el aporte en exceso de fosfatos y nitrógeno a través del vertido de aguas residuales no depuradas aguas arriba del embalse, el uso excesivo de abonos y regadío, la actividad ganadera intensiva en la cuenca del río. Mediante una gestión ambiental adecuada de los usos y vertidos de la cuenca se pueden solucionar o mitigar la intensidad de la eutrofización en el ecosistema acuático y sus efectos sobre la calidad del agua del embalse. Para evitar la eutrofización del embalse se realizan las actuaciones correspondientes (oxigenación, estudios limnológicos, limpieza de lecho).

Anexo 2: Métodos específicos de evaluación de impacto ambiental

1 Reuniones de Expertos

Consisten en consultas a un grupo de expertos familiarizados con un proyecto o con sus tópicos especializados, permitiendo identificar una amplia gama de impactos y establecer medidas de mitigación. Su ventaja radica en la falta de formalidad y la facilidad para adaptar la evaluación a las circunstancias específicas de una acción. Sin embargo, se requiere formar equipos particulares para cada tipo de proyecto, lo cual no siempre conlleva un panel representativo en los temas; se recomienda usarlo sólo cuando se trata de estudiar un impacto muy concreto y circunscrito.

2 Listas de Chequeo o Verificación

Comprenden una lista de factores ambientales que son potencialmente afectados por una acción humana. Las listas de chequeo son exhaustivas y permiten identificar rápidamente los impactos. Son de gran utilidad para la etapa inicial de la EIA, asegurando que impactos relevantes no sean omitidos y contribuyendo a una fácil comparación entre las distintas alternativas. Son algo rígidas, pues no permiten establecer un orden de relevancia de los impactos y localizarlos espacialmente.

3 Diagramas de Flujo

Establecen relaciones de causalidad entre la acción y los impactos primarios. Si bien son relativamente fáciles de construir para impactos simples, se complican rápidamente con proyectos de más actividades o número de variables afectadas. Como metodologías de EIA, los diagramas de flujo son estrictamente complementarios con otras metodologías.

4 Cartografía Ambiental o Superposición de Mapas

Esta metodología, diversos mapas que establecen impactos singulares sobre una región son sobrepuestos para obtener una visión general de ellos. Los mapas permiten identificar e incluso cuantificar un valor relativo a cada impacto. Es muy útil cuando existen variaciones espaciales de los impactos, siendo particularmente útiles para evaluar alternativas en proyectos como carreteras o líneas de transmisión. Sin embargo su mayor limitación es que solamente considera impactos que están relacionados espacialmente, dejando elementos relevantes de la EIA de lado.

5 Redes

Son diagramas de flujo ampliados a fin de incorporar impactos de largo plazo que contribuyen a visualizar un resumen global de éstos en un proyecto, con sus interacciones. No obstante, no permiten estimar la relevancia de un impacto en particular y cuando la red es muy densa se genera dificultad para interpretar la información.

6 Matrices Causa – Efecto

Consisten en tablas de doble entrada, donde en la primera columna se consideran las variables ambientales y en la fila número uno las actividades o etapas del proyecto. En las intersecciones de las filas y columnas se identifican los impactos correspondientes. Su uso es simple y puede materializarse con una pequeña recolección de datos, pero requiere de conocimiento del área afectada y de la naturaleza del proyecto. Es de gran utilidad si se intenta identificar el origen de ciertos impactos, pero tienen limitaciones al realizar consideraciones espaciales.

7 Matriz de Leopold

La Matriz de Leopold es un tipo de matriz causa-efecto desarrollada en la década de 1970 para ser aplicada en proyectos de construcción. Considera 100 acciones que pueden causar impactos y 88 factores ambientales, lo cual entrega un total de 8800 celdas a rellenar. El gran número de variables hace que su utilización sea complicada, quedando muchas veces grandes espacios sin rellenar en la matriz. Otras limitaciones son que no se aplican a cada proyecto todas las acciones y que en determinados proyectos las interacciones no están señaladas en la matriz, perdiéndose la identificación de ciertos impactos.

Debido a estas complejidades, se ha disminuido la utilización de esta matriz, efectuándosele diversos ajustes para acercarla a cierto tipo de proyectos; por ejemplo, la Matriz de las grandes Presas confeccionada por la International Commission of Large Dams (ICOLD).

8 Método de Batelle

El método de Batelle (1972) fue especialmente diseñado para evaluar impactos relacionados con recursos hídricos, sin embargo puede ser utilizado igualmente en otros tipos de proyectos. Corresponde a una lista de verificación con

escalas de ponderación, en la cual las variables ambientales son ordenadas en 4 categorías, 17 componentes y 78 parámetros. La importancia relativa de cada variable es obtenida a través de un grupo de expertos y considerando la opinión de los actores involucrados.

La principal ventaja del método es que está sistematizado para la comparación de alternativas. Sin embargo, la lista de indicadores es limitada y arbitraria, sin tener en cuenta las relaciones entre componentes ambientales o las interacciones causa-efecto.

Anexo 3: Leyes

C.1 Ley Número 20.257

Introduce modificaciones a la Ley General de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales.

Proyecto de Ley:

"Artículo único.- Introdúcense en el decreto con fuerza de ley N° 4, de 2007, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, que fija el texto refundido, coordinado y sistematizado del decreto con fuerza de ley N° 1, de 1982, del Ministerio de Minería, que contiene la Ley General de Servicios Eléctricos, las siguientes modificaciones:

1) Intercálase en el inciso primero del artículo 79°, entre las expresiones "generación" y "conectados", las siguientes oraciones: "renovable no convencionales y de las instalaciones de cogeneración eficiente, definidos en las letras aa) y ac) del artículo 225° de esta ley, que se encuentren", y sustitúyense las oraciones "cuya fuente sea no convencional, tales como geotérmica, eólica, solar, biomasa, mareomotriz, pequeñas centrales hidroeléctricas, cogeneración y otras similares determinadas fundadamente por la Comisión," por la expresión "y".

2) Agrégase, a continuación del artículo 150°, el siguiente artículo 150° bis:

"Artículo 150° bis.- Cada empresa eléctrica que efectúe retiros de energía desde los sistemas eléctricos con capacidad instalada superior a 200 megawatts para comercializarla con distribuidoras o con clientes finales, estén o no sujetos a regulación de precios, deberá acreditar ante la Dirección de Peajes del CDEC respectivo, que una cantidad de energía equivalente al 10% de sus retiros en cada año calendario haya sido inyectada a cualquiera de dichos sistemas, por medios de generación renovables no convencionales, propios o contratados.

La empresa eléctrica podrá también acreditar el cumplimiento de la obligación señalada en el inciso primero, mediante inyecciones de energía renovable no convencional realizadas a los sistemas eléctricos durante el año calendario inmediatamente anterior, en la medida que dichas inyecciones no hayan sido acreditadas para el cumplimiento de la obligación que correspondió a ese año.

Cualquier empresa eléctrica que exceda el porcentaje señalado en el inciso primero de inyecciones de energía renovable no convencional dentro del año en que se debe cumplir la obligación, con energía propia o contratada y aunque no hubiese efectuado retiros, podrá convenir el traspaso de sus excedentes a otra empresa eléctrica, los que podrán realizarse incluso entre empresas de diferentes sistemas eléctricos. Una copia autorizada del respectivo convenio deberá entregarse a la Dirección de Peajes del CDEC respectivo para que se imputen tales excedentes en la acreditación que corresponda.

La empresa eléctrica que no acredite el cumplimiento de la obligación a que se refiere este artículo al 1 de marzo siguiente al año calendario correspondiente, deberá pagar un cargo, cuyo monto será de 0,4 UTM por cada megawatt/hora de déficit respecto de su obligación. Si dentro de los tres años siguientes incurriese nuevamente en incumplimiento de su obligación, el cargo será de 0,6 UTM por cada megawatt/hora de déficit. 55

Sin perjuicio de lo anterior, cualquier empresa eléctrica deficitaria podrá, con un límite de 50%, postergar hasta en un año la acreditación de la obligación que le corresponda al término de un año calendario, siempre que lo haya comunicado a la Superintendencia antes del 1 de marzo siguiente al año calendario referido.

Las Direcciones de Peajes de los CDEC de los sistemas eléctricos mayores a 200 megawatts deberán coordinarse y llevar un registro público único de las obligaciones, inyecciones y traspasos de energía renovable no convencional de cada empresa eléctrica, así como de toda la información necesaria que permita acreditar el cumplimiento de las obligaciones y la aplicación de las disposiciones contenidas en este artículo.

Los cargos señalados en el inciso cuarto se destinarán a los clientes finales y a los clientes de las distribuidoras cuyos suministros hubieren cumplido la obligación prevista en el inciso primero de este artículo.

Las sumas de dinero que se recauden por estos cargos, se distribuirán a prorrata de la energía consumida por los clientes indicados en el inciso anterior durante el año calendario en que se incumplió la obligación del inciso primero.

La Dirección de Peajes del CDEC respectivo calculará y dispondrá tanto el pago de los cargos que cada empresa deberá abonar para que se destinen a los clientes aludidos en base a los montos recaudados de las empresas que no hubiesen cumplido la obligación, así como las transferencias de dinero a que haya lugar entre ellas. La Superintendencia deberá requerir a la Dirección de Peajes y a las empresas concernidas la información necesaria para fiscalizar el cumplimiento de las obligaciones que se les impone en este inciso.

Toda controversia que surja en la aplicación del inciso anterior con la Dirección de Peajes del CDEC respectivo promovida por las empresas eléctricas sujetas a la obligación prevista en el inciso primero o por las distribuidoras y

clientes finales, será dictaminada por el panel de expertos, organismo que deberá optar por uno de los valores propuestos por quien promueve la discrepancia o por la referida Dirección, entendiéndose que ésta se formaliza en las presentaciones que deberán realizar al panel, en sobre cerrado, dentro de los quince días siguientes al cálculo efectuado por la Dirección de Peajes. Para expedir el dictamen respectivo, el aludido Panel deberá ceñirse al procedimiento aplicable a las discrepancias previstas en el número 11 del artículo 208°.

Sólo para los efectos de la acreditación de la obligación señalada en el inciso primero, se reconocerán también las inyecciones provenientes de centrales hidroeléctricas cuya potencia máxima sea igual o inferior a 40.000 kilowatts, las que se corregirán por un factor proporcional igual a uno menos el cociente entre el exceso sobre 20.000 kilowatts de la potencia máxima de la central y 20.000 kilowatts, lo que se expresa en la siguiente fórmula:

$$FP = 1 - ((PM - 20.000 \text{ kw}) / 20.000 \text{ kw})$$

Donde FP es el factor proporcional antes señalado y PM es la potencia máxima de la central hidroeléctrica respectiva, expresada en kilowatts."

3) Suprímese el inciso quinto del artículo 157°.

4) Agréganse, en el artículo 225°, a continuación de la letra z), las siguientes letras aa), ab) y ac):

"aa) Medios de generación renovables no convencionales: los que presentan cualquiera de las siguientes características: 56

1) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de la biomasa, correspondiente a la obtenida de materia orgánica y biodegradable, la que puede ser usada directamente como combustible o convertida en otros biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos. Se entenderá incluida la fracción biodegradable de los residuos sólidos domiciliarios y no domiciliarios.

2) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía hidráulica y cuya potencia máxima sea inferior a 20.000 kilowatts.

3) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía geotérmica, entendiéndose por tal la que se obtiene del calor natural del interior de la tierra.

4) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía solar, obtenida de la radiación solar.

5) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía eólica, correspondiente a la energía cinética del viento.

6) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de los mares, correspondiente a toda forma de energía mecánica producida por el movimiento de las mareas, de las olas y de las corrientes, así como la obtenida del gradiente térmico de los mares.

7) Otros medios de generación determinados fundadamente por la Comisión, que utilicen energías renovables para la generación de electricidad, contribuyan a diversificar las fuentes de abastecimiento de energía en los sistemas eléctricos y causen un bajo impacto ambiental, conforme a los procedimientos que establezca el reglamento.

ab) Energía renovable no convencional: aquella energía eléctrica generada por medios de generación renovables no convencionales.

ac) Instalación de cogeneración eficiente: instalación en la que se genera energía eléctrica y calor en un sólo proceso de elevado rendimiento energético cuya potencia máxima suministrada al sistema sea inferior a 20.000 kilowatts y que cumpla los requisitos establecidos en el reglamento".

DISPOSICIONES TRANSITORIAS

Artículo 1° transitorio.- La obligación contemplada en el artículo 150° bis que esta ley incorpora a la Ley General de Servicios Eléctricos, regirá a contar del 1 de enero del año 2010, y se aplicará a todos los retiros de energía para comercializarla con distribuidoras o con clientes finales cuyos contratos se suscriban a partir del 31 de agosto de 2007, sean contratos nuevos, renovaciones, extensiones u otras convenciones de similar naturaleza.

El cumplimiento de la obligación referida deberá efectuarse con medios de generación renovables no convencionales o con los señalados en el inciso final del artículo 150° bis que introduce esta ley, propios o contratados, que se hayan interconectado a los sistemas eléctricos con posterioridad al 1 de enero de 2007.

También se podrá cumplir la obligación referida con medios de generación renovables no convencionales, que encontrándose interconectados a los sistemas eléctricos con anterioridad a la fecha señalada en el inciso precedente, amplíen su capacidad instalada de generación con posterioridad a dicha fecha y conserven su condición de medio de generación renovable no convencional una vez ejecutada la ampliación. Para los efectos de la acreditación de la obligación señalada, las inyecciones provenientes de los medios de generación referidos en este inciso, se corregirán

por un factor proporcional igual al cociente entre la potencia adicionada con posterioridad al 1 de enero del 2007 y la potencia máxima del medio de generación luego de la ampliación. 57

Con todo, la obligación aludida en el inciso primero será de un 5% para los años 2010 a 2014, aumentándose en un 0,5% anual a partir del año 2015. Este aumento progresivo se aplicará de tal manera que los retiros afectos a la obligación el año 2015 deberán cumplir con un 5,5%, los del año 2016 con un 6% y así sucesivamente, hasta alcanzar el año 2024 el 10% previsto en el artículo 150º bis.

El aumento progresivo dispuesto en el inciso anterior, no será exigible respecto de los retiros de energía asociados al suministro de empresas concesionarias de servicio público de distribución eléctrica, para satisfacer consumos de clientes regulados, que hubieren iniciado el proceso de licitación que dispone el artículo 131º de la Ley General de Servicios Eléctricos, con anterioridad a la publicación de esta ley.

Artículo 2º transitorio.- La Comisión Nacional de Energía, mediante resolución exenta, establecerá las disposiciones de carácter técnico que sean necesarias para la adecuada implementación de las normas que esta ley introduce a la Ley General de Servicios Eléctricos y para la aplicación de la disposición transitoria precedente.

Artículo 3º transitorio.- La obligación contemplada en el artículo 150º bis que esta ley incorpora a la Ley General de Servicios Eléctricos, regirá por 25 años a contar del 1 de enero del año 2010.

Artículo 4º transitorio.- Las empresas eléctricas deberán acreditar ante la Dirección de Peajes del CDEC respectivo que, a lo menos el cincuenta por ciento del aumento progresivo de 0,5% anual de la obligación, contemplado en el inciso cuarto del artículo primero transitorio, ha sido cumplido con inyecciones de energía de medios propios o contratados, elegidas mediante un proceso competitivo, transparente y que no implique una discriminación arbitraria".

C.2 Ley Número 20.017

Introduce modificaciones a la Ley Número 1.122 de la protección de las aguas y cauces.

Artículo 129 bis. Si de la ejecución de obras de recuperación de terrenos húmedos o pantanosos resultara perjuicio a terceros, las aguas provenientes de tales obras deberán ser vertidas al cauce natural más próximo. De no ser posible lo anterior, ellas serán vertidas a cauces artificiales, con autorización de sus propietarios, o a otros cauces naturales. En este último caso, deberá obtenerse autorización de la Dirección General de Aguas en conformidad al Párrafo 1º del Título I del Libro II de este Código.

Artículo 129 bis 1.- Al constituir los derechos de aprovechamiento de aguas, la Dirección General de Aguas velará por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente, debiendo para ello establecer un caudal ecológico mínimo, el cual sólo afectará a los nuevos derechos que se constituyan, para lo cual deberá considerar también las condiciones naturales pertinentes para cada fuente superficial.

El caudal ecológico mínimo no podrá ser superior al veinte por ciento del caudal medio anual de la respectiva fuente superficial.

En casos calificados, y previo informe favorable de la Comisión Regional de Medio Ambiente respectiva, el Presidente de la República podrá, mediante decreto fundado, fijar caudales ecológicos mínimos diferentes, sin atenerse a la limitación establecida en el inciso anterior, no pudiendo afectar derechos de aprovechamiento existentes. Si la respectiva fuente natural recorre más de una región, el informe será evacuado por la Comisión Nacional del Medio Ambiente. El caudal ecológico que se fije en virtud de lo dispuesto en el presente inciso, no podrá ser superior al cuarenta por ciento del caudal medio anual de la respectiva fuente superficial.

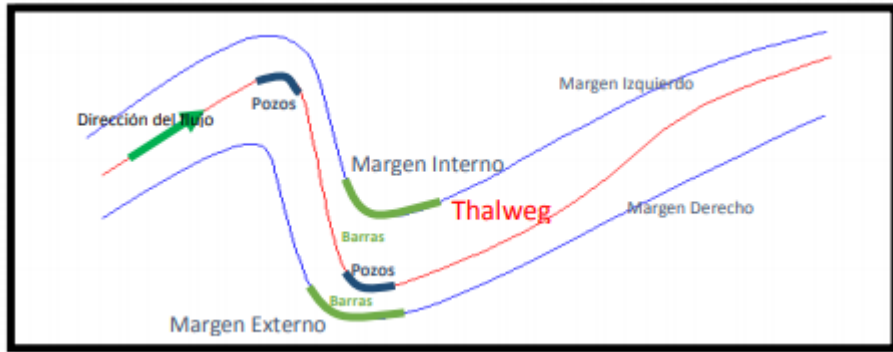
Artículo 129 bis 2.- La Dirección General de Aguas podrá ordenar la inmediata paralización de las obras o labores que se ejecuten en los cauces naturales de aguas corrientes o detenidas que no cuenten con la autorización competente y que pudieran ocasionar perjuicios a terceros, para lo cual podrá requerir el auxilio de la fuerza pública en los términos establecidos en el artículo 138 de este Código, previa autorización del juez de letras competente en el lugar en que se realicen dichas obras.

Asimismo, en las autorizaciones que otorga la Dirección General de Aguas referidas a modificaciones o nuevas obras en cauces naturales que signifiquen una disminución en la recarga natural de los acuíferos, podrán considerarse medidas mitigatorias apropiadas. De no ser así, se denegará la autorización de que se trate.

Artículo 129 bis 3.- La Dirección General de Aguas deberá establecer una red de estaciones de control de calidad, cantidad y niveles de las aguas tanto superficiales como subterráneas en cada cuenca u hoya hidrográfica. La información que se obtenga será pública y deberá proporcionarse a quien la solicite.

Anexo 4: Thalweg

También denominado Vaguada o “camino del valle” (por su significado proveniente del alemán). En términos simples, es la línea imaginaria que une las máximas profundidades de la sección transversal de un río (Rocha, 2009) y donde el flujo posee mayor velocidad. En la figura 9 se puede observar que esta línea no es fija en el cauce del río ya que puede moverse de un margen a otro. El thalweg se presenta en todas las corrientes naturales.



Descripción de un río. Fuente: Ghosh y Mistri, 2012

Anexo 5 resultado Sinuosidad

$$IS = \frac{\textit{Longitud del Talweg}}{\textit{Longitud del Valle}}$$

año	log talweg	log valle	IS
1989	62632,17	68681,25	0,91192531
1990	62273,78	66931,83	0,93040606
1998	62263,39	62891,13	0,99001862
2018	55247,98	55385,65	0,99751434

año	log talweg	log valle	IS
2001	62214,62	62536,83	0,99484768
2002	62218,59	62524,75	0,99510338
2003	62207,37	62522,44	0,99496069

2004	log talweg	log valle	IS
enero	61856,67	62143,46	0,995385033
marzo	62345,36	62745,34	0,993625343
mayo	61564,48	62891,13	0,97890561
octubre	58742,63	59385,65	0,989172132

año	log talweg	log valle	IS
2005 enero	58764,35	59287,48	0,991176383
2005 julio	59814,41	61479,86	0,972910641
2006 febrero	58043,27	58275,12	0,996021458
2006 julio	58774,61	59956,55	0,980286724

año	log talweg	log valle	IS
2013	57618,07	57831,33	0,99631238
2014	55854,35	55982,47	0,99771143
2015	55836,26	55844,03	0,99986086
2016	55373,07	55443,98	0,99872105
2017	55314,81	55392,53	0,99859692

$$ST = \frac{\text{Longitud del Talweg}}{\text{Distancia Area}}$$

año	log talweg	dist area	ST
1989	62632,17	54135,34	1,15695533
1990	62273,78	54135,34	1,15033507
1998	62263,39	54135,34	1,15014314
2018	55247,98	54135,34	1,02055293

año	log talweg	dist area	ST
2001	62214,62	54135,34	1,14924225
2002	62218,59	54135,34	1,14931559
2003	62207,37	54135,34	1,14910833

2004	long talw	dist area	ST
enero	61856,67	54135,34	1,14263012
marzo	62345,36	54135,34	1,15165731
mayo	61564,48	54135,34	1,13723272
octubre	58742,63	54135,34	1,08510688

año	log talweg	dist area	ST
2005 enero	58764,35	54135,34	1,0855081
2005 julio	59814,41	54135,34	1,10490504
2006			
febrero	58043,27	54135,34	1,07218815
2006 julio	58774,61	54135,34	1,08569762

año	log talweg	dist area	ST
2013	57618,07	54135,34	1,06433376
2014	55854,35	54135,34	1,03175393
2015	55836,26	54135,34	1,03141977
2016	55373,07	54135,34	1,02286362
2017	55314,81	54135,34	1,02178743

$$SV = \frac{\text{Longitud del Valle}}{\text{Distancia Area}}$$

año	long valle	dist area	SV
1989	68681,25	54135,34	1,26869527
1990	66931,83	54135,34	1,2363796
1998	62891,13	54135,34	1,16173889
2018	55385,65	54135,34	1,023096

año	long valle	dist area	SV
2001	62536,83	54135,34	1,15519419
2002	62524,75	54135,34	1,15497104
2003	62522,44	54135,34	1,15492837

2004	long valle	dist area	SV
enero	61856,67	54135,34	1,14263012
marzo	62345,36	54135,34	1,15165731
mayo	61564,48	54135,34	1,13723272
octubre	58742,63	54135,34	1,08510688

año	long valle	dist area	SV
2005 enero	59287,48	54135,34	1,09517147
2005 julio	61479,86	54135,34	1,1356696
2006			
febrero	58275,12	54135,34	1,07647093
2006 julio	59956,55	54135,34	1,10753068

año	long valle	dist area	SV
2013	57831,33	54135,34	1,06827315
2014	55982,47	54135,34	1,03412059
2015	55844,03	54135,34	1,0315633
2016	55443,98	54135,34	1,02417349
2017	55392,53	54136,34	1,02320419

Anexo 6 Resultados trenzado

2004	Enero				marzo				mayo				octubre				
	lb				lb				lb				lb				
	212,5				214,8				282,44				276,8				
	368,16				348,53				411,3				394,5				
	135,33	lm			137,41	lm			143,65	lm			135,33	lm			
	Σlb	715,99	883,43	0,81046602	Σlb	700,74	883,43	0,79320376	Σlb	837,39	883,43	0,94788495	Σlb	806,63	883,43	0,91306612	
	528,92				526,57				1052,3				1043,48				
	796,43				794,79				493,15				487,71				
	1217,08				1219,64				2584,96				2576,26	lm			
	514,23				513,56				689,65				Σlb	4107,45	7560,83	0,54325385	
	2144,78	lm			2143,89	lm			375,04								
	Σlb	5201,44	7560,83	0,68794564	Σlb	5198,45	7560,83	0,68755018		2167,34	lm						
	2278,21				2277,65				Σlb	7362,44	7560,83	0,97376082		2418,04			
	945,6				947,83									4495,87	lm		
	696,1	lm			697,68	lm			2423,39					6913,91	4178,27	1,65473031	
	3919,91	4178,27	0,9381658		3923,16	4178,27	0,93894363		4506,26	lm				1652,84			
	1135,3				1136,31				6929,65	4178,27	1,65849742			1835,19			
	1331,6				1332,86									1056,44			
	802,19				804,46				1668,71					763,69			
	564,98				567,15				1844,05					385,36	lm		
	489,75				488,92				1072,57					Σlb	5693,52	7996,93	0,71196322
	524,11				525,34				780,18								
	684,9				686,76				702,34								
	368,7	lm			367,362	lm			393,44	lm							
	Σlb	5901,53	7996,93	0,73797445	Σlb	5909,162	7996,93	0,73892881	Σlb	6461,29	7996,93	0,80797131					

1989	350,53			948,06			1146,73			771,90
	160,03			509,10			2081,62			390,51
	163,46	lm		609,39			720,89	lm		399,97
	674,02	3235,04	0,20834982	993,15			3949,24	7262,94	0,54375225	1562,38
				955,36						9405,86
				1861,93	lm					0,16610709
				5876,99	7904,72	0,74347858				

1990	303,80			1335,77			1747,87			637,40
	115,49			730,51			2043,44			1485,96
	205,12	lm		979,83			519,06			1745,15
	624,41	2601,93	0,23997955	1158,53			940,57	lm		584,68
				831,33			5250,94	6416,07	0,81840441	407,06
				1695,03	lm					847,11
				6731	7003,83					5707,36
										9198,78

1998	363,45			1219,18			962,30			688,52
	201,74			539,23			772,35			1346,51
	126,57			1380,02			414,26			1501,60
	164,32	lm		1772,82			612,94			925,35
	856,08	3051,34	0,28055871	930,51			2761,85	6871,25	0,40194288	691,34
				1841,83						663,14
				2077,20						767,49
				1429,73						880,01
				11190,52	7625,14	1,46758223				513,66
										lm
										7977,62
										9230,02
										0,86431232

2001	300,48			1853,58			2467,01			1518,21
------	--------	--	--	---------	--	--	---------	--	--	---------

288,33	661,79	1062,91	1627,09
125,58 lm	651,83	891,20	940,65
714,39 2759,49 0,25888479	1130,86	644,28 lm	696,32
	1854,87	5065,4 6593,47 0,76824495	507,78
	837,17		792,81
	3607,56		911,23
	2241,41 lm		562,50
	12839,07 7752,56		376,92
			7933,51 7827,56 1,01353551

2002

337,57	650,73	2574,55	1206,75
369,90	960,02	1556,13	787,30
124,37 lm	583,18	1095,22	1509,22
831,84 2617,11	1121,23	527,81	945,59
	1091,82	969,18	654,61
	1278,74	668,28 lm	313,35
	2148,98 lm	7391,17 5681,86 1,30083635	776,72
	7834,70 7319,10 1,07044582		325,22
			705,19
			364,59
			468,61 lm
			8057,15 7545,59

2003

414,02	1411,48	2475,47	1565,01
400,10	792,84	1557,62	966,04
125,73	636,70	1021,80	595,15
185,02	1203,93	911,22	603,45
1124,87 2551,63 0,4408437	2286,34 lm	639,53 lm	800,31
	6331,29 7398,39 0,85576592	6605,64 5691,56 1,16060272	635,62
			183,28
			822,09

		1517,79	lm			407,19
		5864,87	7253,66	0,80853941		1327,75
						71564,89
						7671,30
						9,32891296
2014	187,83	698,56			2878,51	442,26
	276,41	991,55	lm		194,79	1524,01
	464,24	696,33	506,32	0,9168905	336,03	699,30
		311,98			1468,79	751,90
		117,94			1224,14	848,47
		1006,20			481,59	571,46
		273,67			6583,85	6935,83
		1028,69				468,12
		1589,24	lm			1420,32
		6714,16	7288,89	0,92114986		6725,84
						7863,93
2015	208,95	703,56			2859,87	474,66
	354,22	1428,74	lm		1461,36	942,02
	563,17	1109,44	417,55	1,34874865	701,76	940,36
		1598,18	lm		1241,98	lm
		4839,92	7147,58		507,90	2357,04
					6772,87	3347,07
					6839,26	0,70420995
2016	346,27	1561,15			2375,49	446,75
	379,04	703,04	lm		303,54	1642,05
	725,31	1078,37	519,36	1,39654575	1389,32	857,03
		1596,54	lm		1164,64	866,28
		4939,1	7083,74	0,69724468	511,09	437,74
					2,2787376	lm
						4249,85
						6298,75
						0,67471324

2017	395,14		473,82			467,43				
	391,63	lm	839,49		193,83	1517,66				
	786,77	528,22	1099,78		1404,29	771,49				
			981,11		1215,56	lm	898,05			
			1559,39		2813,68	5397,12	0,52132989	1054,28		
			592,71	lm				618,78		
			5546,3	7664,07	0,72367554			464,05		
								241,63		
								235,16	lm	
								6268,53	7599,76	0,82483263
2018			629,12		358,73		477,22			
	274,57		170,24		336,18		1029,65			
	375,77		1087,14		1349,69		796,04			
	650,34	485,36	948,77		1224,16		961,17			
			1515,53		515,61	lm	611,23			
			599,25		3784,37	5142,94	0,73583787	1189,90		
			4950,05	7678,43	0,64466955			251,85		
								272,29	lm	
								5589,35	7746,22	0,72155839