



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE



Centro UC
Cambio Global

Sedimentos, Hidráulica y Efectos Morfológicos

Preparado para la Mesa de Hidroelectricidad Sustentable

Por: Luca Mao | Secretaría Técnica

Ministerio de Energía | Chile

Diciembre de 2016

Contenido

1. Morfología Fluvial	3
2. Obras de desarrollo hidroeléctrico y sedimentos	7
3. Estrategias de manejo de sedimentos en obras.....	9
a. Bypass de sedimentos.....	9
b. Remover sedimentos acumulados en el reservorio.....	10
c. Reducir el monto de sedimento que llega a los reservorios.	12
4. Régimen natural de sedimentos.....	12
5. Como se abordan los temas de morfología fluvial y de relación entre transporte de sedimentos y obras hidroeléctricas en Chile, y algunas experiencias internacionales relevantes	14
6. Referencias	17

1. Morfología Fluvial

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 de fondo, partículas de arenas o material de diámetros mayor 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 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 pozas, 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 uno de estos componentes va a afectar a los otros, determinando cambios morfológicos. Este equilibrio se puede representar conceptualmente por la balanza de Lane (1955), que se muestra en la Figura 1. La balanza representa el equilibrio que existe entre el flujo de agua y los sedimentos transportados. Por un lado están el transporte de sedimentos y el tamaño de éstos, y en el otro el flujo líquido y la pendiente del río. Cualquier cambio en la cantidad de agua o sedimentos en el río va a 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 del canal, el cual puede cambiar longitudinal y transversalmente. A su vez, los cambios en los patrones del canal van a estar restringidos por las condiciones físicas del valle (geometría: grado de confinamiento). 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 variabilidad, 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/o régimen de estos va a afectar las formas y procesos que ocurren en los ríos.

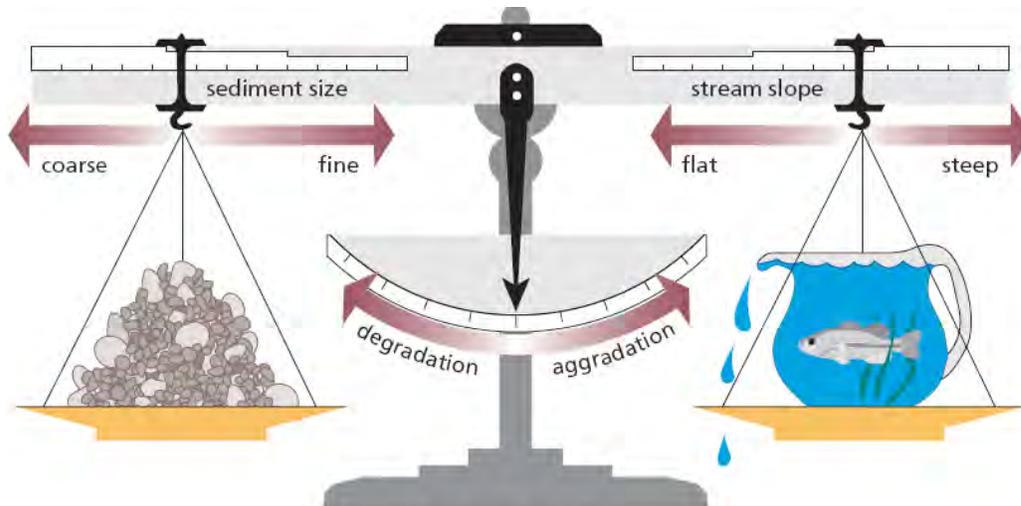


Figura 1. La balanza de Lane (1955).

De acuerdo a lo anterior, los ríos van a presentar diferentes formas y características según donde se encuentren en la cuenca, su suministro de sedimentos y los flujo hídricos (cantidad promedio pero también magnitud, frecuencia, y duración de las crecidas). Debido a esto, cada río tiene cierta forma y cierta 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 2). Ejemplificando, los ríos de montaña van a tener formas rectilíneas, ya que usualmente están confinados lateralmente y no pueden migrar y generar otras formas. Al encontrarse en un lugar donde el suministro de sedimentos 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. Aquí 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. Mas 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 entremedio. Así mismo, los sedimentos tienen menor diámetro, generalmente gravas. Finalmente, más aguas abajo, cuando la pendiente disminuye aún más, aunque haya más caudal, habrá menos energía para transportar sedimentos, y el transporte es mas en suspensión, e interesa sedimentos muy finos. 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.

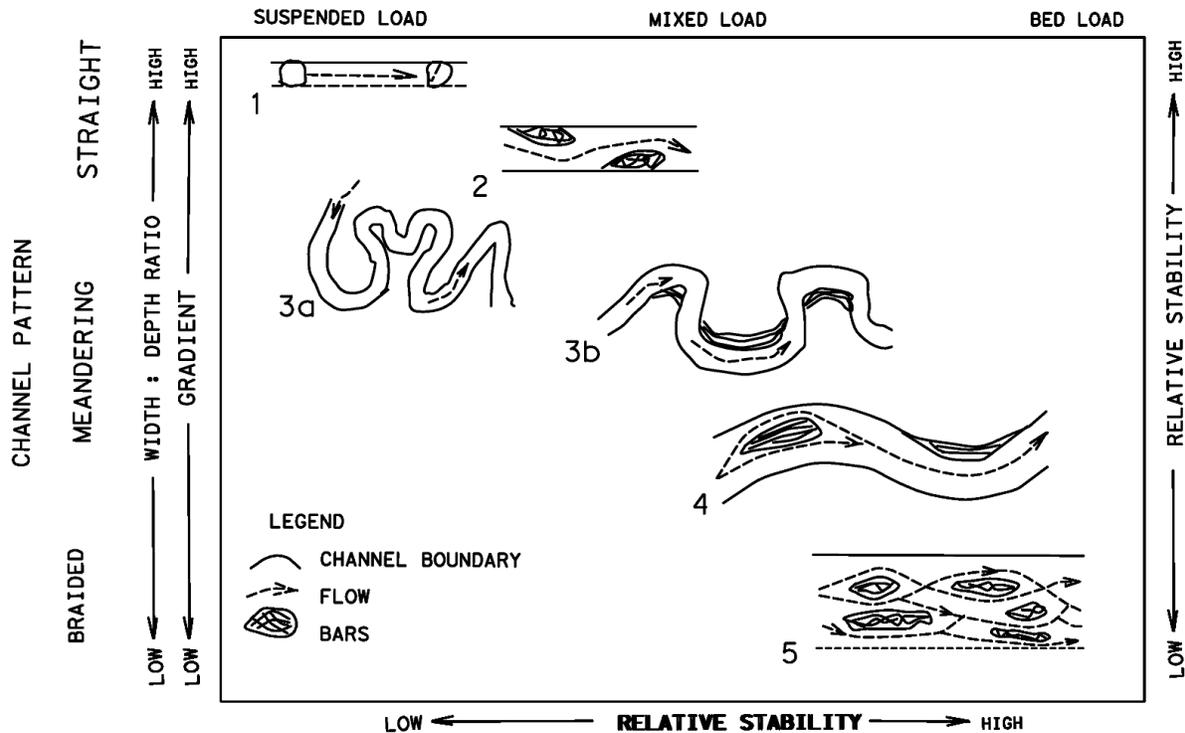


Figura 2. Ejemplo de clasificación de los sistemas fluviales, basada en las formas planimétricas (modificado de Shen et al., 1981).

Las formas que presentan los ríos a través de una cuenca permiten identificar los procesos que ahí 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 solo 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.

A pesar de que las formas fluviales pueden expresar los procesos que ocurren en ese lugar del río, es importante y fundamental conocer la dinámica del transporte de sedimentos en diferentes partes de la cuenca. Esto es necesario con el fin de saber los sectores donde se producen, se transportan y donde se depositan los sedimentos. Un estudio a escala de cuenca de estos procesos es denominado balance de sedimentos (*sediment budget*). Con esta herramienta, es posible determinar la cantidad de sedimentos total que produce una cuenca al llegar al océano, que va a estar en función de la procedencia o de donde son suministrados los sedimentos, de donde se acumulan a lo largo de la cuenca, de cuánto tiempo están acumulados en varias porciones de la cuenca, y del grado de conexión que hay entre las fuentes de sedimentos a la red hidrográfica (conectividad). Si es posible cuantificar cada una de estas variables, se puede entender de mejor manera los procesos, la temporalidad y magnitud del transporte de sedimentos.

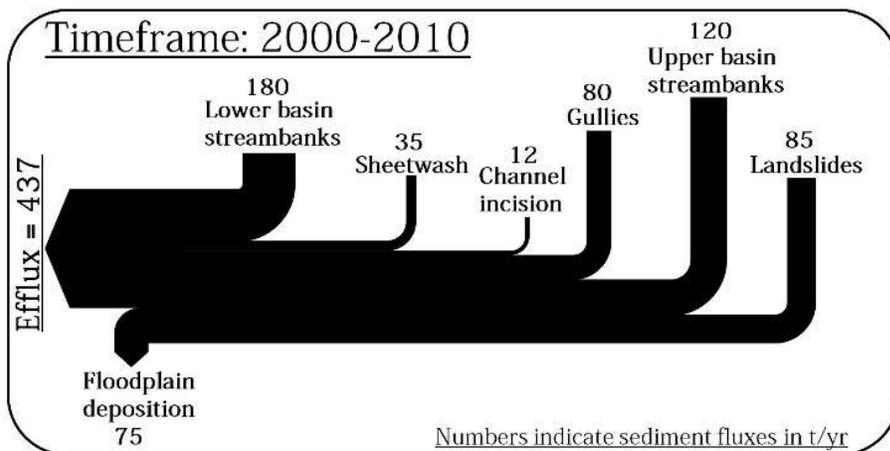


Figura 3. Ejemplo de un balance de sedimentos a escala de cuenca.

2. Obras de desarrollo hidroeléctrico y sedimentos

Las represas y reservorios tienen cierta influencia en los sistemas fluviales. Una de las principales impactos de la los reservorios es la sedimentación de los embalses. Hoy en día los sedimentos atrapados por los reservorios son de importancia mundial, ya que tiene consecuencias significativas sobre la morfología fluvial y la sustentabilidad de los

reservorios (Wang y Kondolf, 2014). Sumi *et al.* (2004) estimaron que debido a sedimentación, se perderían la mitad de la capacidad global de almacenamiento en reservorios (ignorando los nuevos reservorios creados) para el año 2100. Annandale (2013) estimó que el almacenamiento mundial de agua en reservorios llegó a su máximo en 1995 con 4200 km³ almacenados, y ahora estaría declinando porque la tasa de sedimentación estaría excediendo la tasa de nuevas construcciones.

Bajo un punto de vista de transporte de sedimentos, la influencia en los sistemas fluviales se ve más bien aguas abajo. Esto se debe al fenómeno denominado de “aguas hambrientas” (*hungry waters*), debido a que las aguas que salen de un embalse no tienen carga de sedimentos, y pueden arrastrar con mucha más energía y efectividad los sedimentos del lecho de ríos aguas debajo de obras de retención (Kondolf, 1997; Schmidt y Wilcock, 2009). Uno de los principales efectos sobre la morfología del río es la erosión vertical del lecho, que se denomina incisión del río (Arnaud *et al.*, 2012). Con la incisión aumenta también el acorazamiento del lecho, haciendo que los sedimentos superficiales del lecho sean más gruesos, lo que tiene influencia en los hábitats de macroinvertebrados y peces. Al estar el flujo de agua controlado y sin suministro de sedimentos, las formas fluviales tienden a estabilizarse, el canal activo se angosta y disminuye la complejidad de los ríos. 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 desaparecieron de playas a tasa acelerada debido a la falta de suministro de sedimentos (Gaillardot 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 sobretodo de la modalidad de retención de sedimentos en las tomas de agua, manejo de los mismos, y longitud de los tramos entre toma y devolución de los flujos.

3. Estrategias de manejo de sedimentos en obras

Es útil distinguir entre sedimentos gruesos y finos. Sedimentos de grano delgado (limos y arcillas) son importantes para las estructuras de ríos de baja pendiente y estuarios, y por la carga de contaminantes y nutrientes que pueden contener. Si hay sedimentos finos atrapados en reservorios, los nutrientes atrapados pueden tener impactos ecosistémicos significativos si removidos y transportados aguas abajo. Por ejemplo, después de la construcción de la represa Tres Gargantas en Cina, la carga de sedimentos en suspensión disminuyó un 91% en la parte media del Río Yangtze, y la carga de fosforo total decreció del 77% (Zhou *et al.*, 2013). Ya que el fósforo es uno de los nutrientes limitantes para la bioactividad en un río, su reducción implica una probable reducción en la producción primaria en las áreas ribereñas y costeras aguas abajo. El sedimento grueso (de arena a sedimentos más gruesos) es el material con el que se constituye usualmente el lecho de los ríos. Ya que las gravas se mueven a través del canal del río como carga de fondo, los reservorios atrapan casi la totalidad de la carga solida fondo, mientras que la eficiencia de retención de materiales más finos transportados en suspensión es mucho más baja (siendo mayor en reservorios más grandes). De hecho, grandes reservorios con tiempos de residencia prolongados pueden atrapar hasta la carga de sedimentos en suspensión (Morris and Fan, 1998).

La captura de sedimentos por represas no es necesariamente inevitable. Algunas represas pueden ser diseñadas para el paso de sedimentos, tanto a través de la represa como rodeando el reservorio, usando ciertas técnicas o tecnologías. En general, las estrategias para el manejo de sedimentos de reservorios son principalmente de tres tipos:

a. Bypass de sedimentos

Con *bypass* de sedimentos se desvían por alrededor de el reservorio parte de las aguas entrantes durante las crecidas, ya que vienen cargadas de sedimentos. Típicamente las aguas son desviadas en estructuras aguas arriba del embalse por túneles o canales que

llegan aguas debajo de la represa. Es posible construir un canal con suficiente pendiente para generar el transporte de sedimentos y evitar que este los tape. Japón y Suiza son los países líderes en los túneles para el bypass de sedimentos (Auel et al., 2010). Los túneles y las divisiones de canales son operadas usualmente durante las crecidas, cuando la carga de sedimentos es mayor y más problemática. Los *bypass* de sedimentos son en general de alto costo debido a la necesidad de construir túneles, pero los sedimentos pasan y no interfiere con las operaciones de las represas, y evitan problemas geomorfológicos aguas abajo.

b. Remover sedimentos acumulados en el reservorio

Sediment Sluicing

Las operaciones de *sluicing* se realizan durante crecidas naturales con arrastre de sedimentos, e implican la baja del nivel de agua en el reservorio y el desagüe de la crecida, con el objetivo de permitir que el sedimento sea transportado a través del reservorio lo más rápido posible para minimizar la sedimentación. Algunos de los sedimentos previamente depositados pueden ser erosionado y transportado también, pero el principal objetivo es reducir la deposición de los sedimentos que llegan al reservorio. En China, se realiza en *sluicing* en la represa Tres Gargantas donde una reducción temporal prolongada durante la primera parte de la temporada de inundación es diseñada para maximizar la velocidad del flujo y sostener el transporte de sedimentos a través del reservorio, y también movilizar algo de los sedimentos depositados previamente. El nivel del reservorio aumenta mas tarde en la temporada para llenar el almacenamiento para la liberación sostenible durante la época de flujos bajos.

Sediment Flushing

El *flushing* de sedimentos se enfoca en la erosión y re-suspensión de sedimentos depositados en el fondo de reservorios, para transportarlos aguas abajo. Eso implica el vaciado completo del reservorio a través de compuertas de bajo nivel que son lo suficientemente amplias para que pase la descarga de caudal solido a través de la represa. El *flushing* es más efectivo en reservorios que son alargados y angostos, con descargas altas

mantenidas por encima del umbral de para movilizar y trasportar sedimentos, cuando hay compuertas de bajo nivel en la represa. *El flushing* puede liberar grandes cantidades de sedimento fino aguas abajo durante periodos de relativo bajo flujo, que puede tener impactos substanciales en la ecología del rio. Hay ejemplos de implementación exitosa en muchas represas a nivel mundial, como en Japón (Sumi and Kanazawa, 2006), China (Wang *et al.*, 2005), Costa Rica (Jansson and Erlingsson, 2000), Francia (Thareau et al., 2006), entre otros. Como regla general, durante el *flushing* de aguas cargada de sedimentos a través de turbinas no es recomendado porque puede causar seria abrasión de las turbinas (Thapa *et al.*, 2005).

El principal desafio es sostener la mayor cantidad de volumen de agua almacenada por un periodo largo bajo operaciones de *flushing*, para minimizar impactos ambientales adversos aguas debajo de los reservorios (Staub, 2000). En general, *flushings* más frecuentes (anualmente) tiene menos impactos aguas abajo porque libera sedimentos más seguido y en pequeños pulsos, aunque estas operaciones tengan altos costos.

Turbidity currents

Al entrar en un reservorio, las aguas de un rio usualmente se desplazan abajo del cuerpo de aguas estáticas del reservorio, debido a la diferencia de temperatura del agua, que determina diferencias en la densidad del flujo. Estos “ríos sumergidos” en el fondo de los reservorios tienen la carga de sedimentos en suspensión. En ciertos casos es posible permitir que esta agua densa y cargada de sedimentos pase por las compuertas bajas de la represa. El nivel en el reservorio se mantiene constante, pero hay que destacar que esta técnica funciona solo en algunos tipos de represa, y solo para sedimentos muy finos.

Dragado

Sedimentos acumulados pueden ser removidos por succión usando bombas hidráulicas sobre barcazas. En este caso no se tiene que sacar el agua de la represa, pero tiene igualmente un costo de operación bastante elevado. Si un reservorio es vaciado completamente (por ejemplo en operaciones de *flushing*), la remoción mecánica puede ser empleada utilizando excavadoras, que comúnmente es menos costosa que el dragado hidráulico.

c. Reducir el monto de sedimento que llega a los reservorios.

En este caso el estrategia consiste en evitar que los sedimentos lleguen al reservorio u obra hidroeléctrica, a través de obras menores o manipulaciones a escala de red de drenaje o cuenca hidrográfica aguas arriba. Este no mitiga los efectos de hambre de sedimentos aguas debajo de las obras, solo la acumulación de sedimentos en el reservorio.

Se puede por ejemplo reducir la introducción de sedimentos en los reservorios a través del cambio de uso de suelo en la cuenca, especialmente por reforestación. Es poco efectivo, especialmente durante crecidas de alta magnitud (Annandale, 2011; Kondolf and Matthews, 1993). Otra alternativa consiste en construir trampas de retención de sedimentos o pequeños diques de estabilización del lecho (*checkdams*) en la red hidrográfica aguas arriba. Estos pueden reducir la producción de sedimentos que llegan al reservorio, atrapando sedimentos. Cabe mencionar que de esta forma se trasladaría el problema aguas arriba, ya que muchas de estas obras requieren trabajos de limpieza y mantención

4. Régimen natural de sedimentos

Para poder implementar las medidas de gestión de sedimentos en obras hidroeléctrica es necesario conocer los aportes de sedimentos, y estos conocimientos usualmente se basan en aplicaciones de fórmulas empíricas, que tienen problemas no menores de aplicabilidad a casos específicos. En general, las formulas necesitan de ser calibradas con unos datos de terreno, y el monitoreo de transporte de sedimentos de fondo (que es el más problemático en la sedimentación e embalses) es un desafío, debido a dificultades físicas y operativas de muestreo. Aun teniendo estos datos a disposición, surge la necesidad de saber cuál sería el régimen natural de sedimentos en un río, al fin de diseñar obras sustentables que sean lo menos impactantes posible en el régimen de sedimentos, que es fundamentalmente importante en el mantenimiento de un equilibrio dinámico en la morfología fluvial.

Sin embargo, cuantificar el régimen natural del transporte y dinámica de sedimentos no es una tarea fácil, sobre todo en lugares con escasez (o falta completa) de datos de arrastre de sedimentos de fondo. Idealmente, para llegar a establecer el régimen natural de sedimentos habría que llegar a determinar las siguientes variables o métricas (Wohl et al, 2015):

- Geometría de secciones transversales y perfiles. Esto implica una campaña de mediciones topográficas que levante datos de secciones transversales en diferentes tramos del río. Si realizadas cada cierto tiempo (frecuencia cada 2-3 años), esto ayudará a evaluar también la dinámica lateral de la sección, además de evaluar la incisión o aumento en el nivel del tramo estudiado y cambios en formas morfológicas;
- Granulometría del lecho. Conocer la granulometrías del lecho y su cambios en el tiempo ayudaría a ver qué tipo de sedimentos (más finos o más gruesos) se están transportando;
- Transporte de suspensión. El material fino cumple un rol en la ecología acuática y en la calidad de agua para uso humano. Más aun, se pueden inferir las fuentes de sedimentos que están activas en una cuenca. Esta variable es monitoreada por DGA en algunas estaciones fluviométricas;
- Transporte de fondo. Importante para conocer y caracterizar las formas y procesos morfológicos del río. Es de difícil medición, por lo que normalmente, para un monitoreo continuo, se utilizan métodos con sensores indirectos (e.g. geófonos, hidrófonos). En este momento en Chile no existe una red de monitoreo de caudales sólidos en ríos, y aparentemente tampoco una agencia gubernamental con esta responsabilidad explícita;
- Balance y conectividad de sedimentos. Conocer a escala de cuenca o de tramo el suministro, almacenamiento y generación de sedimentos en una escala espacial dada. Además, es importante tener en cuenta la conectividad de sedimentos de las fuentes, ya que estas varían en el espacio y tiempo, activándose y desactivándose dependiendo de los fenómenos climáticos y tectónicos;

- Tipos morfológicos. Esto integra la forma del canal, el tipo del canal, la planicie de inundación. La dinámica de esto es fundamental, ya que cambios en la morfología puede ayudar a comprender los flujos de sedimentos en escalas de tiempo mayor;
- Islas y barras. Estos dos representan dos elementos claves en cuanto a diversidad de hábitats se refiere. Además, su caracterización en el tiempo puede ser útil para entender flujos de sedimentos a largo plazo;
- Vegetación ripariana. La vegetación ripariana es importante por su relación con la biota acuática, pero además su caracterización puede dar señales de la dinámica morfológica de una porción de los ríos. Esto se logra a través de caracterización de la sucesión de la vegetación, el establecimiento de plantas y la diversidad vegetal.

5. Como se abordan los temas de morfología fluvial y de relación entre transporte de sedimentos y obras hidroeléctricas en Chile, y algunas experiencias internacionales relevantes

De las métricas para evaluar el régimen natural de los sedimentos, solo muy pocas son monitoreadas en Chile. Hoy en día, la DGA realiza mediciones del transporte de sedimento en suspensión en algunas estaciones pluviométricas en varias cuencas, generalmente a través de una toma diaria de agua. Todas las demás métricas no se miden rutinariamente, o no hay un registro ordenado de ellas. Aunque algunas (inclusive transporte de sedimentos de fondo) puedan ser monitoreadas por asociaciones de usuarios o empresas, no hay registros disponible de ellas. Algunas de las métricas mencionadas en el capítulo anterior fueron cuantificadas en un estudio recién comisionado por el Ministerio de Energía (2016) en el marco de un estudio sobre planificación del desarrollo hidroeléctrico, que caracterizó los tipos morfológicos de los ríos (planimétricamente), las islas y barras (esta última indirectamente, como morfología), y el ancho y continuidad de la vegetación ripariana, el grado de confinamiento latera, entre otros. Éstas métricas y otras más se evaluaron en Google Earth con la foto más reciente disponible, por lo que no se ha hecho un monitoreo de cambios en estas métricas en un tiempo dado.

Una búsqueda de literatura científica y literatura gris, ha evidenciado 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. La morfología fluvial se menciona tangencialmente en el Guía de Caudales Ambientales (2016), y debería ser tratada de forma integrada, en un documento de evaluaciones eco-hidro-morfológicas de ríos.

Con referencia al flujo de sedimentos, una búsqueda bibliográfica y de normativas ha evidenciado que en ningún documento se mencionan explícitamente los problemas de sedimentación en embalses, o de falta de sedimentos aguas debajo de embalses. También, no hay mención de la necesidad de una red de monitoreo de transporte de sedimentos de fondo en los ríos, ni de protocolos para operaciones de limpieza de reservorios (*flushing*).

En un documento recién elaborado por el Ministerio de Energía acerca de Estándares Internacionales de Sustentabilidad para la Hidroelectricidad (2015) se evidencia que en la mayoría de los casos los indicadores no detallan la importancia de los sedimentos y de la geomorfología fluvial en la sustentabilidad de los proyectos. El único caso en donde se destaca la importancia de considerar la dinámica de sedimentos en los ríos para calificar la sustentabilidad de proyectos hidroeléctricos es el estándar GreenHydro, que hace un hincapié en la importancia de los sedimentos para la sustentabilidad no solo del proyecto y vida útil de los reservorios, sino que en el medio ambiente fluvial, especialmente los sedimentos. Este estándar Suizo, requiere un monitoreo y un conocimiento en la geomorfología fluvial, sus formas y dinámicas, incluyendo hidrología y ecología.

Los sedimentos y su flujo han sido abarcado de diferente forma en otros lugares del mundo, en especial en los países de la Unión Europea y los Estados Unidos. La falta de reglamentación acerca del desarrollo hidroeléctrico, operaciones de extracción de agua y árido de los ríos, y ocupaciones de áreas de pertinencia fluvial durante muchos siglos en Europa, llegó a ser tan costoso banjo un punto de vista de pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos, que la Unión Europea sacó el *Water Framework Directive* (WFD,

2000), o Directiva en el Marco del Agua, que tiene como objetivo llevar los ríos en Europa hacia una buena calidad o condición eco-hidro-morfológica, que sea social y económicamente factible. Además, en 2007, se crea otra directiva, FLOODS, con el fin de proteger a la sociedad de los riesgos y peligros de inundación. A partir de estas dos directivas, los países de la Unión Europea han desarrollado metodologías para la evaluación de la condición de los ríos y del manejo de estos en todo sus sentidos, incluyendo inundaciones. Es así como hoy en día los países están realizando un manejo integrado de las cuencas, con un énfasis especial en el manejo de sedimentos, en pro de la geomorfología fluvial como en la gestión de inundaciones.

Para llevar a cabo este manejo o toma de decisiones, fue necesario crear y unificar metodologías para la evaluación de la condición de los ríos y riesgos asociados a éstos. Un ejemplo es el que se está llevando a cabo en Italia. Se unificaron varias metodologías, incluyendo índices y métricas para la evaluación eco-hidro-morfológica de los ríos. La metodología se llama IDRAIM, y tiene como objeto ayudar a la toma de decisiones en torno a los ríos desde un punto de vista de calidad y riesgos asociados. Esta metodología ayuda a tomar decisiones en ambos marcos, WFD y FLOODS, con herramientas que ayudan a obtener beneficios y cumplir el objetivo de ambas directivas, que normalmente están son contradictorios al aplicar uno u el otro.

6. Referencias

- Annandale, G. (2013). Quenching the thirst: sustainable water supply and climate change. *CreateSpace Independent Publ. Platform*.
- Annandale, G. (2011). Going full circle. *International Water Power and Dam Construction*, 63(4), 30–34.
- Auel, C., & Boes, R. (2011). Sediment Management in the Solis Reservoir Using a Bypass. In *8th ICOLD European Club Symposium* (pp. 438–443).
- Jansson, M. B., & Erlingsson, U. (2000). Measurement and quantification of a sedimentation budget for a reservoir with regular flushing. *Regulated Rivers: Research and Management*, 16(3), 279–306. doi:10.1002/(SICI)1099-1646(200005/06)16:3<279::AID-RRR586>3.0.CO;2-S
- Kantoush, S. A., & Sumi, T. (2010). River morphology and sediment management strategies for sustainable reservoir in Japan and European Alps. *Ann Disas Prev Res Inst Kyoto Univ*, 53(B), 821–839.
- Kawashima, S., Johndrow, T. B., Annandale, G. W., & Shah, F. (2003). *Reservoir conservation: The RESCON approach* (Vol. II). Washington, DC.
- Kondolf, G. M., & Matthews, W. V. (1999). Management of coarse sediment in regulated rivers of California.
- Lane, E. W., 1955. *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*. Proceedings, American Society of Civil Engineers, No. 745, July.
- Morris, G. L., & Fan, J. (1998). Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use. McGraw Hill Professional.
- Schmidt, J. C., & Wilcock, P. R. (2008). Metrics for assessing the downstream effects of dams. *Water Resources Research*, 44(4). doi:10.1029/2006WR005092
- Shen, et. Al (1981). Methods for Assessment of Stream Related Hazards to Highways and Bridges. FHWA/RD-80/160.
- Sumi, T., & Kanazawa, H. (2006). Environmental study on sediment flushing in the Kurobe River. In *TRANSACTIONS OF THE INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS* (p. 219).

- Sumi, T., Okano, M., & Takata, Y. (2004). Reservoir sedimentation management with bypass tunnels in Japan. In *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation* (pp. 1036–1043).
- Thapa, B., Shrestha, R., Dhakal, P., & Thapa, B. S. (2005). Problems of Nepalese hydropower projects due to suspended sediments. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 8(3), 251–257. doi:10.1080/14634980500218241
- Thureau, L., Giuliani, Y., Jimenez, C., & Doutriaux, E. (2006). Gestion sédimentaire du Rhône suisse: Implications pour la retenue de Genissiat. In *Congrès du Rhône «Du Léman à Fort l'Ecluse, quelle gestion pour le futur.*
- Wang, G., Wu, B., & Wang, Z. Y. (2005). Sedimentation problems and management strategies of Sanmenxia Reservoir, Yellow River, China. *Water Resources Research*, 41(9), 1–17. doi:10.1029/2004WR003919
- Wang, H. W., & Kondolf, G. M. (2014). Upstream sediment-control dams: Five decades of experience in the rapidly eroding dahan river basin, Taiwan. *Journal of the American Water Resources Association*, 50(3), 735–747. doi:10.1111/jawr.12141
- Wohl, E., Bledsoe, B. P., Jacobson, R. B., Poff, N. L., Rathburn, S. L., Walters, D. M., & Wilcox, A. C. (2015). The natural sediment regime in rivers: Broadening the foundation for ecosystem management. *BioScience*, 65(4), 358–371. doi:10.1093/biosci/biv002
- Yang, Z., Wang, H., Saito, Y., Milliman, J. D., Xu, K., Qiao, S., & Shi, G. (2006). Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam. *Water Resources Research*, 42(4). doi:10.1029/2005WR003970
- Zhou, J., Zhang, M., & Lu, P. (2013). The effect of dams on phosphorus in the middle and lower Yangtze river. *Water Resources Research*, 49(6), 3659–3669. doi:10.1002/wrcr.20283