



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DEPTO. DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE
LOS RECURSOS HÍDRICOS**

ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE SEDIMENTOS DE LA DGA

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

DICTUC S.A.

S.I.T. N° 459

SANTIAGO, NOVIEMBRE, 2020

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Civil Industrial, Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas

Ingeniero Comercial, Sr. Óscar Cristi Marfil

Jefa Departamento de Conservación y Protección de los Recursos Hídricos

Ingeniera Civil, Sra. Mónica Musalem Jara

Inspector Fiscal

Ingeniero Ambiental, Sr. Diego San Miguel Cornejo

Inspector Fiscal (s)

Ingeniero Ambiental, Sr. Heriberto Moya Gutiérrez

DICTUC S.A.

Jefe de Proyecto

Ingeniero Civil, Ph.D., Sr. Cristián Escauriaza Mesa

ESPECIALISTAS

Especialista en Sedimentos

Ingeniero Civil, Ph.D., Sr. Hernán Alcayaga Saldías

EQUIPO DE PROFESIONALES

Ingeniero Civil Hidráulica, Srta. Karina Soto Rivas

Contenidos

1.	Introducción.....	9
1.1.	Objetivos.....	11
1.2.	Metodología.....	12
2.	Antecedentes de la red sedimentológica nacional.....	15
2.1.	Metodologías e instrumentos de medición para el sedimento en suspensión 15	
2.1.1.	Muestreos Superficiales o Abreviados.....	16
2.1.2.	Muestreos en Profundidad (medición integrada).....	17
2.1.3.	Procedimientos en los centros de filtrado y en el laboratorio.....	19
2.2.	Características de los datos disponibles.....	20
2.2.1.	Ubicación de las estaciones.....	21
2.2.2.	Historial de medición.....	25
2.2.3.	Acceso a la información.....	28
2.3.	Características de los usuarios de los datos sedimentológicos y de sus necesidades.....	29
2.3.1.	Reconocimiento de los usuarios de datos sedimentológicos.....	30
2.3.2.	Características de los datos requeridos por los usuarios.....	31
2.3.3.	Opinión de los encuestados acerca de los datos proporcionados por la DGA	32

2.3.4.	Opinión de los usuarios acerca del enfoque que debería adoptar la DGA.	32
3.	Estado del arte.....	34
3.1.	Procesos de transporte y carga de sedimentos.....	34
3.1.1.	Carga y transporte en suspensión.....	35
3.1.2.	Carga y transporte de fondo.....	42
3.2.	Experiencia Internacional.....	48
3.2.1.	Sistemas de Monitoreo.....	48
3.2.2.	Medición de la contaminación de sedimentos.....	50
3.2.3.	Organizaciones internacionales.....	51
4.	Conclusiones y propuestas de mejoras de la red.....	58
4.1.	Mejoramiento de la Situación Actual.....	60
4.2.	Crecimiento de la Red de Sedimentos.....	63
4.2.1.	Automatización y Medición Continua.....	64
4.2.2.	Medición de Transporte de Fondo.....	66
4.3.	Desarrollo Futuro y Colaboraciones.....	73
4.3.1.	Coordinación entre Instituciones.....	73
4.3.2.	Trabajo Conjunto con Universidades y otras Instituciones de Investigación.....	75
4.3.3.	Observatorios.....	77
	Bibliografía.....	78
	Anexos.....	87

Anexo A. Resultados de la encuesta a los usuarios.....	87
Anexo B. Precios de referencias de equipos.....	99
Anexo C. Planillas para registrar los datos en terreno.....	101

1. Introducción

Los ríos tienen un rol fundamental en el desarrollo del país y son parte integral del ciclo hidrológico, entregando importantes recursos para las ciudades, agricultura, generación de energía, y recreación, entre otras actividades. Los cauces son también componentes esenciales de los ecosistemas acuáticos y superficiales, transportando agua, sustancias disueltas, y sedimentos que definen la morfología fluvial y sus relaciones con el entorno.

Para caracterizar los ambientes fluviales, entender la dinámica de los ríos en términos de la cantidad y calidad de los recursos, y realizar una gestión adecuada de los cauces a nivel de cuenca, es necesario contar con información confiable de caudales, contaminantes, y sedimentos. La medición del transporte de sedimentos y distribuciones granulométricas entregan información crítica para los usuarios y profesionales que deben tomar decisiones en el ámbito público, evaluar el riesgo de inundación asociado a procesos sedimentológicos, y determinar la erosión y depositación que afectan la disponibilidad de hábitats acuáticos y la evolución del lecho para distintos horizontes de tiempo. Actualmente, gran parte de los balances de sedimentos en suspensión han sido estimados para tramos de ríos no controlados (sin mediciones) y esto es aún más crítico para el transporte de fondo. Los balances y estimaciones del flujo de sedimentos se realizan mediante ecuaciones de capacidad de transporte que pueden inducir a errores de gran magnitud (Rhoads, 2020).

La Dirección General de Aguas (DGA) es un organismo a cargo del Ministerio de Obras Públicas (MOP) cuya misión está establecida en el Código de aguas en su Título X: De la protección de las aguas y cauces, Artículo 129 bis 3°, el que indica que "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 hoyo hidrográfica. La información que se obtenga deberá ser pública y deberá proporcionarse a quien la solicite".

La División de Hidrología, es la unidad de la DGA a la que le corresponde evaluar el transporte y composición de los sedimentos fluviales, para lo cual cuenta con una red sedimentológica compuesta de 72 estaciones vigentes. Actualmente la red realiza muestreos diarios y mensuales del transporte de los sedimentos a lo largo de todo el país. Las mediciones efectuadas como parte de la red sedimentológica han estado enfocadas exclusivamente en el monitoreo y análisis del transporte de sedimentos en

suspensión.

A pesar de que la red de sedimentos pertenece a la división de Hidrología, el laboratorio al cual llegan las muestras de sedimentos pertenece al Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH), el que en el año 2019 realizó un informe para evaluar una posible reestructuración de la red, que no ha tenido modificaciones considerables desde su establecimiento inicial en la década de 1960. En el informe se sintetizaron datos sedimentológicos medidos durante los años de operación y se realizó un diagnóstico con una perspectiva ISO (2014). Con la información disponible se identificaron debilidades y fortalezas de la red, además de oportunidades de mejoras en el futuro.

Con el propósito principal de replantear los objetivos de funcionamiento de la medición de sedimentos en el país para responder a las necesidades de los usuarios, con un enfoque que incorpore la componente ambiental en su desarrollo, y empleando estándares internacionales, la DGA a través del DCPRH realizó un llamado a presentar ofertas para la licitación pública titulada "Análisis crítico de la red de sedimentos de la DGA", que fue adjudicada a DICTUC S.A., con el trabajo de profesionales de la Pontificia Universidad Católica de Chile y de la Universidad Diego Portales, y cuya finalidad es evaluar las condiciones actuales de la red, comparar con experiencias internacionales en funcionamiento, y proponer recomendaciones en un ámbito general que sean necesarias para actualizar sus objetivos y metodologías, y abordar los desafíos actuales y futuros de para los ambientes fluviales de Chile y las actividades humanas que dependen de ellos.

Este informe se estructura de la siguiente manera; en la sección 1 se presentan los objetivos del proyecto y las metodologías propuestas para alcanzarlos. Luego, en la sección 2 se recopilan todos los antecedentes de la red, los que están divididos en tres categorías: metodología e instrumentos utilizados actualmente; características de los datos (distribución espacial de las estaciones, frecuencia de medición y disponibilidad de la información al público) y las características de los usuarios de los datos sedimentométricos y sus necesidades obtenidas mediante la realización de una encuesta. En la sección 3 se hace una revisión del estado del arte de las técnicas e instrumentos de medición y se presentan metodologías utilizadas a nivel internacional, seguidas por una comparación entre las organizaciones a cargo del monitoreo de sedimentos en el extranjero. Finalmente, en la sección 4, se presentan las conclusiones de este trabajo en conjunto con propuestas para mejorar la red,

donde se muestran tres grandes puntos: en primer lugar, se sugiere realizar mejoras que pueden realizarse en el corto plazo; en segundo lugar, se proponen metodologías para el crecimiento de la red, como lo son el uso de monitoreo automatizado y la incorporación del transporte de fondo a las variables de medición; por último, se proponen métodos para el desarrollo futuro y colaboraciones, donde se encuentra la coordinación entre instituciones, trabajo en conjunto con centros de investigación y universidades y la implementación de observatorios sedimentológicos a lo largo del país.

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis crítico de la red de sedimentos de la DGA y entregar una propuesta para una nueva red de medición de sedimentos. Los objetivos específicos del presente estudio son los siguientes:

I) Análisis de Procedimientos y Equipos: Se identifican las carencias de la red de medición de sedimentos actual, donde se contemplan las deficiencias, tanto en terreno como en laboratorio, de los procedimientos y equipos utilizados. Se analiza además el número y distribución de las estaciones actuales y su frecuencia de medición.

II) Análisis de la Red: Basado en la información disponible, se analiza la relevancia de la red actual, considerando a los usuarios que requieren los datos y la justificación de su medición, comparando con redes similares en el extranjero.

III) Recopilación de Antecedentes e Información Relevante: Se realiza una investigación del estado del arte en el uso de métodos de medición de transporte de sedimentos, de fondo y en suspensión, en una revisión de referencias internacionales. Adicionalmente se diseña una encuesta en conjunto con la inspección fiscal, con el propósito de definir necesidades y potenciales mejoras futuras.

IV) Propuesta de Mejoras: A partir del logro de los objetivos anteriores, se realizará una propuesta de mejoramiento a los procesos actuales, y se entregará un informe que contenga recomendaciones de nuevas metodologías,

equipos, sitios de medición y frecuencia, de acuerdo a las características de cada sistema fluvial, con el fin de adaptar la red a las necesidades del país y locales de cada sitio.

1.2. Metodología

La metodología propuesta que ha sido acordada con la DGA para alcanzar los objetivos del estudio consiste en seis puntos que se mencionan a continuación:

- Analizar los procedimientos y equipos utilizados por la DGA, para conocer las mediciones que se realizan en terreno y en laboratorio, cómo se ejecutan, y cuál es el manejo de los datos medidos. El análisis incorpora una situación base optimizada para mejorar el resultado de las muestras, y el uso y mantenimiento de los equipos.
- Elaboración y aplicación de una encuesta en conjunto con la inspección fiscal para reconocer a los usuarios actuales y a los posibles nuevos usuarios que podrían beneficiarse por la reestructuración de la red sedimentológica. Además identificar cuáles son las características de los datos que el público objetivo necesita, tales como propiedades físicas y químicas de los sedimentos, ubicación de los puntos de muestreo, metodologías para la medición, y escalas temporales y espaciales de los datos, entre otros. Finalmente, la encuesta tiene como objetivo conocer la opinión acerca del enfoque que debería adoptar la red sedimentológica en el futuro.
- Realizar una investigación del estado del arte sobre métodos de medición de sedimentos y monitoreo. En esta revisión se analizan los procedimientos que se utilizan en Europa (WFD), Japón (*Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan*, 2020) y América del Norte (Griffiths et al., 2014; Gray & Gartner, 2009), y se identifican las características de los instrumentos tales como rango de velocidad, temperatura y profundidad de operación, nivel de precisión, durabilidad, y frecuencia de medición. Con respecto a las metodologías, se analizarán los costos potenciales de operación, la complejidad y seguridad en la toma de muestras, los posibles impactos en el

cauce de la medición, y los tipos de monitoreo que estas requieren.

- Analizar las redes de medición de sedimentos internacionales tales como la red de la USGS en Estados Unidos y la SEDNET en Europa para conocer su rol en la sociedad, políticas públicas e investigación científica. Para esto se estudian los objetivos, estructura y recursos de cada institución, además de las organizaciones asociadas a estas. Se analiza en este contexto la aplicabilidad de los procedimientos extranjeros a la realidad nacional.
- Evaluar la pertinencia de la ubicación de las estaciones vigentes y/o la reapertura de estaciones suspendidas, donde se analiza la necesidad de instalar nuevas estaciones y medir nuevos parámetros como el transporte de fondo, con el propósito de modernizar la red, equipos, y procedimientos, para distintos horizontes en el tiempo de implementación. Algunos de los criterios considerados serán:
 - Representatividad del lugar de monitoreo.
 - Frecuencia del monitoreo por estacionalidad según régimen hidrológico.
 - Relevancia de los parámetros físicos para los usuarios o para el ambiente fluvial.
 - Relación con otras estaciones de la red.
- Proponer mejoras a la red basadas en las necesidades de los usuarios, las carencias de la red actual, y las experiencias internacionales. Se realizan recomendaciones de criterios específicos que permitan evaluar la ampliación de la red de medición de sedimentos, la incorporación de nuevas variables de medición, y la utilización de nuevo equipamiento en el análisis. Esta propuesta metodológica permitirá a la DGA realizar un plan estratégico con distintos horizontes de tiempo y potenciales recursos asociados, para mejorar la red. La propuesta estará fundamentada principalmente en los criterios mencionados anteriormente, y en las características geomorfológicas, climáticas, e hidrológicas de las cuencas, además de las condiciones morfológicas específicas de los cauces: caudal, variabilidad anual, pendiente, granulometría, y variables hidrodinámicas como profundidad y velocidad, entre otras. Se recomiendan instrumentos y clasifican las metodologías

propuestas de acuerdo a los rangos de velocidad y profundidad en los que operan los instrumentos, donde se hace hincapié en la seguridad de las mediciones. En la clasificación también se consideran los parámetros que se pueden obtener con el fin de evaluar si la metodología es pertinente a la zona geográfica. Otro aspecto importante a catalogar es la frecuencia de medición y la autonomía de los equipos, y la factibilidad y necesidad de medir las fracciones de transporte de fondo y en suspensión.

2. Antecedentes de la red sedimentológica nacional

La red de monitoreo sedimentológica está a cargo de la división de Hidrología y está compuesta por un total de más de cien estaciones distribuidas entre 18,38° y 54,02° de latitud sur, sin embargo, no todas se encuentran operativas actualmente. La red comenzó a desarrollarse a mediados de la década de 1960 y desde su inicio ha sido mantenida y operada por la DGA.

En esta sección, se presentan los parámetros medidos por la DGA y las metodologías e instrumentos que se utilizan actualmente. Además, se presenta un resumen de los datos disponibles y las fuentes dónde pueden ser encontrados. Finalmente, se exhiben los resultados de una encuesta realizada a los usuarios de los datos de la red de sedimentos para reconocer sus características y necesidades.

2.1. Metodologías e instrumentos de medición para el sedimento en suspensión

A continuación, se describen las metodologías e instrumentos para la medición de sedimento en suspensión que se utilizan en la red de sedimentos de la DGA actualmente, y que están descritas en el Manual de Terreno y Centros de Filtrado (Sandoval & Solar, 1988; Solar, 1999). Cabe destacar que la edición más reciente de este manual es del año 1999, por lo que mucha de la información que aparece allí no se condice con las actividades que se realizan en la actualidad. Un claro ejemplo son los tipos de mediciones mencionadas en el informe; por un lado, se señalan metodologías que se siguen implementando tales como la toma de muestras de sedimentos en suspensión y su posterior filtrado y calcinado; por otro lado, en el manual se describen procedimientos que no se realizan y que no se tiene claridad de si existen datos de mediciones pasadas, tales como granulometría del lecho y del sedimento en suspensión y contenido de materia orgánica.

2.1.1. Muestreos Superficiales o Abreviados

Los muestreos superficiales o abreviados¹ consisten en la toma de muestras puntual de agua del río en una botella desde la superficie libre del flujo. En la DGA, este tipo de muestreo es realizado diariamente, por lo que también se conoce como muestreo rutinario.

Dentro de los muestreos superficiales se encuentra el muestreo con canastillo, que consiste en lanzar desde un puente una botella contenida en un canastillo atado a un cordel (ver Figura 1). En la descripción del método de medición se indica que el canastillo debe tocar levemente la superficie del agua realizando un movimiento longitudinal al sentido del flujo, hasta llenar aproximadamente tres cuartos de la botella. Los otros dos muestreos de este tipo son los de orilla con vadeo y orilla sin vadeo. En ambos el observador debe acercarse al escurrimiento tanto como sea posible, sin arriesgar su seguridad. Posteriormente, se debe sumergir parcialmente la botella hasta alcanzar el volumen de agua deseado.



Figura 1. Canastillo y botella, muestreo en el río Biobío sector desembocadura. (Foto de Hernán Alcayaga).

En el Manual de Terreno y Centros de Filtrado (Sandoval & Solar, 1988; Solar, 1999) se indica que este proceso debe ser realizado por un observador, el que no es necesariamente un experto en el área y que debe llenar diariamente una planilla como la que se muestra en el Anexo C. Además, en el documento tan solo se especifican las funciones del observador sin incluir detalles del porqué de las mediciones, ni de las consecuencias que podría significar no seguir las instrucciones. Finalmente, se debe mencionar que en el manual no aparecen especificaciones técnicas de los instrumentos, por lo que no se tiene claridad de si hay una estandarización a lo largo del país.

2.1.2. Muestreos en Profundidad (medición integrada)

El muestreo integrado en profundidad¹ (*Depth Integrated Sampler*), que se utiliza regularmente en la DGA es conocido como "muestreo de llenado continuo de la botella en toda la vertical, en su viaje de ascenso y descenso". Este tipo de muestreo es realizado por un hidromensor de manera periódica con una frecuencia mensual. Para las mediciones se emplean diferentes tipos de instrumentos: El integrador DH-48 que se muestra en la Figura 2, está diseñado para corrientes poco profundas y velocidades menores a 1 m/s. También se utilizan los integradores D-49, o el D-74, los que están diseñados para ríos de hasta 6 m de profundidad. La gran diferencia de este tipo de integradores con el DH-48, es que los instrumentos D-49 y D-74 deben estar suspendidos de un torno. Finalmente, se utiliza el integrador D-59 que aparece en la Figura 3, el que debe ser sujetado a mano, y está diseñado para ríos muy profundos.

1 Actualmente en la DGA se habla de Muestreo Rutinario y Muestreo Integrado, lo que no es adecuado, ya que uno denota una característica temporal, mientras que el otro, una espacial. Lo correcto es referirse a Muestreo Rutinario y Muestreo Periódico, o Muestreo Superficial y Muestreo Integrado.



Figura 2. Muestreador tipo DH-48: DGA Ñuble. (Foto de Hernán Alcayaga)



Figura 3. Muestreador tipo DH-59: DGA Ñuble. (Foto de Hernán Alcayaga)

A diferencia de los Muestreos Superficiales, los Muestreos en Profundidad cuentan con instrucciones precisas, y adicionalmente se detallan claramente el modelo de los

instrumentos, el número y tamaños de las muestras y los tiempos de medición (Sandoval & Solar, 1988; Solar, 1999).

2.1.3. Procedimientos en los centros de filtrado y en el laboratorio

Posterior a la recolección de muestras en las botellas, estas son rotuladas y llevadas al centro de filtrado local, donde se registra el nombre de la estación y la fecha y hora, además son ordenadas cronológicamente y pesadas con y sin tapa. Después de esto, las muestras son filtradas utilizando un embudo Buchner y una bomba de vacío (ver Figura 4), posteriormente, los filtros con sedimentos son introducidos en un horno de secado, para luego ser pesados y enviados al laboratorio hidrológico nacional. En el laboratorio las muestras son analizadas y calcinadas en los hornos de calcinación (ver Figura 5) y los resultados son subidos en el BNA. Finalmente, solo los datos de muestreos superficiales son publicados en el sitio web del SNIA (DGA, n.d.).

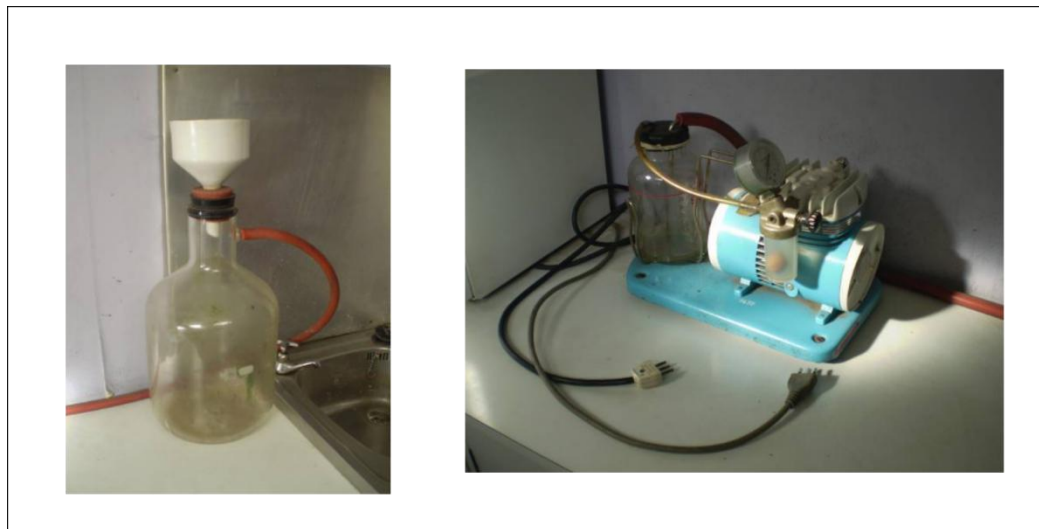


Figura 4. Sistema de filtración. A la Izquierda: botella, embudo de Buchner (porta filtro). A la derecha: bomba de vacío (DGA Ñuble, Foto de Hernán Alcayaga).

Como parte del presente trabajo, se realizó una visita al laboratorio nacional al que

llegan todas las muestras de sedimentos. Allí se pudo observar que el lugar no cuenta con estándares mínimos de medición, tales como regulación de la temperatura, o guías de registro de ingreso, toma de muestras y calibración de instrumentos. Además, el tamaño del laboratorio es muy limitado, por lo que no hay un espacio apropiado para almacenar las muestras y trabajar de manera adecuada con estas.



Figura 5. Mufla de calcinado del laboratorio de la red sedimentológica de la DGA y a la derecha balanza de precisión 0.0001 g. (Foto de Karina Soto Rivas).

2.2. Características de los datos disponibles

2.2.1. Ubicación de las estaciones

La red de sedimentos de la DGA ha tenido más de 100 estaciones en operación desde el inicio de su funcionamiento, sin embargo, actualmente hay 72 estaciones vigentes distribuidas a lo largo del país. En las Figuras 6 y 7 se muestra un mapa con la ubicación de los puntos de muestreo en las cuencas del territorio nacional. La imagen exhibe una heterogeneidad en la distribución de las estaciones, donde se observa que la gran mayoría se encuentra en la zona centro y sur del país, mientras que en el norte grande y en gran parte de la zona austral hay una muy baja densidad de puntos de monitoreo.

Uno de los indicadores empleados para analizar el área cubierta por las estaciones, es la razón entre el área de la cuenca en km^2 y el número de puntos de monitoreo que ella contiene. En la Tabla 1, se muestran todas las cuencas del país que cuentan con estaciones sedimentológicas, donde se observa que la cobertura de los puntos de medición fluctúa entre los 2.000 y 17.000 km^2 . Estos números son muy superiores a los recomendados por la WMO, (1994), que aconseja una cobertura en un rango de 1.000 a 2.500 km^2 por estación para regiones planas, de 300 a 1.000 km^2 para zonas montañosas, y de 140 a 300 km^2 para zonas montañosas pequeñas con precipitaciones irregulares. A lo anterior se le debe añadir que de las 143 cuencas que componen el territorio nacional tan solo 29 contienen estaciones sedimentológicas, lo que demuestra la baja extensión de las áreas monitoreadas. Estudios anteriores indicaron que no es posible alcanzar la densidad de estaciones recomendadas para la red fluviométrica la DGA, debido a los costos económicos asociados (BF Ingenieros Civiles, 1983). No obstante, no se debe descartar seguir las recomendaciones de la WMO acerca del número de estaciones de monitoreo en las cuencas de mayor relevancia en el país, y seguir un procedimiento basado en las condiciones hidrometeorológicas y las características específicas de cada cuenca como se explica en las secciones subsecuentes del presente informe.

Actualmente no existen parámetros claros para evaluar la ubicación ni la cantidad de las estaciones, por lo que es muy probable que existan zonas donde sea relevante medir el transporte de sedimentos y que no están siendo monitoreadas. Además, en las Figuras 6 y 7 se puede ver que las estaciones se encuentran principalmente dentro de las cuencas, y no en los puntos de salida, donde la medición de sedimentos podría ser valiosa para entender los procesos de erosión, transporte y depositación al

nivel de la cuenca completa, y cuantificar los aportes a humedales y estuarios en las desembocaduras, la recarga de playas, y el equilibrio de la morfología costera.

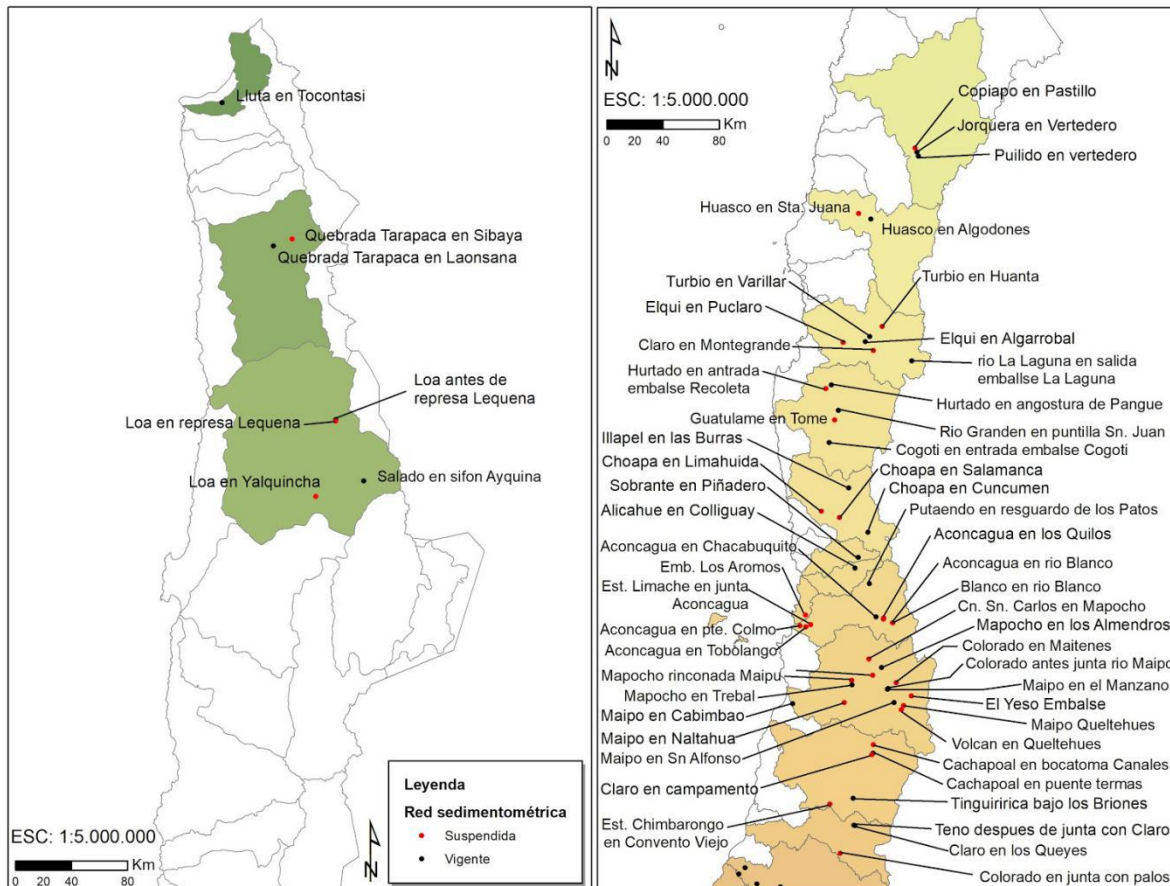


Figura 6. Ubicación de las estaciones de monitoreo ubicadas desde la R. de Arica y Parinacota hasta la R. del Maule, coloreadas por cuencas (Elaboración propia, basada en la información proporcionada por DGA, 2020b)

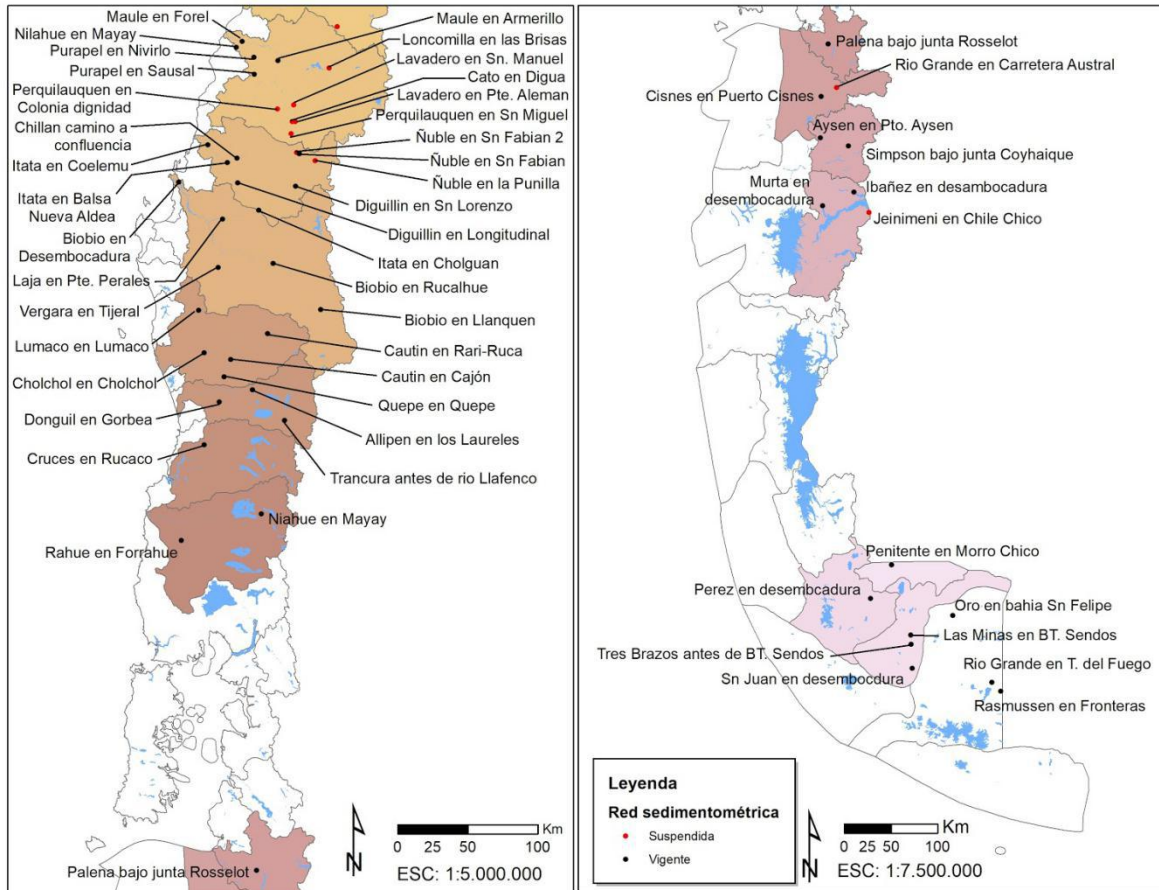


Figura 7. Ubicación de las estaciones de monitoreo ubicadas desde la R. del Maule hasta la R. de Magallanes, coloreadas por cuencas (Elaboración propia, basada en la información proporcionada por DGA, 2020b)

Tabla 1. Déficit de estaciones por cuenca calculado a partir de las recomendaciones de la WMO (1994). Para esto se consideró que las cuencas se clasifican como montañosas, con excepción de las de Tierra del Fuego y Vertiente del Atlántico que corresponden planicies. Nota: Números de déficit negativos indican que las cuencas tienen más estaciones de las recomendadas.

Cuenca	Región	Área (km ²)	N° Estaciones	Área(km ²) / Estación	Déficit teórico de estaciones en la cuenca (N° Estaciones)
Río Lluta	XV	3.437	1	3.437	2
Pampa del Tamarugal	I	17.354	1	17.354	16
Río Loa	I - II	33.083	3	11.028	8
Río Copiapó	III	18.704	2	9.352	7
Río Huasco	III - IV	9.814	1	9.814	9
Río Elqui	IV	9.826	3	3.275	0
Río Limarí	IV	11.696	3	3.899	1
Río Choapa	IV	7.654	2	3.827	2
Río Petorca	V	1.988	1	1.988	1
Río Ligua	V	1.980	1	1.980	1
Río Aconcagua	V	7.334	2	3.667	2
Río Maipo	V - XIII - VI	15.274	6	2.546	-3
Río Rapel	V - XIII - VI - VII	13.767	2	6.884	5
Río Mataquito	VII	6.332	2	3.166	1
Río Maule	VII - VIII	21.054	5	4.211	-1
Río Itata	VII - VIII	11.327	7	1.618	-5
Río Biobío	VIII - IX	24.371	5	4.874	0
Río Imperial	IX	12.669	5	2.534	-2
Río Toltén	IX	8.449	3	2.816	0
Río Valdivia	IX - XIV	10.245	1	10.245	9
Río Bueno	X - XIV	15.367	2	7.684	6
Río Palena y Costeras Límite Décima Región	X - XI	7.733	1	7.733	7
Costeras e Islas entre Río Palena y Río Aysén	XI	17.200	1	17.200	16
Río Aysén	XI	11.457	2	5.729	4
Río Baker	XI	20.947	2	10.474	8
Costeras e Islas entre Río Hollemberg, Golfo Alte. Laguna Blanca	XII	20.668	1	20.668	20
Costeras entre Lag. Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	XII	17.765	3	5.922	3
Vertiente del Atlántico	XII	9.335	1	9.335	3
Tierra del Fuego	XII	42.223	3	14.074	3

2.2.2. Historial de medición

La frecuencia en la toma de muestras y extensión de las series de medición indica la cantidad de datos disponibles en cada sitio. Las Figuras 8 y 9 muestran el porcentaje de mediciones superficiales realizadas anualmente para las estaciones suspendidas y vigentes, respectivamente, donde los puntos de monitoreo están ordenados de izquierda a derecha, de Norte a Sur. Ambas imágenes revelan muestreos intermitentes en el tiempo para un mismo punto de medición, lo que implica que para algunos años no existen datos en ciertas estaciones del año (invierno, primavera, verano, otoño). Lo anterior no implica un problema necesariamente, ya que para algunas zonas del país la toma de datos se hace más relevante solo en algunos períodos asociados a transporte significativo. Sin embargo, en muchos casos no se pueden observar patrones temporales dentro de un mismo punto de monitoreo o concluir a priori una razón que justifique las discontinuidades en la medición.

A pesar de las intermitencias observadas en la frecuencia de toma de muestras en varias estaciones, en el área centro y sur del país se muestra una mayor continuidad en los datos, donde varias de las estaciones comienzan a funcionar alrededor del año 1985, y continúan haciéndolo hasta la fecha, con porcentajes de mediciones anuales por sobre el 80% (ver Figura 9). Cabe destacar que las estaciones en el río Maipo contienen una gran cantidad de datos que poseen una información crítica para comprender la dinámica de los sedimentos, su relación con intervenciones antrópicas, y los impactos sobre actividades económicas, riesgo, y desarrollo urbano, especialmente en una cuenca que posee una gran importancia económica en el país.

En la Figura 9 se puede observar también un gran número de puntos de muestreo con un porcentaje de medición casi nulo, que puede pasar desapercibido en el gráfico. Debido a esto es necesario reconsiderar la continuidad de dichas estaciones, ya que la cantidad de datos recolectados no es suficiente para realizar un análisis adecuado del transporte de sedimentos en esas zonas.

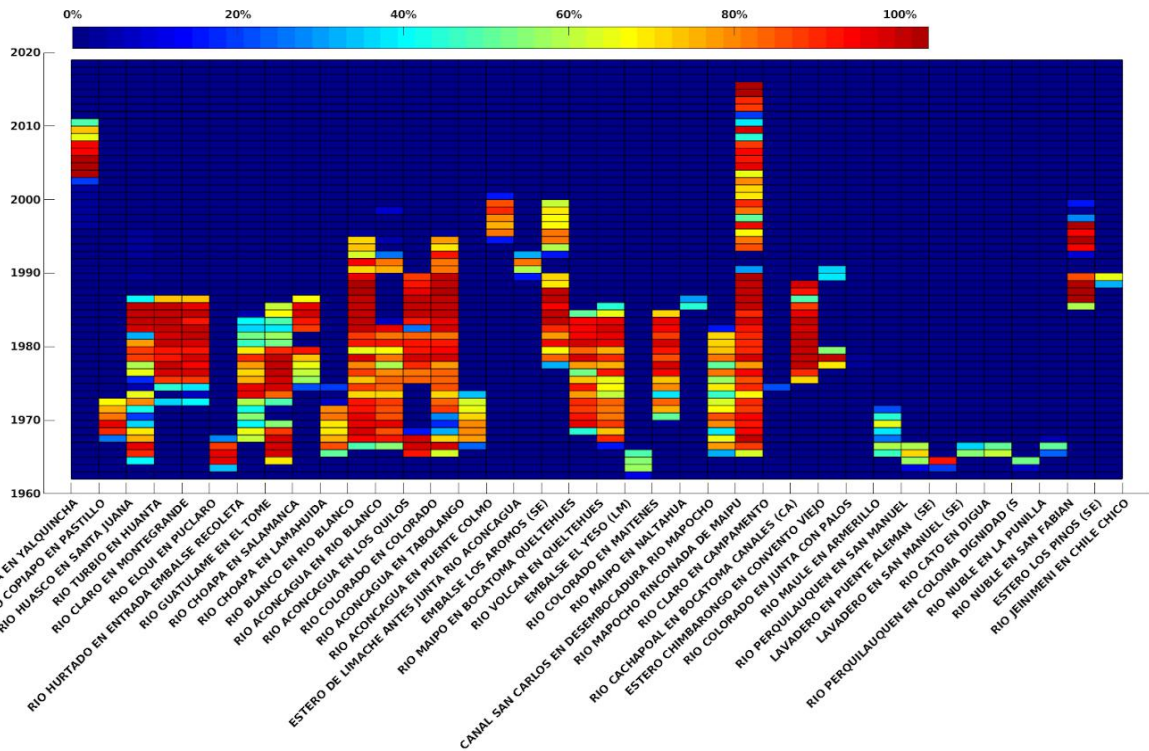


Figura 8. Porcentaje de mediciones diarias (superficiales) tomadas anuales para las estaciones que actualmente se encuentran suspendidas. (Elaboración propia elaborada en base a información proporcionada por la DGA).

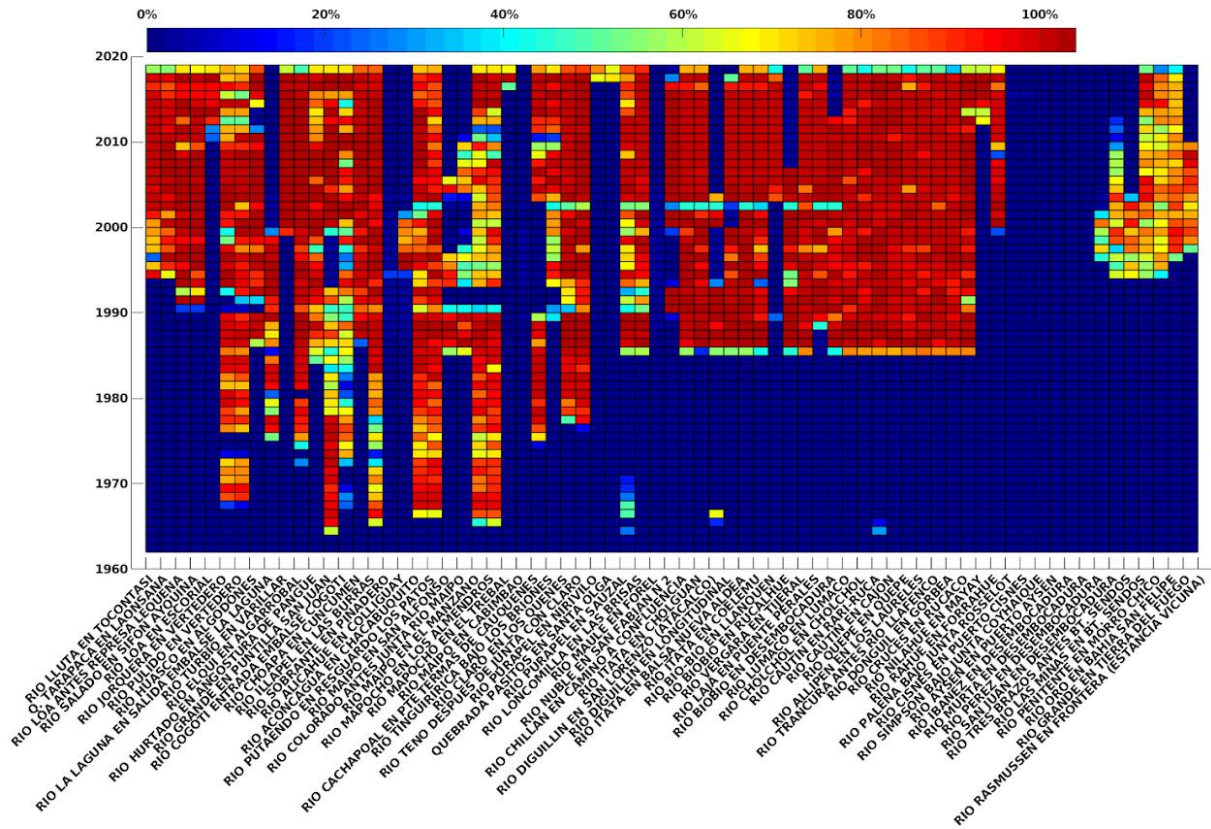


Figura 9. Porcentaje de mediciones diarias (superficiales) tomadas anuales para las estaciones que actualmente se encuentran vigentes. (Elaboración propia elaborada en base a información proporcionada por la DGA).

2.2.3. Acceso a la información

A continuación, se presentan las diferentes fuentes de datos sedimentológicos que entrega la DGA:

- Sitio web de la Red Hidrométrica (DGA, 2020c)

En este sitio web se muestra un mapa con la ubicación de las estaciones vigentes de la red, estaciones fluviométricas, de calidad de agua y meteorológicas. Al presionar en el mapa en cualquiera de las estaciones, se despliega un cuadro con el nombre, código, y cuenca donde se encuentran.

- Sitio web del Observatorio Georreferenciado (DGA, 2020b)

Este sitio web es mucho más completo que el de la Red Hidrométrica, ya que muestra la ubicación de las estaciones sedimentométricas, fluviométricas, de calidad de agua y meteorológicas, tanto vigentes como suspendidas. Además, ofrece la opción de mostrar diferentes mapas que muestran la ubicación de cuencas y subcuencas, fuentes de agua superficiales y subterráneas, obras hidráulicas, áreas protegidas, entre otras.

Este sitio ofrece la opción de mostrar un gráfico que muestra altura, gasto, caudal y concentración de sedimentos a través del tiempo. Sin embargo, la cantidad de datos que se presentan son limitados en comparación con los que realmente se han medido. La gran mayoría de los gráficos contienen datos de una sola fecha en todo el período de medición, y otros incluso no muestran ningún tipo de información.

Otra falencia de esta página es que las estaciones vigentes no coinciden con las mostradas en el sitio de la Red Hidrométrica. De hecho, al consultar esta información directamente con personal de la DGA, se concluyó que ninguno de los dos sitios web contiene la información correcta sobre las 72 estaciones que efectivamente están operativas.

- Sitio web de Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea (DGA, n.d.)

En esta página web se pueden descargar planillas con reportes de sedimentos,

de calidad de aguas, de pozos, fluviométricos y meteorológicos para cada estación en un rango máximo de 4 años de medición. En particular, los datos sedimentométricos informan sobre el muestreo rutinario, donde se incluye la fecha de medición, altura de agua, concentración de sedimentos, caudal y gasto.

A pesar de que esta fuente de datos es la más completa que existe en línea, no entrega datos de los muestreos integrados, los que se realizan actualmente con una frecuencia mensual.

- BNA2000

El BNA es una base de datos nacional, en particular, en el BNA2000 se encuentran los resultados de las mediciones sedimentométricas rutinarias e integradas. Los datos de las mediciones rutinarias son los mismos que se pueden encontrar en el sitio web de Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea, mientras que la información de los muestreos integrados sólo es encontrada en esta base de datos. Es importante mencionar que esta información no está abierta al público general, y que para acceder a ella es necesario contactar al personal de la DGA, a través de la Ley de Transparencia.

2.3. Características de los usuarios de los datos sedimentológicos y de sus necesidades

La situación actual de la red de medición de sedimentos y la recopilación de datos descritos en las secciones anteriores permite proyectar los desarrollos futuros de la red, que deben cumplir el rol de proveer la información necesaria para realizar estudios en ambientes fluviales, y evaluar los impactos de actividades económicas en las cuencas. Es por ello que el análisis de su definición y funcionamiento debe complementarse con el uso y necesidades de usuarios actuales y futuros de los datos sedimentológicos. Para esto, se diseñó y realizó una encuesta con el objetivo de entender el uso de los datos e identificar las zonas de interés para la medición, características y frecuencia de los datos que se necesitan, falencias en la calidad y acceso de los datos de la DGA, y la opinión de los usuarios acerca de cómo deberían gestionarse la información sedimentológica en el país.

La encuesta fue distribuida a nivel nacional en instituciones públicas y privadas, universidades y centros de investigación, entre otras. El total de respuestas recibidas fue de 176, las que fueron clasificadas en tres grupos: i) personas han usados datos, ii) personas que no requieren datos sedimentométricos, y iii) usuarios o futuros usuarios de estos datos, tal como se muestra en la Figura 10. A continuación, se presenta un análisis de las respuestas, mientras que en el Anexo 1 se muestran todos los datos recopilados de la encuesta.

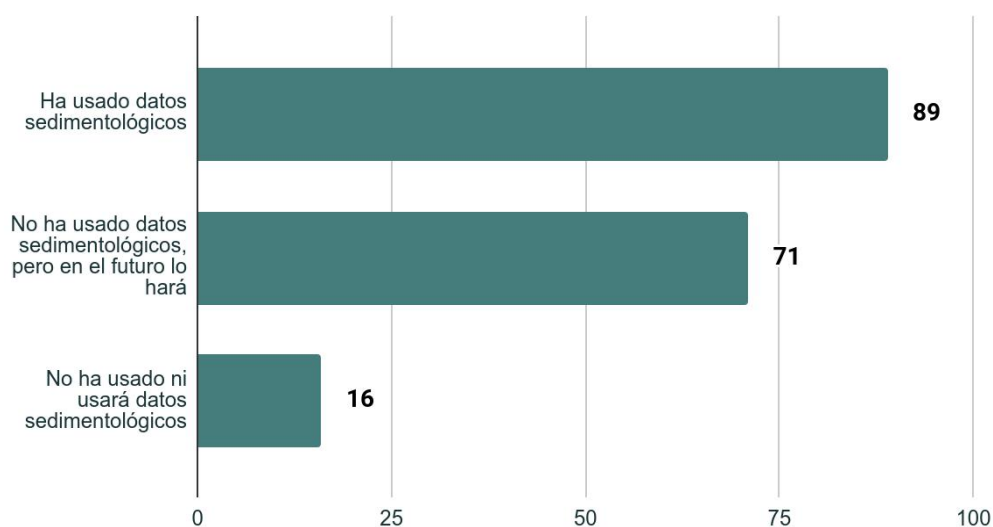


Figura 10. Número total de encuestados clasificados en usuarios y no usuarios de datos sedimentológicos.

2.3.1. Reconocimiento de los usuarios de datos sedimentológicos

En primer lugar, se consultó por la ocupación de los usuarios, donde las opciones fueron: Instituciones académicas, centros de excelencia en investigación, consultorías, sector público, ONGs y empresas privadas. La encuesta revela que la gran mayoría de los encuestados se desenvuelve en áreas de consultoría y en instituciones

académicas, seguidos por el sector público (ver Figura A1). Es importante mencionar que el total de respuestas de este ítem supera el número total de usuarios y futuros usuarios que respondieron la encuesta, debido a que algunos de ellos se desenvuelven en más de un área.

Luego, se preguntó la zona geográfica en donde los encuestados realizan sus labores (ver Figura A2). La gran mayoría de los usuarios se encuentran en la Región Metropolitana, superando el 50%, luego, se encuentran las regiones de Coquimbo, del Biobío y de Valparaíso, con un 18,1%, 9,4% y 8,8%, respectivamente. Para hacer el análisis mucho más acotado, se preguntó por la provincia en donde desempeñan sus labores, donde aproximadamente un 48% corresponde a la Provincia de Santiago, seguidos por un 8,8% correspondiente a la Provincia de Concepción y un 6,3% a la Provincia de Valparaíso. A pesar de que gran parte de los encuestados realizan sus labores en las tres provincias mencionadas anteriormente, hay tan solo una estación de monitoreo en las provincias de Santiago y de Concepción, mientras que en la Provincia de Valparaíso no existe ningún punto de monitoreo. Se debe mencionar que no hay ninguna provincia de la Región de Coquimbo que se destaque por tener un número importante de usuarios, lo que significa que a pesar de que una gran cantidad de usuarios se desenvuelve en la Región de Coquimbo, todos ellos están distribuidos en diferentes provincias.

2.3.2. Características de los datos requeridos por los usuarios

Respecto a los datos requeridos por los usuarios, se identificó a la concentración de sedimentos en suspensión como la información que más se necesita actualmente, lo que corresponde a los datos medidos y publicados por la DGA. Sin embargo, la necesidad de datos que no son medidos por la DGA; como la granulometría del lecho y de sedimentos en suspensión, el transporte de fondo, y la composición de los sedimentos, son casi tan requeridos como la concentración de sedimentos en suspensión. Adicionalmente los usuarios mencionan la necesidad de conocer compuestos adsorbidos y el porcentaje de materia orgánica en los sedimentos (para más detalles ver Figura A3).

Sumado al tipo de datos, la frecuencia de muestreo es una característica necesaria para escoger las metodologías e instrumentos adecuados para obtener la información

que los usuarios requieren. Actualmente, la DGA proporciona muestreos diarios, por lo que se pueden obtener estadísticas con intervalos de tiempo iguales o superiores a los diarios, sin embargo, en algunas situaciones los usuarios requieren datos con una frecuencia a nivel horaria. En cuanto a mediciones de mayor frecuencia (sub-horaria), la encuesta revela que la cantidad de usuarios que las requieren es mucho menor que los usuarios de datos con menor frecuencia (para más detalles ver Figura A4).

2.3.3. Opinión de los encuestados acerca de los datos proporcionados por la DGA

Del total de encuestados que actualmente usan datos sedimentológicos, 70 de ellos ha utilizado los datos proporcionados por la DGA, de los cuales un 70% (48 usuarios) no ha encontrado toda la información que requería (ver Figuras A5 y A6). Luego, a los usuarios que no encontraron todo lo que buscaban, se les preguntó por los problemas que tuvieron con los datos. La encuesta reveló que la gran mayoría de los usuarios no encontró las mediciones que necesitaba, ni datos en el período y en el lugar requerido. Los siguientes problemas más frecuentes fueron que los encuestados no encontraron mediciones con la frecuencia deseada, y que tuvieron problemas para encontrar la información. Finalmente, los problemas menos recurrentes fueron encontrar incongruencias y poca claridad en los datos (para más detalles ver Figura A7).

2.3.4. Opinión de los usuarios acerca del enfoque que debería adoptar la DGA.

Al total de usuarios y futuros usuarios de los datos se les pidió que escogieran las tres opciones que consideran más importantes sobre el enfoque de la red de sedimentos. La gran mayoría de los encuestados cree que la red debería tener un enfoque medioambiental, donde se consideren la conservación de hábitats y especies, además de promover un desarrollo sustentable que considere los ambientes fluviales. En segundo lugar, los usuarios consideran que la red debería dedicarse a la prevención y manejo de inundaciones y eventos de contaminación. Finalmente, los usuarios creen que la red debería enfocarse en la fiscalización, ya sea en la

extracción ilegal de áridos, modificaciones de cauces, liberación abrupta de sedimentos, entre otros (para más detalles ver Figura A8).

Con respecto a la forma de gestión que se debería adoptar para la red, más de la mitad de los usuarios cree que la DGA debería ser responsable de almacenar y dar acceso a la información, utilizando datos propios y externos, provenientes de otras organizaciones públicas, del sector privado y de instituciones académicas. En segundo lugar, alrededor de un 40% considera que la DGA debería usar sus propios datos, y dar acceso a ellos. Finalmente, un 10% de los encuestados cree que la DGA solo debería administrar los datos, mientras que la responsabilidad de medirlos y almacenarlos debería ser entregado a terceros mediante licitación pública (para más detalles ver Figura A9).

Al finalizar la encuesta, los usuarios tuvieron la oportunidad de dejar comentarios. En la Tabla A1 se presentan sus respuestas, las que fueron clasificadas en 5 categorías numeradas desde las más, a las menos comentadas: 1) Ampliación de la red: nuevas mediciones y colaboraciones, 2) Mejoramiento de estándares y confiabilidad de los datos, 3) Mejoramiento y modernización del sistema y/o los instrumentos, 4) Acceso a los datos y 5) Misión de la red de sedimentos.

3. Estado del arte

3.1. Procesos de transporte y carga de sedimentos

La carga total de sedimentos en los cursos de agua puede clasificarse usando dos criterios: según su fuente y según su modo de transporte. De acuerdo con Morisawa (1968), la carga total de sedimentos en ambientes fluviales puede dividirse en dos tipos según su fuente: carga disuelta o de lavado y carga sólida o de partículas que componen el lecho (ver figura 11). La primera es relativa al transporte en fase disuelta de minerales, principalmente iones (e.g. Ca, Na, HCO₃, SO₄, Cl, NaK y SiO₂) que en algunos ríos y esteros puede ser más importante que el transporte de partículas sólidas en términos de masa, sobre todo cuando se tienen condiciones predominantes de caudales base. Sin embargo, la generalidad es que la carga sólida (diámetros > 0,45 μm) es el modo dominante de transporte (Hicks & Gómez, 2016) y es en este tipo de carga donde se enfocarán la descripción de los procesos de este informe. Desde el punto de vista del modo de transporte, la carga sólida a su vez puede ser dividida en carga en suspensión y carga de fondo (Einstein et al., 1940).



Figura 11. Esquema de clasificación de la carga de sedimentos en ambientes fluviales según fuente y modo de transporte (modificado desde Hicks & Gómez, 2016).

En general, el transporte en suspensión es limitado por la cantidad material

disponible, la alimentación sólida de aguas arriba (*sediment supply*) y en cambio el transporte de fondo es típicamente controlado por la capacidad de transporte del flujo (*transport capacity*).

3.1.1. Carga y transporte en suspensión

La carga en suspensión está compuesta por partículas de diámetros más finos que las que componen el lecho y el transporte se produce en la columna de agua (donde se desarrolla el campo de flujo), debido a la turbulencia que las mantiene en suspensión. En este modo de transporte, las fuerzas sobre las partículas ligadas a la sedimentación son menores que las fuerzas hidrodinámicas que las mantienen en suspensión (Morisawa, 1968).

La distribución de la carga en suspensión varía con la profundidad, es así como las concentraciones más altas son esperadas a mayores profundidades, cerca de la superficie del lecho, mientras que puede disminuir rápidamente cuando se acerca a la superficie. La mezcla de partículas dependerá de la energía turbulenta del flujo, que genera una distribución más homogénea de concentración en la columna de agua para una misma distribución granulométrica. Existe una variación clara en las concentraciones de sedimentos en suspensión a varias profundidades en un cauce para granos de diferentes tamaños, en términos generales, a mayor diámetro, el transporte en suspensión se realiza más cercano al lecho. El tipo de partículas minerales en este modo de transporte son usualmente arenas, limos y arcillas. Los sedimentos que son transportados en suspensión también pueden formar parte de la estructura del lecho, a este tipo de sedimento se le llama carga en suspensión del material del lecho (*suspended bed material load*).

Una de las variables asociadas al transporte de la fracción fina es la erosionabilidad de la cuenca, la que está directamente relacionada con el aporte de sedimentos desde las laderas hacia la corriente principal durante tormentas que generan escorrentía. Una forma de estimar esta variable es usando el factor de erosionabilidad o erodabilidad del suelo (conocido como factor-K), el que determina la susceptibilidad del suelo a ser erosionado y que es comúnmente usado en los modelos USLE, RUSLE y MUSLE. Este factor se calcula a partir de mediciones de escorrentía durante un largo período de tiempo, sin embargo, en Chile no existen las mediciones suficientes para determinarlo. Ante la falta de datos, Bonilla & Johnson

(2012) propusieron calcular el factor de erosionabilidad utilizando muestras de la composición de sedimentos, e incorporando factores que determinan la llegada de sedimentos finos a los cauces como las pendientes de las laderas, energía cinética de la lluvia (erosividad), cobertura vegetal y el manejo de la ladera (prácticas de manejo del territorio). En su trabajo, Bonilla & Johnson (2012) presentan un mapa del factor K calculado para la zona central de Chile, donde valores altos representan zonas más susceptibles a ser erosionadas (ver Figura 12), y que por lo tanto podrían tener una carga mayor de sedimento en suspensión ante eventos de tormenta. El sedimento más fino no siempre interactúa directamente con el lecho, pero tiene influencia en zonas de depositación como planicies de inundación o en estuarios y la costa.

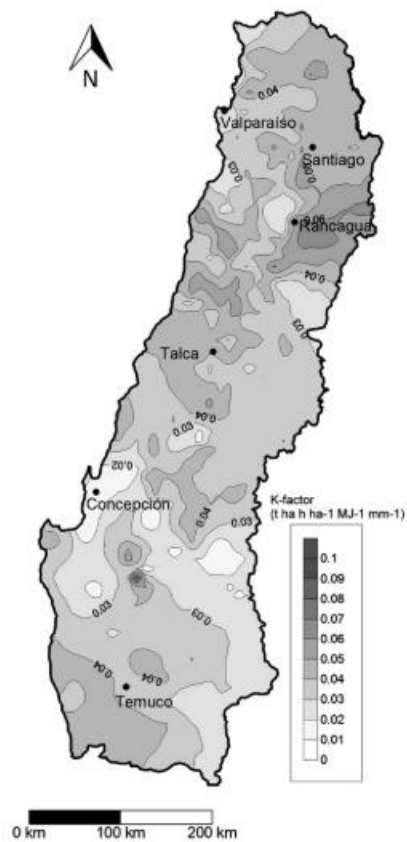


Figura 12. Mapa de erosionabilidad para la zona central de Chile, obtenido de Bonilla & Johnson (2012). Zonas con valores altos del factor-K indican mayor susceptibilidad del suelo a la erosión.

El tipo de muestreo y el monitoreo de sedimentos en suspensión depende de los objetivos de observación, y las escalas espaciales y temporales asociadas a los procesos fluviales de interés (si se requiere medir de manera continua durante un evento de crecida o si se necesita la estadística a largo plazo para determinar cargas anuales y realizar balances de masa). Según la literatura técnica y científica, y usando como criterio la frecuencia de las mediciones, existen dos tipos de monitoreos de sedimentos en suspensión: el monitoreo rutinario y el monitoreo continuo.

- Monitoreo rutinario

Internacionalmente se aceptan y utilizan para este tipo de monitoreo dos tipos de instrumentos: muestreo integrado puntual (*point integrated sampler*) y el tipo integrado en profundidad (*depth-integrating*). Típicamente, para el muestreo integrado puntual se utiliza el muestreador US P-61a (USGS, 2014a) y en el muestreo integrado en profundidad muestreador US DH-48 (USGS, 2014b). Estos dos muestreadores son similares, pero la diferencia radica en el sistema de la boquilla interna. La boquilla del US DH-48 se mantiene abierta cuando el muestreador atraviesa, a una velocidad uniforme, desde la superficie del agua hasta el lecho y viceversa. Existen otros tipos de muestreadores recomendados por el *US Federal Interagency Sedimentation Project (FISP)* de Estados Unidos, que dependen del contexto local del punto a monitorear. En estos equipos la letra P o D corresponden a la descripción de "puntual" y a "profundidad", y el número corresponde al año en el que fueron desarrollados. La mayoría de los muestreadores del tipo P y D pueden ser utilizados con un equipo de suspensión con cable o con una barra para el vadeo, pero también pueden conectarse con un sistema de bombeo (manual o automatizado), y la muestra utilizada se almacena en un contenedor fuera del agua (Eads & Thomas, 1983). Este último sistema de bombeo es menos utilizado, y se debe tener especial cuidado cuando el muestreo se realiza en ríos con lechos de arena, ya que se puede bombear parte del sedimento del lecho, obteniendo de esta manera concentraciones más altas e incorrectas.

Las variaciones de la concentración de sedimentos en suspensión en una sección transversal pueden ser significativas, al menos para las fracciones más gruesas y arena fina. Cuando el punto monitoreado presenta meandros o un

tramo tiene múltiples brazos del cauce, se recomienda efectuar la toma de múltiples muestras en la sección transversal. Los puntos de muestreo deben estar espaciados a intervalos iguales considerando el ancho del cauce, o bien que las subsecciones contengan porciones similares del caudal total.

- Monitoreo continuo y cuasi-continuo.

Cuando las concentraciones de sedimentos en suspensión o el caudal cambian rápidamente es recomendado realizar muestreos automáticos. Esto puede ocurrir en cauces cuyas cuencas presentan menores tiempos de respuesta frente a eventos de precipitación, cuencas pequeñas o cabeceras de cuencas expuestas a tormentas con lluvias intensas de tipo convectivas, y donde la cubierta de vegetación es escasa.

Al comparar el monitoreo del tipo rutinario con el continuo, se puede indicar que el primero consume mucho tiempo en campañas de terreno y análisis de laboratorio, por lo tanto, es más caro. Al contrario, el monitoreo continuo permite obtener más datos y de esta manera alcanzar una mejor comprensión del proceso de transporte y de la carga durante los eventos hidrometeorológicos descritos anteriormente.

El muestreo continuo (o casi continuo) puede ser realizado mediante la toma manual de muestras, pero en zonas remotas o para cuencas de respuesta rápida, se utilizan muestreadores automáticos como los introducidos por Walling & Teed (1971) o del tipo ISCO, patentado y comercializados desde 1980 por Teledyne (Martínez-Carreras et al., 2020). Estos muestreadores tienen una capacidad de 24-48 botellas de un litro y también permiten, en el caso de ser necesario, que las muestras sean refrigeradas e integrar muestras en el tiempo en una misma botella.

Las muestras de agua pueden ser analizadas para sólidos suspendidos totales, y también para otros parámetros de calidad que se requieran (nutrientes, pH, conductividad eléctrica, entre otros). La desventaja de este tipo de equipos son los posibles problemas de fallas del mecanismo, capacidad de bombeo (típicamente permiten una altura de carga de 5 a 8.5 m metros, por ejemplo, el modelo ISCO 6712 *full-size portable sampler*), y si el punto de monitoreo se encuentra muy cercano al lecho, es posible que se perturbe la muestra por la

extracción de partículas del lecho. Independientemente de si se usa para el muestreo rutinario o continuo, la toma de muestras manual o automatizada debe considerar una integración de muestras en la transversal, en el caso de que la concentración no tenga una distribución homogénea en la sección.

Si es necesario medir a una frecuencia muy alta, el monitoreo con equipos de medición indirecta es recomendada debido a que su costo es relativamente bajo. En estos casos los sensores ópticos requieren la calibración de ecuaciones que relacionan la señal del sensor y la concentración de sedimentos en suspensión, típicamente esta relación es lineal y es fácil de obtener. El sensor óptico más utilizado en este tipo de monitoreo continuo y de alta frecuencia es mediante turbidímetros. En una extensa revisión sobre relación entre turbidez y concentración de sólidos suspendidos realizada por Bin-Omar & Bin-MatJafri (2009), se encontraron coeficientes de correlación en el rango de 0.98-0.99 para concentraciones de 0 a 1000 mg/l. En la década del 2000, los turbidímetros tenían capacidad de medir en el rango de los 2000 NTU, lo que corresponde a aproximadamente 5000 mg/l, pero recientemente está disponible una nueva generación de sensores inteligentes (*smart sensors*) que tienen la capacidad de medir de manera adecuada hasta 200 gr/l. Los equipos ópticos requieren de una mantención mínima, principalmente la limpieza del sensor óptico, evitando el crecimiento de algas o macro-invertebrados que obturan el lente. Para evitar estos problemas y disminuir el número de mantenciones existen soluciones del tipo bio-repelentes, con aleaciones de cobre o capas de polímeros.

Adicionalmente, existen sensores acústicos de señal activa, menos económicos y de más difícil manipulación, los *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) que pueden ir montado en un bote y permiten obtener el perfil completo de concentraciones y velocidades del flujo, pero también requieren de una calibración y la manipulación de datos que es más compleja que el caso de los sensores ópticos. Los ADCP pueden ser instalados en el lecho (fondeados) en ríos más profundos para obtener perfiles de concentraciones y velocidades en una columna vertical de agua en el tiempo. La medición con ADCP depende de la intensidad de los haces acústicos (frecuencia), de las propiedades del agua, de la atenuación, difusión y retrodifusión (*Acoustic Back-Scattering, ABS*) de la señal acústica y a la vez de la concentración de sedimentos y del tamaño de

las partículas (Gray & Gartner, 2009). La limitación de mediciones con instrumentos acústicos radica en poder realizar la distinción entre la variación del ABS debido a la concentración y debido al efecto del tamaño de las partículas. Esta dificultad puede ser manejada con equipos que tienen múltiples intensidades acústicas (*multiple-beams*), como los ADCP S5 y M9 de Sontek o los ADCP RiverPro y Workhorse Sentinel de RD Instrument Teledyne.

En un reciente estudio llevado a cabo por Pomázi & Baranya (2020), en el que se investigan las ventajas y limitaciones de los dispositivos ópticos y acústicos, se cuantifican las incertidumbres y se proporciona una evaluación comparativa completa de los métodos indirectos mencionados anteriormente. La comparación se realiza para cuatro técnicas indirectas diferentes usando un i) LISST-Portable XR (basado en difracción láser); ii) el turbidímetro VELP TB1 (basado en el rango de frecuencia de infrarrojos); iii) el sensor acústico LISST-ABS (sensor acústico de retrodispersión); y iv) un ADCP de 1200 kHz Teledyne RD Instruments. Este análisis proporciona una evaluación cualitativa y cuantitativa de su aplicabilidad, y también sugiere una metodología de seguimiento. Se demostró que las lecturas de los instrumentos indirectos son comparables a la de técnicas tradicionales directas (las de filtrado y pesado), siendo los métodos indirectos más económicos y consumen un menor tiempo de análisis, pero la calibración de estos es una etapa crucial. Finalmente indican que, para rangos altos de concentración, los métodos ópticos funcionaron mejor que los acústicos.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las distintas metodologías descritas para monitorear el transporte de sedimentos en suspensión.

Tabla 2. Resumen de los tipos de muestreo y monitoreo de transporte de sedimento en suspensión.

Metodología	Ejemplos de Instrumentos	Tipo de datos	Manipulación	Medición	Monitoreo	Desventajas
Muestreo integrado puntual	US P-61a	Concentración puntual de sedimentos en suspensión.	Vadeo manual o automatizado con bomba.	Directa	Rutinario	Muestras no representativas para ríos con concentración no homogénea de sedimentos.
Muestreo integrado en profundidad	US DH48	Promedio vertical de concentración de sedimentos en suspensión.	Vadeo manual o automatizado con bomba.	Directa	Rutinario	Al bombear se podría levantar sedimentos del lecho.
Muestreo en profundidad automático	ISCO 6712	Sedimentos en suspensión en cuencas de respuesta rápida.	Se utilizan muestreadores automáticos con capacidad de 24 a 48 botellas.	Directa	Continuo	Posibles problemas de fallas del mecanismo y/o capacidad de bombeo.
Sensores ópticos	Turbidímetro OBS 300	Aproximación de la concentración usando la turbidez, para mediciones de muy alta frecuencia.	Sensores son automáticos y requieren de una mínima mantención.	Indirecta	Continuo	Asume una distribución lineal de sedimentos.
Sensores Acústicos	ADCP	Perfil completo de concentración y velocidad del flujo.	Pueden ser instalados en el lecho o en un bote. La manipulación y calibración debe ser realizada por un experto.	Indirecta	Continuo	Puede haber dificultad en diferenciar la concentración con el tamaño de las partículas.

3.1.2. Carga y transporte de fondo

El transporte de fondo se caracteriza por tener una gran variabilidad temporal y espacial, ocurre de manera intermitente y presenta una distribución irregular a lo largo del cauce, con partículas de sedimento que se mueven individualmente o en grupo, en contacto continuo con el lecho. Las tres formas en que se realiza el transporte de del fondo bajo el esfuerzo de corte ejercido por el flujo de agua son por rodado, por saltación, y por arrastre. Si se realiza un enfoque promedio en una sección del cauce, se considera que el sedimento que compone el lecho comienza a moverse una vez superado el umbral de esfuerzo de corte de fondo, llamada tensión o esfuerzo crítico de fondo (*critical tractive force o critical shear stress*). El umbral crítico a superar para iniciar el movimiento depende principalmente de la densidad y el diámetro de las partículas. La capacidad de transporte de fondo se refiere a la tasa teórica de movimiento de sedimentos que el flujo produce una vez superado el umbral del movimiento, y expresado generalmente como un volumen por unidad de tiempo, por unidad de ancho del cauce. A partir de este concepto se han derivado ecuaciones de capacidad de transporte de fondo con métodos basados en análisis dimensional y experimentos o mediciones de terreno (desde DuBoys, 1879; Meyer-Peter & Müeller, 1948, hasta Furbish et al., 2017). El transporte efectivo o real no solo depende del esfuerzo de corte promedio, sino también de los aportes de sedimentos desde aguas arriba llamado también alimentación sólida (*sediment supply*), es decir, el material disponible en el lecho para ser transportado.

De acuerdo a Kondolf (1997), en cauces con lechos de grava y arena, como son la gran parte de los ríos en Chile, el transporte de fondo constituye el factor fundamental que determina su estructura y organización. Desde los estudios de Lane (1955) se ha verificado también que la carga de fondo explica en gran parte las formas fluviales (geometría en planta, perfil longitudinal, secciones transversales y tipología fluvial), es decir su morfología y sus efectos en la resistencia al flujo. En consecuencia, el transporte de fondo asociado a los sedimentos más gruesos es un fenómeno físico de gran interés, ya que le entrega el soporte físico a la biota acuática fluvial en su conjunto (macroinvertebrados, perifiton, fauna íctica, vegetación ribereña, etc.). Por este motivo, una gestión efectiva de los cauces y planicies de inundación, desde un punto de vista ambiental y de amenazas naturales, requiere del conocimiento cuantitativo de la carga de fondo.

Al igual que la carga en suspensión, la medición de la carga de fondo requiere de una

adaptación a la condición local del cauce y al objetivo del monitoreo. De esta manera, se deberán muestrear un punto, en el caso de querer conocer si el lecho se está erosionando/sedimentando localmente o múltiples puntos en secciones transversales, en el caso que se requiera determinar si el lecho está en una etapa de incisión o de sedimentación (*aggradation*). Lo anterior está ligado directamente con la infraestructura fluvial como puentes, defensas fluviales, bocatomas y embalses, y con otras intervenciones que tienen un impacto negativo en el cauce como la extracción de áridos.

Los primeros muestreadores de sedimentos de carga de fondo fueron los de caja o cesta (como el muestreador Davies usado en el Canal de Panamá, 1898; muestreador de Kurtzrnan usado en Tirol, 1918; muestreador Bugatti usado en el Danubio, 1936; (ver Tennessee Valley Authority et al., 1940), estos instrumentos retienen el sedimento y oponen una resistencia considerable al flujo, reduciendo la velocidad local y generando tasas de transporte no representativas. Los muestreadores del tipo "presión diferencial" (*pressure-difference samplers*), fueron desarrollados para medir lechos de arena y tuvieron una continuidad en su desarrollo con Gaweesh & van Rijn (1994), pero en 1971, Helley & Smith diseñaron un dispositivo para ríos con lechos de grava (Helley & Smith, 1971) que actualmente es muy utilizado. Todos estos muestreadores pueden ser operados mediante vadeo o colgados mediante un cable desde un puente o desde un carro con tirolesa de acero, su presencia puede alterar el campo de velocidades local, por lo que deben ser calibrados para determinar su eficiencia bajo diferentes condiciones hidráulicas y de transporte. Esta es una tarea compleja, pero afortunadamente las experiencias de casi 50 años en su operación han permitido ajustar funciones de calibración, haciendo de estos los dispositivos más fiables (Bunte & Abt, 2009).

La toma de muestras debe realizarse con precaución durante la bajada y subida de este tipo de muestreadores, particularmente cuando se despliegan usando un cable, debido a que se puede perturbar la muestra al "palea" el lecho (con el movimiento oscilatorio de la boca del muestreador), lo que es difícil de prever en condiciones de alta turbidez.

Respecto a las estrategias de medición, se debe considerar que el transporte de fondo presenta variaciones más grandes que el transporte en suspensión en una sección transversal. Se debe seleccionar entonces la duración de tiempo que el muestreador se dejará en el lecho, el lapso de tiempo entre muestras consecutivas, y

el periodo total de muestreo (la suma de la duración de los dos periodos anteriores). La estrategia para seleccionar el número de muestras se puede determinar simplemente al azar, pero un mayor número de muestreos asegura la obtención de tasas de transporte más cercanas a la realidad. En este sentido, un número mínimo de entre 10 y 15 muestras secuenciales entregan datos aceptables de para la estimación de las tasas de transporte bajas, es decir en condiciones cercanas al umbral de iniciación del movimiento, y 30 muestras secuenciales cuando las tasas son altas. Estas mediciones son realizadas cada vez en el mismo punto y deben ser repetidas a través de la sección transversal del cauce. Es recomendable la utilización de varios muestreadores (por ejemplo, Helley-Smith) al mismo tiempo en la sección transversal, realizando la secuencia descrita anteriormente (de 10-15 muestras secuenciales para tasas baja y 30 o más para altas tasas de transporte). En cada muestreo se debe registrar el tiempo que el instrumento permanece en el fondo y también se debe registrar el caudal, para posteriormente pesar y tamizar las muestras.

Otros tipos de muestreos para el transporte de fondo corresponden a instalaciones llamadas trampas de sedimentos (*Bedload traps*), las cuales se instalan bajo la superficie del lecho y consideran una cavidad donde ingresa el sedimento, por esta razón son particularmente utilizados en ríos efímeros (ver Figura 13). Si su diseño y ejecución están bien realizados, se consideran muy exactos en sus mediciones. Sin embargo, tienen un alto costo de instalación y limitaciones de volumen de almacenamiento del sedimento. Si las trampas no se construyen en todo el ancho del cauce, solo se medirá una parte del transporte que pasa por la sección y finalmente no se podrá obtener la verdadera tasa a la cual se acumula el sedimento en la cavidad. Las trampas de sedimentos pueden ser tan simples como pozos revestidos o ranuras en el lecho, donde el sedimento se acumula durante uno o más eventos y se mide el volumen, peso y granulometría de las muestras después de realizar una excavación para el rescate de las partículas. Las trampas más sofisticadas tienen sensores de presión que pesan continuamente durante el transporte o usan una cinta transportadora para la transferencia a una estación de pesaje (Leopold & Emmett, 1997), incluso algunas se diseñan para generar un vórtice en el flujo que expulsa el sedimento a medida que se acumula o separan la carga fina de la fracción gruesa (Mao et al., 2010). Las estaciones de medición que utilizan trampas de sedimentos también son utilizadas para calibrar otros sistemas de medición indirectos de transporte de fondo como geófonos, hidrófonos y sismógrafos.



Figura 13. Instalación de trampas de sedimentos en el estero los Piños, Nuevo México, EEUU. (Gentileza del Profesor Jonathan Laronne, 2019).

La medición continua del transporte de fondo es un desafío mayor en el desarrollo de sistemas de monitoreo. En las últimas dos décadas se han realizado esfuerzos enfocados en trabajos experimentales tanto en laboratorio como en terreno usando sistemas indirectos como geófonos, hidrófonos y sismógrafos. La calibración de este tipo de sensores está aún en desarrollo (Grey et al., 2010; Geay et al., 2017; Dietze et al., 2019), pero se espera que pronto puedan estar disponibles para su uso fuera del ámbito de la investigación.

Las tecnologías y métodos para medir el transporte de sedimento de fondo que se mencionan a continuación (cadenas de erosión, PITs, ADCP+GPS RTK y métodos

morfológicos) han sido utilizadas en el marco de investigaciones científicas, no son utilizadas de manera sistemática para obtener series de datos a largo plazo, y su implementación se ha enfocado en la caracterización de procesos a corto plazo (a escala de crecidas o inter-crecidas). Las cadenas de erosión (*scour chains*, ver Laronne et al., 1994), son métodos muy sencillos y se utilizan para observar erosión/sedimentación del lecho. Los transductores pasivos (*Passive Integrated Transponder, PIT*; ver Sear et al., 2000 y Lamarre et al., 2005), han sido utilizados en Chile por Mao et al. (2014) y el objetivo es realizar el seguimiento de la posición de cada partícula a través de un transductor instalado al interior del sedimento (limitando su uso a gravas), que emite una señal y esta es recepcionada por una antena. En la última década se han utilizado en conjunto los sistemas de ADCP + GPS RTK (*Global Positioning System + Real Time Kinetic*) para medir la velocidad aparente del sedimento de fondo durante eventos de transporte (Rennie et al., 2017).

Otro de los métodos utilizados para el monitoreo del transporte de fondo es el método morfológico. Este método proporciona información de calidad, es relativamente robusto y requiere menos trabajo en terreno, además sirve para realizar una comparación con los otros métodos, por ejemplo, con las mediciones directas (i.e. Helley-Smith y trampas de sedimentos). El método morfológico utiliza reconocimiento aéreo (*Unmanned Aerial Vehicles, UAV + Laser Light detection and ranging, LiDAR* o fotografía estereoscópica) cada vez con más frecuencia, en conjunto con GPS RTK, TLS (*Terrestrial Laser Scanning*), ecosonda de multi-frecuencia y perfiladores doppler (*Acoustic Doppler Profiling, ADP*). El procedimiento básicamente consiste en la obtención de modelos de elevación digitales (DEM), donde para cada par secuencial de DEMs se analiza su diferencia con el precedente, de esta manera obtienen las llamadas diferenciales de DEM (*DEM of difference DoD*), mediante las cuales se pueden reconocer el cambio morfológico en el espacio, determinando zonas de erosión y depositación, asimilando al transporte de fondo (Vericat et al., 2017).

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las distintas metodologías descritas para monitorear el transporte de fondo.

Tabla 3. Resumen de los tipos de muestreo y monitoreo de transporte de fondo.

Metodología	Tipo de datos	Manipulación	Medición	Monitoreo	Desventajas
Muestreadores de caja	Taza de transporte de transporte de fondo.	Pueden ser operados por vadeo o colgados mediante un cable desde un puente o un carro con tirolesa.	Directa	Periódico	Gran resistencia al flujo que altera velocidad local.
Trampas de sedimentos	Taza de transporte de transporte de fondo de manera precisa.	Se instalan debajo del lecho y atrapan los sedimentos.	Directa	Periódico	Alto costo. Baja capacidad de almacenamiento.
Medición continua con hidrófonos, geófonos, y/o sismógrafos	Transporte de fondo y tamaño de las partículas.	Se instalan en el fondo, y los datos son constantemente almacenados en un computador.	Indirecta	Continuo	Usado solo en trabajos experimentales (laboratorio y terreno).
Método de transductores pasivos	Seguimiento de la posición de cada partícula	Los transductores son insertados dentro de los sedimentos y estos emiten una señal recepcionada por una antena.	Indirecta	Continuo	Se limita solo a gravas.
Método morfológico	Usando métodos de reconocimiento aéreo, más perfiladores y herramientas de georreferencia se obtienen datos de elevación (DEM) para reconocer cambios morfológicos.	Con herramientas computacionales, se puede calcular las zonas más propensas a sufrir erosión/depositación.	Indirecta	Continuo	No entrega detalle del tamaño de las partículas arrastradas.

Si se requiere realizar una granulometría del sedimento del lecho o bien de los sedimentos atrapados por los diferentes muestreadores, los instrumentos clásicos son: gravelómetro, para sedimento grueso (grava de 180 mm hasta el límite de 2 mm) y tamices, para sedimento fino, menor de 2 mm. Ambos análisis granulométricos pueden ser realizados en terreno, sobre todo para la grava. Para las fracciones más finas de sedimentos (de arena hacia abajo) es recomendado realizar el tamizaje en laboratorio. Herramientas indirectas para determinar la granulometría

de la superficie del lecho incluye también el análisis digital de imágenes, que permite estimar la distribución de diámetros a partir de fotografías (Buscombe, 2020)

3.2. Experiencia Internacional

3.2.1. Sistemas de Monitoreo

Como ejemplo de los avances en los sistemas de monitoreo en países miembros de la comunidad europea y SEDNET, es relevante destacar las implementaciones de los sistemas de monitoreo desarrollados como parte de la Directiva Marco de Agua de la Comunidad Europea (WFD 2000). En Francia, por ejemplo se modificó la ley de medioambiente en el año 2006 (*Article L214-17*), introduciendo el concepto del "transporte mínimo suficiente" (similar al caudal mínimo ecológico) para sedimentos de fondo para algunos cursos de agua, identificando claramente que las crecidas y el transporte de sedimento de fondo son factores esenciales que permiten preservar y restaurar el equilibrio morfológico y ecológico de un sistema fluvial. En la circular WFD2007-20 se definieron procedimientos que permiten evaluar y realizar un seguimiento de la evolución de la calidad de los cuerpos de agua. Este sistema está compuesto por cuatro tipos de redes de monitoreo:

- Monitoreo de control (o seguimiento)

Para medir un conjunto de parámetros biológicos y físico-químicos, permite realizar una evaluación de los cuerpos de agua. Sus objetivos específicos son:

-Apreciar el estado ecológico y químico de los cuerpos de agua costeros y de transición.

-Complementar y validar la clasificación de cuerpos de agua que están en riesgo de no cumplimiento de objetivos ambientales.

-Evaluar a largo plazo los eventuales cambios de los medios ligados a las actividades humanas.

-Contribuir a la definición de medidas operacionales a realizar para alcanzar el

buen estado ecológico.

El monitoreo de control no tiene como finalidad ser aplicado a todos los cuerpos de agua, sino que su propósito es aplicarlo sobre un número suficiente de masas de agua por tipología que permita una evaluación general del estado ecológico y químico de las aguas a escala de cuenca hidrográfica. Al nivel de cada cuerpo de agua, los estados químico y ecológico son evaluados gracias a una batería de elementos de calidad. Los datos son adquiridos sobre periodos de 6 años, que coinciden con los planes de gestión de las cuencas en Francia.

- Monitoreo operacional

Este monitoreo se aplica a todas las masas de agua que están en riesgo de no alcanzar objetivos medioambientales, y esta está enfocado en los parámetros responsables de la mala calidad de las masas de agua. Sus objetivos específicos son:

-Establecer el estado de los cuerpos de agua identificados como en riesgo de no cumplir con los objetivos medioambientales.

-Evaluar los cambios del estado de los cuerpos de agua a partir de las acciones implementadas para alcanzar los objetivos medioambientales.

Los lugares de monitoreo seleccionados deben ser representativos del impacto, a la escala del cuerpo de agua y del gatillante del riesgo. El monitoreo se detiene cuando el cuerpo de agua alcanza un buen estado ecológico y/o químico.

- Monitoreo de investigación

El objetivo de este monitoreo es detectar las causas de la mala calidad de cuerpos de agua, identificar cuando no existe una red de monitoreo operacional, o bien evaluar la amplitud e incidencia de una fuente de contaminación accidental.

- Monitoreo adicional

El monitoreo adicional está destinado a verificar las presiones que se ejercen sobre áreas protegidas, es decir, en sectores donde las actividades han sido

sometidas a la reglamentación europea. El equivalente a estas zonas en Chile son las áreas silvestres protegidas, las que son manejadas por CONAF.

3.2.2. Medición de la contaminación de sedimentos

Los sedimentos pueden acumular y almacenar sustancias contaminantes que tienen impacto en los hábitats asociados a sistemas fluviales, y en el desarrollo de actividades humanas relacionadas con los recursos de los ríos. Muchas veces actividades económicas industriales, agrícolas, o el turismo pueden influir en el aumento de concentraciones de elementos que deterioran la calidad de los sedimentos y del agua. Mediciones de contaminantes pueden ayudar a identificar las fuentes, determinar los impactos potenciales, y definir medidas de mitigación para disminuir el daño en los ecosistemas o consecuencias en la salud pública, especialmente en zonas de deposición como planicies de inundación, estuarios, o zonas costeras.

Existen múltiples razones para implementar una medición de la calidad de los sedimentos, entre ellas es importante destacar: 1) Medición de concentraciones para establecer una línea base; 2) Determinar el impacto de aportes conocidos de contaminantes (aguas lluvias urbanas, descargas industriales, descargas mineras, aguas residuales, actividades agrícolas); y 3) Evaluar sitios con sedimentos contaminados asociados a procesos de dragado o a pasivos ambientales que requieren remediación.

Experiencias internacionales muestran cómo la información puede utilizarse para recuperar ambientes acuáticos y diseñar estrategias de remediación como en los sitios definidos por la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) en los llamados "*superfund sites*" (EPA, 2020), cuyo trabajo se enfoca en recuperar sitios contaminados con el objetivo de proteger la salud humana y el medio ambiente, limpiando la contaminación, asignando los costos de limpieza a las partes responsables, e involucrando a las comunidades locales para devolver el uso productivo a los sitios (para más detalles ver EPA, 2018).

En Europa, como parte de la Directiva Marco del Agua (WFD) se ha desarrollado una normativa de calidad de sedimentos basada en mediciones e impacto potencial, y

asociada a objetivos de calidad de agua, que incluye una lista de contaminantes prioritarios (Förstner, 2009; Carere et al., 2012). A pesar de la dificultad de establecer estándares de calidad de sedimentos, se fijan objetivos específicos que se emplean para definir metodologías de medición y criterios de monitoreo (Brils, 2008). Detalles sobre las metodologías y el análisis de las muestras de sedimentos se pueden encontrar en la literatura reciente, de acuerdo a las experiencias en la comunidad europea y en Australia (Brils, 2008; Simpson & Batley, 2016).

Los procedimientos recomendados son específicos para cada contaminante, y generalmente se realizan llevando las muestras al laboratorio, de la misma forma que hoy la DGA efectúa los procesos de filtrado y calcinación de las muestras basado en métodos estándar para el análisis de sólidos suspendidos que se han desarrollado también en el tratamiento de agua, y son parte de los procedimientos comunes para establecer la calidad del agua (Baird et al., 2017).

3.2.3. Organizaciones internacionales

Alrededor del mundo existen instituciones que, como la DGA, están encargadas del monitoreo de sedimentos en ríos y que tienen diferentes objetivos y enfoques, según las necesidades específicas de cada cuenca y de las políticas públicas del país respecto a sistemas naturales. Algunos de estos objetivos buscan determinar y seguir el estado de la calidad del agua, asegurar la continuidad sedimentaria río abajo, realizar balances de masa de sedimentos para estimar el aporte desde las cuencas al mar, entre otros. A continuación, se describen cuatro organismos representativos de Estados Unidos, Europa, Canadá y Japón, que resultan más relevantes para este estudio, sus objetivos institucionales, los miembros que la componen, y los recursos disponibles. Luego, se presenta una síntesis de las instituciones en la Tabla 4.

- FISP, USGS, Estados Unidos (USGS, 2017-a)

El proyecto federal interagencial de sedimentación (FISP, por su sigla en inglés), tiene como objetivo estandarizar la investigación y actividades relacionadas con los sedimentos a lo largo de los Estados Unidos. A esta organización recurren todas las instituciones federales que requieran datos sedimentológicos, ya sea con fines de gestión, de desarrollo sustentable,

objetivos militares y estudios de las ciencias naturales.

Los resultados de las mediciones que realiza esta institución son de acceso público y están disponibles en el sitio web del USGS (*United States Geological Survey*). Los datos relacionados con los sedimentos que se pueden encontrar en la plataforma son de sedimentos en suspensión, transporte de fondo, composición del material de fondo, topografía, calidad del agua, compuestos adsorbidos y granulometría, tanto del material en suspensión como de fondo. Actualmente, el sitio web del USGS no parece ser una fuente de datos amigable para los usuarios, dada la abrumadora cantidad de información que presenta. Sin embargo, desde el año 2019 se está reconstruyendo la página, donde los usuarios pueden ver y testear constantemente las modificaciones que se realizarán, además pueden entregar su opinión acerca de qué es lo que se podría mejorar.

Una característica destacable de la FISP es que promueve el desarrollo continuo en el campo de la medición de sedimentos. Por un lado, ofrecen cursos de capacitación para el uso de instrumentos, además venden y arriendan herramientas de monitoreo a quienes los requieren. Adicionalmente, patrocina una cantidad importante de proyectos de investigación con instituciones académicas, y realizan conferencias donde se divulgan los avances científicos.

- SEDNET, Unión Europea (SEDNET, n.d.)

En la Unión Europea existe la red de sedimentos (SEDNET, por su sigla en inglés), que es una plataforma multidisciplinaria para la comunicación y educación sobre manejo de sedimentos y necesidades de acciones futuras. Esta organización tiene una gran relevancia, ya que es la fuente principal de información y coordinación sedimentológica de toda la Unión Europea. A ella recurren universidades para llevar a cabo diversas investigaciones; y organizaciones gubernamentales para el desarrollo de políticas públicas en temas de protección y remediación ambiental, prevención y manejo de desastres naturales.

SEDNET no es el organismo encargado de tomar mediciones de sedimentos, sino más bien recopila información de investigaciones científicas y de las

entidades encargadas de la medición en los países miembros de la Unión Europea. Sin embargo, en su sitio web se pueden encontrar informes con datos de gasto, granulometría y composición de sedimento de fondo y en suspensión.

En cuanto a las actividades que ofrece esta organización se encuentran conferencias donde se reúnen expertos en el área de las ciencias, y de los sectores público y privado. Además, envían periódicamente un *E-newsletter* a personas que estén interesadas en las actividades de SEDNET. Finalmente, al igual que FISP en Estados Unidos, ofrece cursos de formación en cuanto a metodologías y uso de instrumentos de medición de sedimentos.

- Water Survey, Canadá (Government of Canada, 2020)

La Inspección de Aguas de Canadá tiene como objetivos recolectar, interpretar y difundir datos hidrológicos estandarizados dentro del país. Esta organización monitorea los recursos hídricos para respaldar acuerdos y tratados interjurisdiccionales, y proporciona apoyo especializado en las investigaciones científicas. Esta institución está relacionada con organizaciones federales en el ámbito del manejo de recursos hídricos y desarrollo sustentable; además, es miembro de organizaciones internacionales como la comisión de cooperación ambiental de Norteamérica, La Organización Mundial de Meteorología (OMM), el programa hidrológico de la UNESCO, y la asociación internacional de ciencias hidrológicas.

El sitio web de la Inspección de aguas proporciona datos en tiempo real de caudales, mientras que los datos de sedimentos se encuentran en base de datos que no están en tiempo real, pero que son actualizados frecuentemente. Para el transporte de sedimentos, se monitorea la carga de fondo, concentración, muestreo integrado en profundidad y medición de oligoelementos. Además, el sitio web ofrece dos herramientas computacionales descargables y gratuitas. Por un lado, cuentan con un software muy fácil de usar, que muestra en un mapa toda la base de datos de recursos hídricos. Adicionalmente, se puede descargar una herramienta que sirve para preparar, analizar y visualizar datos de simulaciones numéricas computacionales.

La Inspección de aguas no solo pone a disposición de la comunidad datos de

libre acceso, sino que también ofrece productos y servicios pagados. Por ejemplo, la gran mayoría de los sistemas de suministro de agua potable, las centrales hidroeléctricas, y los proyectos de riego de Canadá han sido diseñados, construidos y operados usando estos productos y servicios. Además, esta organización cuenta con programas de ensayos de materiales de referencia para la medición de aguas y sedimentos, donde se comparan los resultados de muestras en diferentes laboratorios.

- River Administration, Japón (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan, 2020.)

La Administración de Ríos de Japón tiene como finalidad establecer un sistema de administración exhaustiva de ríos para el control de inundaciones, uso de recursos hídricos y conservación medioambiental. Esta organización tiene un manejo fluvial y de sedimentos integral, donde se incorpora a los departamentos de manejo de información satelital y monitoreo; al Ministerio de Tierra, Infraestructura y Transporte; a la Agencia de Meteorología y a las autoridades locales. Además, la Administración de Ríos tiene una división dedicada exclusivamente a los sedimentos y que se subdivide en una oficina de control de sedimentos y erosión, y en otra para la conservación de tierras.

Debido a que muchas regiones de Japón tienen una gran susceptibilidad frente a amenazas de inundación y deslizamientos de tierra por el colapso de áreas de alta pendiente, la Administración de Ríos tiene protocolos muy avanzados en materias de desastres naturales. Estos adelantos surgen a partir de la reforma del año 1997, donde se implementaron nuevas medidas tanto estructurales como no estructurales, para la prevención, control y subsanación ante este tipo de catástrofes. En cuanto a las reformas estructurales, se propuso instalar pequeñas represas filtrantes conocidas como *sabo dam* que actúan como barrera ante el arrastre de basura y sedimentos y que además protegen ante erupciones volcánicas y deslizamiento de tierras; se promovió la protección integrada de las costas para prevenir eventos de erosión; se incrementaron los estándares de las obras de control de crecidas para que puedan resistir eventos máximos probables y se modernizó la planificación urbana, donde se incorporan estructuras de drenaje a las ciudades. En cuanto a las medidas no estructurales, se incorporó la opinión de las autoridades locales en temas de planificación fluvial; además, se implementó un sistema

de monitoreo constante que alerta de manera temprana a las autoridades y a la ciudadanía ante desastres naturales.

Además de los desastres naturales, la Administración de Ríos tiene un programa de Ambiente Fluvial "Multi-natural". Entre los objetivos de este programa, están la preservación y restauración de ambientes fluviales y el desarrollo sustentable en torno a ríos y zonas costeras, donde el conocimiento científico y la opinión pública afectan directamente a las políticas públicas. En el sitio web de la agencia de meteorología (Japan Meteorological Agency, 2020), se puede encontrar información en tiempo real sobre riesgos de deslizamiento de zonas de alta pendiente, basados en características del suelo y su contenido de agua. Además, la Agencia de Ríos mide el transporte de fondo usando métodos indirectos acústicos como geófonos, sin embargo, no se puede acceder a esa información en línea fácilmente por lo que probablemente sea necesario hacer un requerimiento formal.

La Administración de Ríos tiene diferentes redes internacionales de cooperación, además pertenece al programa internacional hidrológico de la UNESCO. Dentro de las actividades que realiza a nivel internacional sobre tecnologías de prevención de inundaciones se encuentran conferencias, apoyo a proyectos de investigación y desarrollo y suministro de información satelital. Además, ofrece asistencia y capacitación sobre sistemas fluviales y saneamiento a más de 25 naciones, dentro de las cuales se encuentra Chile.

Como se puede observar, las cuatro instituciones descritas tienen enfoques diferentes. En primer lugar, tanto la FISP en Estados Unidos, como la Inspección de Aguas de Canadá monitorean los sedimentos y difunden la información de manera estandarizada. En segundo lugar, la SEDNET de la Unión Europea no toma mediciones, sino que administra la información de los sedimentos otorgados por los países que la componen y funciona como la principal base de datos de la zona. Finalmente, la Administración de Ríos de Japón está enfocada en entregar datos ya procesados para: 1) Alertar de manera temprana a las autoridades y a la población acerca de desastres naturales, y 2) Promover el desarrollo sustentable y la restauración de ambientes naturales.

Sin embargo, hay dos puntos principales que las instituciones mencionadas tienen en común. Por un lado, apoyan constantemente el desarrollo científico, donde financian

proyectos de investigación y divulgan los nuevos avances junto a instituciones académicas. Por otro lado, la información que manejan estos organismos afecta directamente el desarrollo de políticas públicas en temas de manejo de sedimentos, conservación de ecosistemas, y normas de urbanización y construcción sustentables.

Tabla 4. Resumen de las instituciones internacionales relacionadas con el manejo de sedimentos.

Agrupación	Finalidad	Asociados con:	Actividades y recursos de la agrupación	Mediciones en terreno	Mediciones de laboratorio
FISP (USGS,USA)	Unificar y estandarizar la investigación y las actividades de desarrollo de las agencias federales relacionadas con el estudio de sedimentos.	-Servicio de investigación agrícola. -Cuerpo de ingenieros del ejército. -Oficina de gestión de territorios. -Oficina de reclamación. -Agencia de protección ambiental. -Servicio forestal. -Estudios geológicos.	-Sitio web con datos instantáneos de sedimentos. -Patrocinio de investigaciones asociadas a los sedimentos. -Reportes de métodos, instrumentación e instrucciones para los operarios. -Conferencias. -Cursos de uso de instrumentos. -Venta, arriendo y reparación de instrumentos de medición.	-Sedimento en suspensión. -Transporte de fondo. -Material en el fondo. -Topografía.	-Calidad del agua. -Compuestos adsorbidos. -Distribución de tamaño de partículas del sedimento en suspensión y sedimento de fondo.
SEDNET (Europa)	-Contribuir al conocimiento y manejo de los sedimentos. -Ser una plataforma multidisciplinaria para la comunicación y educación sobre manejo de sedimento y necesidades de acciones futuras (decisiones políticas, manejo, o investigación). -Ser el principal punto de contacto en la comisión europea para las preguntas relacionadas con políticas de sedimentos.	-Institutos de geotecnia, hidrología, protección ambiental, remediación de sedimentos contaminados, ciencias de la construcción, geología marina, ecotoxicología, protección de ríos, riesgo de inundación. -Universidades. -Organizaciones públicas de manejo de residuos, movilidad y obras públicas, geología. -Ministerios de infraestructura y manejo de aguas. -Autoridades portuarias.	-Conferencias con expertos en ciencia, administración, industria, y consultoría. -Workshops. -E-newsletter. -Cursos de formación.	-Sedimento de fondo y en suspensión.	-Tamaño del grano. -Compuestos químicos (Si, Al, Fe, Sc, Cs, Li, Carbono orgánico). -Pesticidas clorados y PCB. -Hidrocarburos de petróleo. -Pesticidas organofosforados.
Water Survey (Canadá)	-Recolectar, interpretar y difundir datos estandarizados. -Monitorear los recursos hídricos para respaldar acuerdos y tratados. -Proporciona apoyo especializado a las investigaciones científicas.	-Departamento de Medioambiente. -Ministerio de desarrollo sustentable. -Departamento de manejo de recursos hídricos. -Comisión de cooperación ambiental de Norte América -Organización mundial de meteorología. -Programa hidrológico internacional de la UNESCO. -Asociación internacional de ciencias hidrológicas.	-Base de datos de mediciones hidrológicas. -Software gratuitos para la visualización de la base de datos y para usuarios de modelaciones hidrológicas. -Ofrecer productos y servicios para el diseño, construcción y operación de obras hidráulicas, y para testear la confiabilidad de instrumentos de medición.	-Carga. -Concentración. -Muestreo integrado en profundidad.	-Calidad del agua. -Medición de oligoelementos en el sedimento.
River Administration (Japón)	Establecer un sistema de administración exhaustiva de ríos para el control de inundaciones, uso de recursos hídricos y conservación medioambiental.	-Autoridades locales. -Ministerio de Tierras, Infraestructura y Transporte. -Agencia de meteorología. -Redes internacionales. -Programa hidrológico internacional de la UNESCO.	-Sistema de alerta temprana ante desastres de inundación y sedimentos. -Implementación de infraestructura moderna de prevención de desastres naturales. -Asistencia a diferentes naciones en asuntos de ríos y sistemas de alcantarillado. -Conferencias internacionales sobre tecnologías de control de inundación. -Suministro de información satelital internacional.	-Transporte de fondo usando herramientas acústicas	No se informa.

4. Conclusiones y propuestas de mejoras de la red

El análisis de la red de medición de sedimentos en Chile muestra que su desarrollo será fundamental para los desafíos futuros que deberá abordar el país con relación a la disponibilidad de recursos hídricos, la conservación de los ambientes fluviales, y las actividades económicas que dependen de ellos. La información sobre el transporte de sedimentos y granulometría forma parte del conjunto de datos fundamentales para avanzar hacia la gestión integrada de cuencas, y el manejo de los cauces con una visión global de los procesos físicos, biológicos, y geoquímicos que ocurren en las cuencas, incluyendo los efectos sobre las desembocaduras y la costa.

La medición de sedimentos proporciona los datos necesarios para comprender los sistemas fluviales, y plantearse objetivos asociados a la gestión de la cuenca basados en información cuantitativa y confiable. Entre otros usos, los datos de sedimentos permiten planificar la gestión del cauce, diseñar, gestionar y operar infraestructura hidráulica, determinar cuantitativamente los procesos de erosión, sedimentación y cuantificar el material que los ríos proporcionan a la costa, estudiar el transporte de contaminantes en fase sólida, y validar y calibrar modelos de predicción para estudios de caudales, transporte de sedimentos, y morfodinámica de ríos (Diplas et al., 2008; Rhoads, 2020).

En Chile, concentraciones de sedimentos en suspensión ya han sido muy relevantes para el establecimiento de Normas Secundarias de Calidad de Agua, especialmente la determinación de los límites de concentraciones sólidos suspendidos totales, determinación de áreas de vigilancia, niveles de saturación, planes de manejo y de descontaminación, es decir para la gestión de las cuencas y cauces. Algunas de las problemáticas en Chile que se han evidenciado y otras que se pueden vislumbrar, relacionadas el transporte de sedimentos consideran la erosión de fundaciones de puentes (puente ferroviario de Pitrufrquén, 18 de Agosto 2016; puente Cancura, 23 de Junio del 2018; puente ferroviario Cautín, 27 de Junio de 2018), diseño de bocatomas y centrales de pasada (compuertas móviles del canal Laja Diguillín, bocatoma Tinguiririca), sedimentación de embalses (estudio del embalse Puntilla del Viento), sedimentadores (río Andalién) eventos de alta turbiedad causada por sólidos suspendidos totales (río Maipo empresa Aguas Andinas, cortes de suministros en Santiago, enero 2013 y abril 2016; río Aconcagua empresa ESVAL, corte en Los

Andes en Enero, 2020), incisión de ríos por extracción de áridos en el río Maipo (Arróspide et al., 2018) y formación de armadura aguas abajo de embalses como en Rapel (Alcayaga et al., 2019). A lo anterior se deben agregar las líneas base de proyectos que deben transitar por el sistema de evaluación de impacto ambiental. Finalmente, se debe mencionar que la cuantificación de los flujos de sedimentos también puede tener asociada la cuantificación de flujos contaminantes orgánicos y minerales transportados con ellos.

La información proporcionada por la red es fundamental para avanzar hacia la gestión integrada de cuencas en Chile, planificando el uso de los recursos naturales con una visión que incorpore aspectos ambientales, sociales, y económicos, además de impactos de largo plazo del crecimiento, la perspectiva de los habitantes y usuarios de la cuenca, y el cambio climático. La información de la carga de sedimentos se utiliza en la determinación del balance de masa de la cuenca, es necesaria para el desarrollo de estudios de amenazas de inundación y de aluviones, permite el monitoreo y el cumplimiento de las normas secundarias de calidad de agua (seguimiento de parámetros de sólidos suspendidos totales, determinación de zonas de saturación, y la definición de planes de descontaminación), además otorga mayor claridad en el desarrollo de estudios de línea base para la evaluación de impacto ambiental (EIA) en ambientes fluviales y costeros.

En esta sección se propone un conjunto de recomendaciones cuyos propósitos son mejorar el funcionamiento de la red de sedimentos, desarrollar y extender su uso para abordar los nuevos desafíos futuros de Chile en temas ambientales, fluviales, costeros, y proyectos asociados. En la Figura 14, se resumen las propuestas, separadas en planes de acción en distintos ámbitos y para distintos horizontes de tiempo. A continuación, presentamos los detalles para cada uno de estos desarrollos en: 1) Mejoramiento de la situación actual; 2) Crecimiento de la red de sedimentos; y 3) Desarrollo Futuro.

Red de Sedimentos DGA

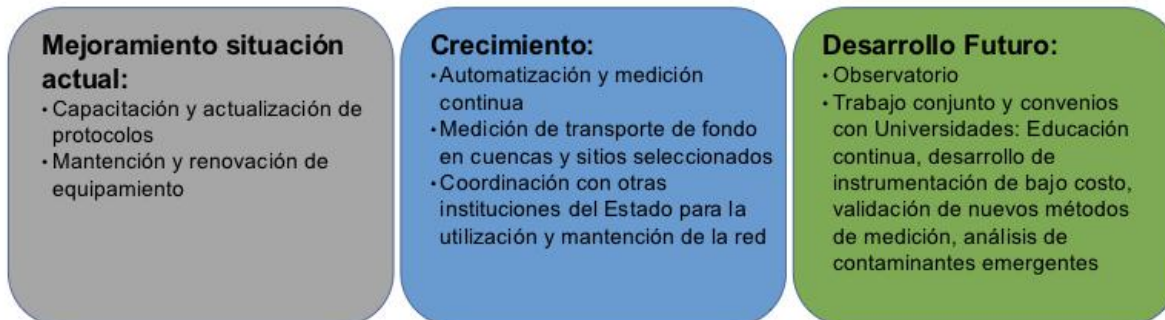


Figura 14. Resumen de propuestas de mejoramiento en tres ámbitos de acción para el desarrollo y operación de la red de sedimentos de la DGA.

4.1. Mejoramiento de la Situación Actual

De acuerdo a las observaciones del estado actual de la red, se puede realizar una actualización para lograr una situación base optimizada. Para esto, se recomienda implementar cuatro tipos de modificaciones que pueden ser implementadas en el corto plazo y que son descritas a continuación:

- Actualización del manual de operación

El manual de operación (Solar, 1999) no ha sido actualizado desde aproximadamente dos décadas, lo que ha resultado en una descordinación entre las metodologías que allí se explican y las que efectivamente se llevan a cabo. Es por esto, que en el nuevo manual se deben eliminar los procedimientos que no se utilicen e incorporar las nuevas técnicas que se adoptarán. El documento también debe incluir protocolos de limpieza, mantención, y renovación de equipos de terreno y laboratorio. Esta actualización debe estar acompañada de capacitaciones a hidromensores, observadores y profesionales involucrados en la operación de la red, incluyendo material audiovisual que permita tener las guías de operación y mantenimiento con fácil acceso, con el fin de asegurar que se cumplan los

procedimientos definidos.

- Distribución de la información

Con respecto a la forma en que se distribuye la información, se observaron algunas falencias que pueden ser mejoradas fácilmente. En primer lugar, se deben actualizar los datos, tanto como de la vigencia de las estaciones, como de las mediciones que efectivamente están disponibles. En segundo lugar, se propone condensar todo el material en un solo sitio web, para evitar desfases en la información que puedan confundir a los usuarios. En la plataforma, no solo debe haber datos de las mediciones, sino que también las especificaciones de los instrumentos, métodos de calibración y registros de la toma de muestras en terreno y de experiencias de laboratorio; todo esto con el fin de facilitar el acceso a los datos e incrementar la confiabilidad de los usuarios. Además, se deberían incorporar informes técnicos y artículos científicos relacionados con el manejo y medición de sedimentos a nivel nacional, lo que facilitaría promovería la colaboración entre instituciones académicas, privadas y estatales. Finalmente, se sugiere promover el uso del sitio web, no solo entre usuarios directos de los datos, sino que también dentro de las autoridades de gobierno (ministros, SEREMI, etc.) para que conozcan los recursos que ofrece la red de sedimentos y tengan en consideración la información disponible al momento de generar políticas públicas.

- Protocolos de ubicación de estaciones sedimentométricas

Actualmente, no se tiene claro cuáles son los parámetros que se consideran para seleccionar la localización de una estación, lo que es primordial al momento de establecer los objetivos de la red y darle coherencia a la toma de muestras. En primer lugar, se sugiere reconsiderar la vigencia de los puntos de medición actuales, evaluando el cierre de las estaciones que muestren porcentajes de toma de datos casi nulos y la reapertura de aquellas que tengan un mayor historial de mediciones. Para lo anterior, se sugiere dar prioridad a las zonas ubicadas en las salidas de las cuencas y aquellas que cuenten con mediciones prolongadas de caudales para entender los procesos de los sistemas fluviales de forma integral a nivel de cuenca.

Para la instalación de nuevas estaciones, se recomienda considerar la presencia de áreas de vigilancia de las normas secundarias de calidad de agua (ver Ministerio del Medioambiente, 2017). Un área de vigilancia es una zona elegida para el control de su calidad. Para la determinación de áreas de vigilancia en ríos se consideran puntos de desembocadura de cauces que contengan una biodiversidad significativa para la cuenca; fuentes puntuales de contaminación, tales como tranques de relave; zonas donde el cambio en el transporte de sedimentos pueda afectar significativamente el hábitat; entre otras consideraciones. El monitoreo de sedimentos en estas zonas se enfoca en la acumulación y transporte de material orgánico y compuestos tóxicos; el control de acumulación y liberación de sedimentos debido a modificaciones del cauce natural, tales como la presencia de obras hidráulicas; y el cambio en los materiales en suspensión que puedan afectar la disponibilidad de recursos hídricos para el consumo humano. Actualmente, los puntos de monitoreo sedimentológico no coinciden necesariamente con las estaciones de las áreas de vigilancia. En la Figura 15 se muestra como ejemplo la cuenca del río Biobío, donde se observan 14 puntos de vigilancia, mientras que tan solo hay 6 estaciones sedimentométricas vigentes, de las cuales solo dos coinciden entre sí.

- Reorganización de la red de sedimentos

Para realizar las mejoras propuestas de manera eficaz y organizada, es necesario definir cuál es el ente que estará a cargo de todas las modificaciones. Por un lado, el análisis de los sedimentos de la red se relaciona con actividades propias de un laboratorio, es por esto que las muestras se procesan en las dependencias del Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, sin embargo, como se mencionó anteriormente, la red depende del Departamento de Hidrología. Esta división ha hecho que no exista una jerarquía clara, lo que entorpece el correcto funcionamiento de la red. Por esta razón, se sugiere que se replantee la organización de la red y el lugar físico donde se encontrará el laboratorio de análisis de sedimentos.

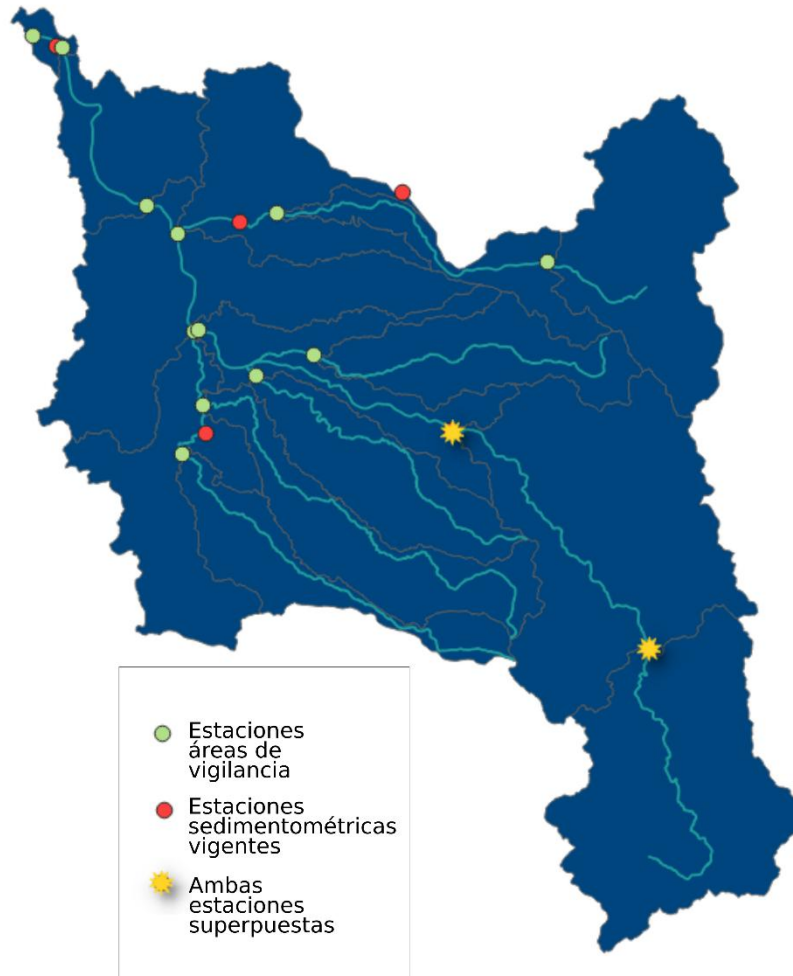


Figura 15. Estaciones sedimentométricas y estaciones de áreas de vigilancia en la cuenca del río Biobío.

4.2. Crecimiento de la Red de Sedimentos

El diseño del crecimiento futuro de la red no es una tarea sencilla, principalmente por

la diversidad de condiciones hidroclimáticas de Chile, y por el conjunto de desafíos asociados a cada cuenca en los que se requiere compatibilizar el uso de los recursos con la evaluación del riesgo, y con objetivos ambientales de calidad del agua, sedimentos, y estabilidad morfodinámica de los cauces y la costa. En esta sección presentamos recomendaciones en tres ámbitos que entregan un plan de desarrollo en el contexto de Chile y basado en el estado del arte de las mediciones de sedimentos en sistemas fluviales.

4.2.1. Automatización y Medición Continua

La concentración de material sólido que se transporta en suspensión, que contiene sedimentos provenientes del lecho y también material fino, puede cambiar por factores adicionales al caudal y, en algunos casos, producir eventos de alta concentración que no se pueden detectar con los métodos periódicos de medición manual o en curvas de descarga. La instalación de turbidímetros o de sistemas de toma de muestras automatizados (tipo ISCO) que se pueden programar para tomar muestras con una frecuencia definida, o que se activan con un umbral de altura de agua (conectado a un limnómetro), pueden incorporarse en estaciones de la red actual (Griffiths et al., 2012). Un sistema de este tipo permite relacionar la turbidez con la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) y obtener una medición continua de la concentración y de la carga en suspensión, y además de ser un dato sustituto de la concentración de contaminantes hidrófugos que viajan adsorbidos a los SST (Rügner et al., 2013). Este tipo de sistema de medición tiene gran importancia, considerando que es durante las crecidas que se transporta gran parte de la masa de SST.

Un sistema de medición continua (indirecta) de SST puede contener: turbidímetro + limnómetro + muestreador automático ISCO, que tienen un precio que va en el rango de los 8.000 - 15.000 USD. A esto se debe sumar un kit de calibración de turbidez (500 USD) y el equipamiento necesario para el análisis de los SST (botella + embudo + filtros + balanza + desecador + bomba de vacío + horno), que la DGA tiene actualmente en su laboratorio. Se realizó una visita al laboratorio de sedimentos de DGA el día 21 de octubre 2020, y se observó el estado de los equipos (su estado de conservación no es el óptimo) y es posible que algunos de ellos deban ser reemplazados. Sin embargo, durante esta visita no fue posible constatar el estado de

funcionamiento de cada uno de ellos, pero sí se verificó que el laboratorio presenta todo lo necesario para el análisis de SST. Para el análisis de materia orgánica en los sedimentos en suspensión, la DGA cuenta con todos los equipos en su laboratorio para poder realizar este análisis (mufla, balanza, desecadores, crisoles), pero al igual que en el caso anterior no fue posible verificar el estado de funcionamiento de estos equipos.

Los sistemas de medición automatizada y continua tienen la ventaja de entregar una frecuencia de datos mucho mayor a los sistemas manuales, sin embargo, esto no quiere decir que la red completa debiera cambiar definitivamente a esta modalidad; de hecho, el muestreo manual puede continuar en aquellos ríos en los cuales la variación temporal de concentraciones y carga pueden ser capturados por esta técnica como, por ejemplo, en las desembocaduras de grandes ríos (Biobío, Maipo, Baker, Maule, etc.). Para implementar el muestreo automatizado, se sugiere dar mayor prioridad a lugares donde los hidromensores puedan ser capacitados; zonas de difícil acceso; y cuencas que tengan cambios repentinos en su caudal debido a que tienen tiempos de respuesta cortos ante eventos de precipitación, como lo son cuencas pequeñas, cabeceras de cuencas expuestas a tormentas con lluvias intensas de tipo convectiva y cuencas con escasa vegetación. Para establecer la frecuencia de medición, primero se debe analizar el régimen hidrológico de caudales para conocer los periodos en los cuales se espera observar mayores concentraciones y cuándo se tienen condiciones base en términos de concentración. Adicionalmente, se debe realizar una caracterización del transporte mediante un análisis granulométrico del lecho y la estimación del potencial de transporte usando ecuaciones de transporte o de la potencia del flujo, verificando así, los periodos en que es posible que ocurra una mayor tasa. Además, se debe verificar si la estación tiene influencia de actividades antrópicas, de ser así, se debe establecer si hay periodos en los cuales las tasas de transporte son perturbadas por estas actividades. Información adicional sobre detalles de la instalación de estaciones automatizadas se puede encontrar en los documentos y ejemplos presentados en Griffiths et al. (2012), incluyendo la operación necesaria para minimizar el riesgo de daños durante eventos de crecida o por otras condiciones ambientales, que son comunes en estos casos.

4.2.2. Medición de Transporte de Fondo

La medición de la tasa de transporte de fondo es fundamental para entender la evolución morfológica de los cauces, y los datos complementados con mediciones de caudal permiten caracterizar las condiciones de estabilidad del cauce y de equilibrio sedimentológico en la cuenca completa. Información de largo plazo se ha utilizado generalmente en la gestión del cauce, para identificar procesos de degradación o agradación, mantención y formación de hábitats acuáticos, en la evaluación del impacto de proyectos que puedan afectar al río o la disponibilidad de sedimentos en la cuenca, y en la planificación de obras de restauración fluvial.

Incorporar la medición del transporte de fondo en la red requerirá un análisis detallado de los sitios donde los datos pueden tener un mayor impacto en estudios fluviales o ambientales del río, ya que el muestreo sistemático de la carga de fondo es costoso y requiere la definición de equipos y de un conjunto consistente de protocolos (Yuqian, 1989; Edwards et al., 1999). Además de las mediciones tradicionales de transporte de fondo con la captura directa de sedimentos que se mueven cerca del lecho o trampas de sedimentos descritas en la sección de estado del arte, en las últimas décadas se han desarrollado nuevas técnicas para su estimación usando métodos de medición indirectos (Gray et al., 2010), que tienen menor costo y han demostrado que pueden también determinar la carga de fondo de manera precisa y consistente, con menos riesgo de operación.

A continuación, presentamos algunas recomendaciones para proponer sitios de medición de transporte de fondo y resumimos técnicas de medición comunes que pueden implementarse para que se integren a la red:

- Selección de Sitios

La elección del cauce y sección específica donde es más relevante medir, además de la definición del propósito principal de las mediciones de transporte de fondo y la frecuencia de medición, deben tener un objetivo de largo plazo asociado a los procesos naturales o antrópicos, además de considerar las condiciones hidrometeorológicas de la cuenca. La selección debe considerar el cálculo de las condiciones hidrodinámicas (velocidad y profundidad) del flujo

en sitios de interés, obtenidos a partir de caudales definidos en estudios hidrológicos, y que pueden estar asociados a periodos de retorno específicos. La selección de sitios se puede realizar donde las ecuaciones de predicción de la capacidad de transporte de fondo indiquen mayores flujos de sedimento, o se puede realizar un estudio de la red de drenaje para definir los cauces y sitios de medición calculando la potencia del flujo (*cross-section stream power*, ω) (Bagnold, 1966; Rhoads, 1987; Knighton, 1999) , definida como:

$$\omega = Q S_0$$

dónde Q es un caudal representativo como el de cauce lleno (*bankfull discharge*), el caudal formativo, o el caudal medio anual, y S_0 es la pendiente media del lecho.

Secciones del cauce con valores altos de potencia pueden indicar zonas donde el transporte de fondo es dominante, con un orden de magnitud que sea adecuado para las técnicas de medición disponibles (Julien, 2010; Rhoads, 2020). Los modelos más avanzados de simulación pueden apoyar también el diseño de las estaciones de medición o en la definición más específica de la zona del cauce donde efectuar la medición.

En este informe, se realizó una estimación de la potencia del flujo para la red de drenaje de la cuenca del río Maipo. Para este cálculo se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM) de 12,5 x 12,5 m² (ALOS Palsar descargado desde el sitio de Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile), el que fue rellenado para obtener un DEM hidrológicamente correcto (Whiteaker et al., 2006). Al DEM del río Maipo se le aplicaron las herramientas de análisis espacial del programa ArcGIS para obtener las direcciones de flujo y red de drenaje de la cuenca. Posteriormente, se calcularon las pendientes de la red de drenaje usando el algoritmo de análisis hidrológico de ArcGIS, *slope*. En el caso de los caudales, estos no pudieron ser determinados para toda la red, pero se utilizó una aproximación usando el área de drenaje aguas arriba de cada celda, que es proporcional al caudal. Finalmente, se determinó el potencial de la corriente normalizado, calculado para cada celda ubicada en la coordenada (i,j) de acuerdo a la siguiente relación:

$$PCN_{i,j} = (S_{i,j} A_{i,j}) / \max(S A)$$

donde S_{ij} es la pendiente del lecho en porcentaje para la celda i,j del DEM; A_{ij} es la cantidad de celdas que drenan a la celda (i,j) ; y $\max(S A)$ es el valor máximo para todas las celdas, del producto entre la pendiente y la cantidad de celdas.

El resultado para la red de drenaje de la cuenca del río Maipo se presenta en la Figura 16, donde el color rojo representa una mayor potencia, que se traduce en la determinación de lugares donde probablemente el transporte de fondo es más activo.

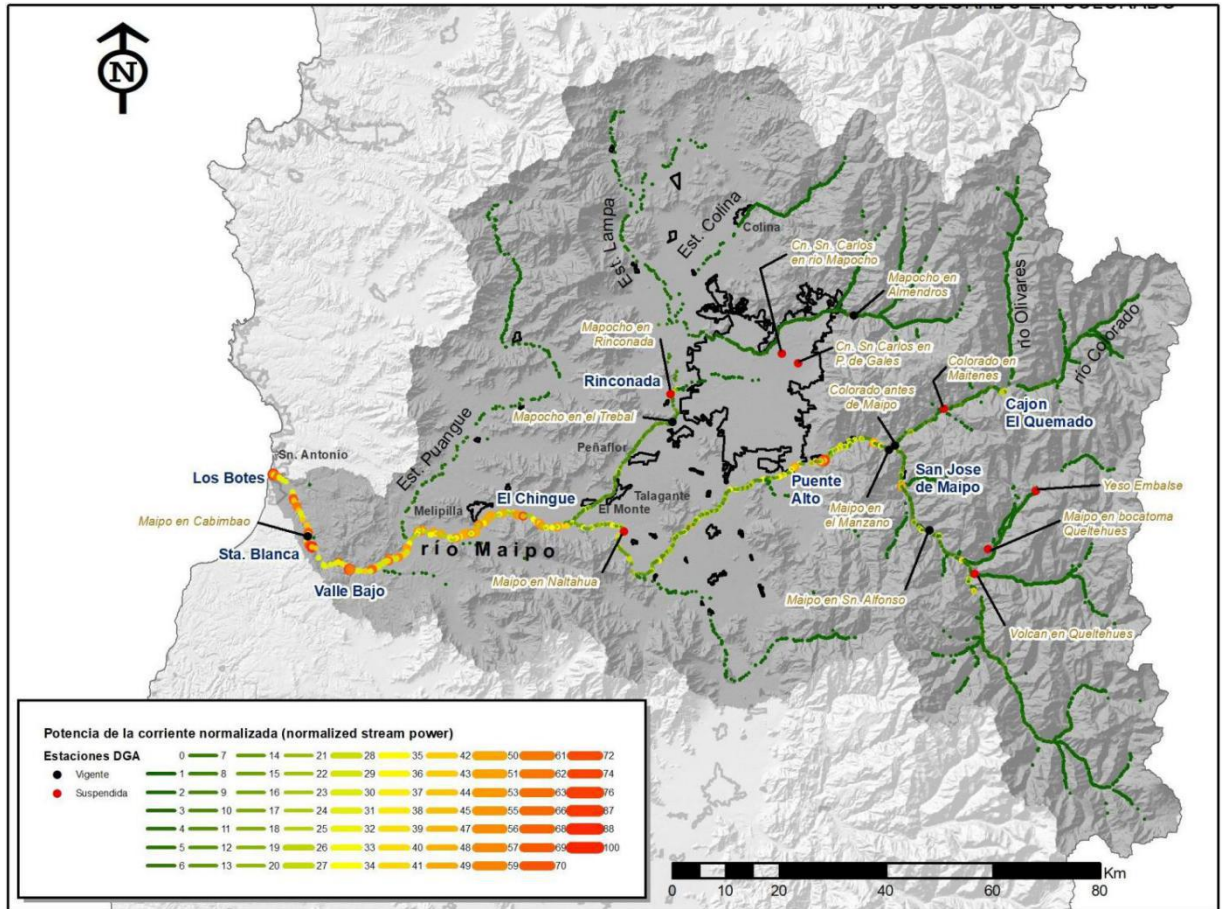


Figura 16. Potencia de la corriente normalizada PCN (0-100), estimada para la cuenca del río Maipo y estaciones sedimentológicas de la red DGA.

A partir del análisis de la potencia del flujo en los cauces principales que conforman la red de drenaje del río Maipo, se puede determinar las zonas donde potencialmente el transporte de fondo es más activo, estas corresponden a: Cajón el Quemado (aguas abajo de la confluencia de los ríos Olivares y Colorado), San José de Maipo (antes de confluencia con el estero de San José), Puente Alto (Sector las Vizcachas), Mapocho en Rinconada Maipú (antes de la confluencia con el zanjón de la Aguada), Sector el Chingue (aguas

abajo de El Paico), entre Valle Bajo y Santa Blanca (sector estrecho del cauce, semiconfinado por la Cordillera de la Costa) y el sector Los Botes en desembocadura (Santo Domingo). Además, en la Figura 16 se presentan las estaciones de la red sedimentológica de la DGA donde se puede apreciar que algunas de estas (vigentes, o no) están cercanas a los tramos donde la potencia de la corriente es mayor, estas son por ejemplo la estación río Maipo en Cabimbao (sector Sta. Blanca) y estación río Mapocho en Rinconada de Maipú (sector Rinconada). Lo anterior facilita la logística para los hidromensores y la economía en el caso que se requiera realizar un monitoreo del transporte de fondo. Adicionalmente a la potencia de la corriente, se deben considerar también condiciones locales como las actividades antrópicas, por ejemplo, las extracciones de áridos que deberían ir reduciéndose en el corto plazo para mantener la integridad del cauce (Arróspide et al., 2018), e infraestructura como muros de embalses y su operación (*flushing*, *hydropeaking*), bocatomas y puentes, entre otras.

- Técnicas de Medición e Instrumentación

En la sección de estado del arte (sec. 3) se encuentra una descripción de todas las metodologías disponibles. En la selección de las técnicas específicas, es importante considerar que las capacidades de los muestreadores de transporte de fondo varían con su diseño y es difícil establecer su eficiencia. Adicionalmente a la selección de los instrumentos, se requiere definir una estrategia de muestreo correcta para no tener influencias negativas de las considerables variaciones espaciales y temporales en las tasas de transporte. La técnica de medición seleccionada deberá basarse en múltiples consideraciones, incluyendo el tamaño del cauce donde se desplegarán los muestreadores.

Las mediciones directas consisten en la recolección de los sedimentos que el flujo moviliza en la zona cercana al lecho. La instrumentación comúnmente más utilizada en terreno son trampas permanentes que capturan las partículas en una sección transversal, o dispositivos portátiles de operación manual que permiten realizar mediciones puntuales. Se recomienda seguir los protocolos, diseños, y guías que han mostrado un buen desempeño y han sido validados en experiencias internacionales como los presentados en IAEA, (2005) y Diplas et al., (2008). Se sugiere también evaluar las recomendaciones del proyecto

de interagencias federales de Estados Unidos (FISP), que pueden ayudar a determinar el equipamiento recomendado (ver Davis, 2005).

Las trampas del lecho son los dispositivos más precisos, pero tienen un tamaño acotado, además su costo es elevado debido a que requieren una intervención masiva con la construcción de una obra en el lecho, por lo que generalmente se han limitado las aplicaciones en cauces estrechos o de flujo efímero. Los muestreadores manuales o los desplegados con cable realizan una recolección solamente puntual del sedimento que es transportado y pueden perturbar el flujo local cuando se operan, por lo que en muchos casos necesitan calibración y validación (Diplas et al., 2008), y pueden requerir mayores medidas de seguridad para su uso en terreno. En la Figura 17 se muestran estas dos técnicas de medición directa. Por otra parte, los métodos indirectos han adquirido más aceptación y mayor uso en la última década (Gray et al., 2010), incluyendo equipos como perfiladores acústicos Doppler, sonar, placas de impacto, hidrófonos, y geófonos, entre otros, que se encuentran explicados en detalle en la sección del estado del arte (sec. 3). Las labores de instalación, calibración, y desarrollo de estos sensores de medición indirectos puede facilitarse con la colaboración y trabajo conjunto con Universidades e instituciones de investigación como se indica más adelante.

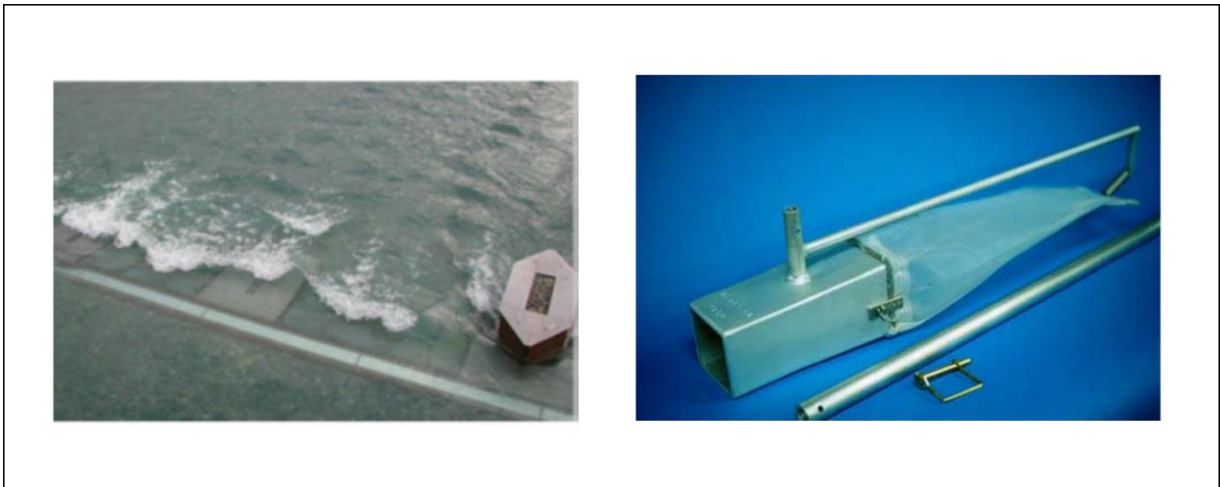


Figura 17. Instrumentos de medición. A la izquierda: Estación fija de medición de transporte de fondo en el río Drau, Austria (Habersack et al., 2017). A la derecha: Muestreador manual BLH84 del proyecto FISP, Estados Unidos (Edwards, 1999).

El precio de instrumentos como los Helley-Smith comprados en EEUU están en el rango de los 360 USD (vadeo) - 1100 USD (colgado desde puente). Estos equipos pueden confeccionarse de manera artesanal local en Chile cuyos resultados son exactamente los mismos por un costo del orden de 250 - 280 USD (\$200.000 - \$250.000 CLP). Se debe considerar que es necesario contar con al menos con dos o tres por sección, y además por cada muestreador, se debe tener un cable tipo USGS A-55 Sounding Reel (1200 - 1500 USD) para poder operar el dispositivo. La división de hidrología de DGA posee este tipo de cable para realizar aforos de caudal.

El valor de las trampas de sedimentos es muy variable, ya que depende de las condiciones locales del sitio. Por otro lado, los sensores pasivos (hidrófonos, geófonos y sismógrafos) aún están en fase de desarrollo, por lo tanto, no son recomendados actualmente para uso operacional masivo por la DGA, pero sus potenciales aplicaciones pueden explorarse con el trabajo en conjunto con instituciones de investigación del país.

Los equipos para realizar granulometrías son relativamente económicos. Para grava

se utiliza un gravelómetro cuyo precio es de aproximadamente 70-80 USD, un pie de metro digital tiene un costo de 20 USD y para el sedimento fino, un set de tamices tiene un valor de 90 - 150 USD (dependiendo de la malla).

En el Anexo B se entrega una lista más completa con los precios de equipos y sus referencias.

4.3. Desarrollo Futuro y Colaboraciones

Los desafíos futuros requieren un trabajo continuo en el largo plazo, que permita elaborar estrategias para actualizar y extender la red. Para esto, el desarrollo debería estar coordinado con instituciones estatales y de investigación, con el fin de tener una visión más integrada sobre la relevancia del manejo y control de sedimentos en el país. Además, en esta sección se propone comenzar con la instalación gradual de observatorios sedimentológicos a lo largo del país que permitan el entendimiento de los procesos a nivel de cuenca.

4.3.1. Coordinación entre Instituciones

El desarrollo, mantención y operación de la red de sedimentos pueden verse fuertemente beneficiados coordinando las actividades de medición e instalación de nuevas estaciones con otras instituciones del Estado, contribuyendo con el desarrollo futuro de una red que tenga un impacto significativo en una nueva etapa de la gestión de los recursos hídricos en Chile. Es recomendable iniciar un grupo de trabajo con miembros de estas instituciones que pueda fijar prioridades respecto a la red de sedimentos, para definir los aspectos de la gestión integrada de cuencas que deberán también acordarse con actores privados. Además de la DGA, las principales instituciones tienen relación con ambientes fluviales, y pueden contribuir con distintos aspectos de la obtención y manejo de la información son las siguientes:

Instituto Nacional de Hidráulica (INH): Desarrolla investigación aplicada en el área hidráulica, y puede proveer conocimiento técnico en aspectos físicos del estudio y medición de transporte de sedimentos.

Dirección de Obras Hidráulicas (DOH): Provee de servicios de infraestructura hidráulica para múltiples objetivos, incluyendo riego, inundaciones, protecciones

contra la erosión, agua potable y evacuación y drenaje de aguas lluvias, entre otras actividades.

Dirección de Obras Portuarias (DOP): Entrega servicios de infraestructura portuaria y costera, marítima, fluvial, y lacustre. Los procesos que afectan estas obras están íntimamente relacionados con el transporte de sedimentos y con los procesos de erosión y sedimentación de las cuencas, por lo que las mediciones sedimentológicas son indispensables para el desarrollo y gestión futura de la costa.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU): El manejo del territorio y el desarrollo de las ciudades tienen una gran influencia en el estado de los sistemas fluviales y sus procesos físicos, biológicos y geoquímicos. La relación de la zona urbana con los cauces adquiere aún mayor importancia en el contexto del cambio climático y para la gestión del riesgo de inundaciones.

Ministerio de Medio Ambiente (MMA): La gestión de las cuencas deberá formar parte de políticas públicas relacionadas con el desarrollo sustentable. Los datos de sedimentos son especialmente importantes para las declaraciones y estudios de impacto ambiental, planificación de la adaptación al cambio climático a nivel nacional, y a la implementación y desarrollo de normas secundarias, entre otros objetivos.

Ministerio de Bienes Nacionales: Los cauces son bienes nacionales de uso público, y los datos de transporte de fondo y suspensión son críticos para comprender su evolución morfológica y la posibilidad de mantener estos ambientes naturales que son responsabilidad de este ministerio.

Ministerio de Agricultura: En muchas cuencas, las aguas superficiales y el estado morfológico de los ríos son recursos críticos para el desarrollo de la actividad y la implementación de tecnologías de riego.

ONEMI: Este organismo del Ministerio del Interior tiene relación directa con la prevención y mitigación de desastres de origen natural, como las inundaciones y aluviones, cuyo análisis y predicción necesitan de datos sedimentológicos que contribuyan con la planificación de largo plazo o con el diseño de sistemas de alerta temprana.

Ministerio de Ciencia y Tecnología: Puede contribuir a establecer las relaciones con instituciones académicas, al financiamiento a la investigación asociada a la red de

medición de sedimentos, y al manejo de los datos para objetivos conjuntos de investigación y operación de la red, o de planificación futura de la gestión de cuencas en Chile.

Municipalidades: Tienen algunas facultades de administración sobre bienes nacionales de uso público, dentro de ellos los cauces de los ríos. Los datos sedimentológicos son fundamentales para definir las actividades de coordinación respecto a la gestión de los cauces y poder disponer a nivel de cuenca de los recursos superficiales y proteger los ambientes fluviales, ya que los efectos locales de la gestión que pueden realizar las municipalidades se propagan a toda la cuenca.

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN): Pueden aportar información importante sobre la composición y el arrastre de sedimentos en las zonas de actividad minera.

CONAF: Administra la política forestal en Chile, lo que cumple un rol importante en la producción de sedimentos de las cuencas. Adicionalmente, el manejo de parques nacionales y humedales requerirá datos precisos de las tasas de transporte y contaminantes presentes en los ríos que se encuentran en ellos.

4.3.2. Trabajo Conjunto con Universidades y otras Instituciones de Investigación

La asociación de largo plazo con investigadores puede tener beneficios importantes en el futuro desarrollo y actualización de la red. Fundamentalmente para establecer objetivos a nivel de cada cuenca, trabajar en estaciones piloto de medición para probar nuevos instrumentos o medir otras variables, y para definir el rol futuro, expandir y adaptar la red de sedimentos a nuevas necesidades.

Convenios con instituciones de investigación pueden contribuir a la formación continua de los profesionales relacionados con la red, en actualización profesional a nivel de diplomados en temas asociados a aspectos ambientales e hidráulicos de sedimentos, magíster para resolver temas con una componente de investigación, o en la capacitación en el uso de nuevas herramientas de medición. Una forma de fomentar este tipo de colaboraciones es seguir el ejemplo de organizaciones internacionales que ofrecen fondos concursables para realizar conferencias nacionales

e internacionales y financiar programas de doctorado y postdoctorados en el área de transporte de sedimentos, morfología fluvial, obras hidráulicas, eventos extremos, cambio global y contaminación de cuerpos de agua.

La encuesta realizada en este estudio reveló que gran parte de los usuarios piensa que la DGA debería ser la institución responsable de almacenar y dar acceso a la información utilizando datos propios y de fuentes externas, en este sentido, el trabajo con investigadores permite compartir información y establecer estándares de medición y manejo de datos a nivel nacional. Al trabajar continuamente con profesionales en el ámbito de la investigación se promueve la formación de grupos de trabajo temporales para abordar algún caso específico durante un periodo de tiempo delimitado. Desarrollos recientes de instrumentación de bajo costo (ver por ejemplo Orwin & Smart, 2005; Trevathan et al., 2020), permiten realizar monitoreos rápidos de alta densidad de puntos para identificar alguna situación ambiental crítica, apoyar con la toma de decisiones de gestión de los cauces, o para definir nuevas estaciones permanentes de medición que se puedan integrar a la red, con los procedimientos formales de recolección de datos.

Adicionalmente al desarrollo de la red usando instrumentación de medición directa de sedimentos, el trabajo asociativo con estas instituciones puede avanzar hacia la implementación de nuevas técnicas de medición. La experiencia internacional muestra cómo consorcios de este tipo pueden apoyar en la validación de instrumentos de medición usando técnicas indirectas, como difracción láser, acelerómetros, o métodos acústicos usando hidrófonos o geófonos para estimar las tasas de transporte, y complementar las mediciones que se llevan a cabo regularmente. Además, el análisis de topografía de alta resolución o información satelital puede contribuir con la identificación de zonas de erosión y producción de sedimentos en cuencas.

Finalmente, la interacción de sistemas fluviales con actividades humanas como industrias que utilizan los recursos de la cuenca o zonas urbanas, requiere una actualización continua de los métodos analíticos o parámetros de medición, que puedan estar relacionados con contaminantes emergentes, que generalmente no se miden o no se encuentran normados, pero que pueden tener consecuencias y efectos adversos en las personas o en el medio ambiente (ver por ejemplo el trabajo al respecto en el USGS, en Estados Unidos: USGS (2017-b)). Colaboraciones con investigadores en la academia pueden contribuir a identificar casos relevantes y

definir acciones futuras respecto a estos aspectos de la calidad de sedimentos.

4.3.3. Observatorios

Para evaluar la implementación de las nuevas estrategias de crecimiento de la red se puede avanzar de forma gradual, seleccionando una cuenca específica y planificando el trabajo conjunto con organizaciones interesadas, para medir los sedimentos con alta precisión y densidad de datos. En ese sentido, el trabajo colaborativo puede enfocarse en el desarrollo de un modelo conceptual a la escala de cuenca, en un sitio específico o cuenca-observatorio donde los sedimentos tengan un rol preponderante en el desarrollo de actividades económicas y en temas ambientales.

Durante 10 años se podría mantener este observatorio donde se realice una medición continua y análisis de cantidad y calidad de sedimentos, que permitan entender el sistema y los procesos asociados, incluyendo las relaciones entre la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, uso de suelo, disponibilidad y transporte de sedimentos, estudios de riesgo frente a eventos extremos. En el contexto más amplio de diseñar herramientas de gestión de cuencas, este observatorio se utilizaría como caso piloto para plantearse objetivos a nivel de cuenca relacionados con la gestión de sedimentos junto a los usuarios de los recursos fluviales.

La cuenca del Río Maipo, por ejemplo, presenta condiciones ideales para la instalación de un primer observatorio, debido a que es el río más importante desde el punto de vista económico y a que alberga una parte significativa de la población nacional. El estudio detallado de esta zona podría abarcar diversos ámbitos, tales como el desarrollo agrícola, el manejo de residuos industriales, la conservación de parques nacionales y el efecto del desarrollo antropogénico sobre los sedimentos que llegan a zonas costeras. Además, en esta área se encuentran las estaciones Maipo en el Manzano y Mapocho en los Almendros, que tienen unos de los historiales de medición más amplios de la red, lo que permite un estudio integral sobre la evolución de la cuenca a través del tiempo y las causas de su evolución morfológica.

Bibliografía

- Alcayaga, H., Palma, S., Caamaño, D., Mao, L., & Soto-Alvarez, M. (2019). Detecting and quantifying hydromorphology changes in a Chilean river after 50 years of dam operation. *Journal of South American Earth Sciences*. doi:10.1016/j.jsames.2019.04.018
- Arróspide, F., Mao, L., & Escauriaza, C. (2018). Morphological evolution of the Maipo in central Chile: Influence of instream gravel mining. *Geomorphology*, 306, 182-197. doi:10.1016/j.geomorph.2018.01.019
- Bagnold, R. A. (1966). *An Approach to the Sediment Transport Problem From General Physics*. US government printing office: Washington, DC, USA.
- Baird, R. B., Eaton, A. D., Rice, E. W., & Bridgevater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC: American Public Health Association.
- BF Ingenieros civiles. (1983). *Análisis crítico de la red fluviométrica nacional. Red sedimentos VIII, IX y X región*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología.
- Bin Omar, A. F., & Bin MatJafri, M. Z. (2009). Turbidimeter design and analysis: a review on optical fiber sensors for the measurement of water turbidity. *Sensors*, 9, 8311-8335. doi:10.3390/s91008311
- Bonilla, C. A., & Johnson, O. I. (2012). Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma*, 189, 116-123.
- Brils, J. (2008). Sediment monitoring and the European water framework directive. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanita*, 44(3).
- Bunte, K. (2007). *Guidelines for using bedload traps in coarse-bedded mountain streams: construction, installation, operation, and sample processing*. US Department of

Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

- Bunter, K., & Abt, S. R. (2009). *Transport relationships between bedload traps and a 3-inch Helley-Smith sampler in coarse gravel-bed streams and development of adjustment functions*. Colorado Water Institute, Colorado State University.
- Buscombe, D. (2020). SediNet: A configurable deep learning model for mixed qualitative and quantitative optical granulometry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(3), 638-651.
- Carere, M., Dulio, V., Hanke, G., & Polesello, S. (2012). Guidance on chemical monitoring of sediment and biota under the Water Framework Directive. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 36, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.03.005>
- Davis, B. E. (2005). *A guide to the proper selection and use of federally approved sediment and water-quality samplers*. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- DGA. (n.d.). *Información oficial hidrometeorológica y de calidad de aguas en línea*. DGA. Retrieved Octubre, 2020, from <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- DGA. (2020a). *Mapoteca Digital*. Dirección General de Aguas. Retrieved Octubre, 2020, from <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/default.aspx#cinco>
- DGA. (2020b). *Observatorio georreferenciado*. Dirección General de Aguas. Retrieved Octubre, 2020, from <http://snia.dga.cl/observatorio/>
- DGA. (2020c). *Red hidrométrica*. Dirección General de Aguas. Retrieved Octubre, 2020, from <http://www.arcgis.com/apps/OnePane/basicviewer/index.html?appid=d508beb3a88f43d28c17a8ec9fac5ef0>

- Dietze, M., Lagarde, S., Halfi, E., Laronne, J. B., & Turowski, J. M. (2019). Joint sensing of bedload flux and water depth by seismic data inversion. *Water Resources Research*. doi:10.1029/2019wr026072
- Diplas, P., Kuhnle, R., Gray, J., Glysson, D., & Edwards, T. (2008). Sediment transport measurements. *Sedimentation Engineering: Theories, Measurements, Modeling, and Practice. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 110*, 165-252.
- DuBoys, M. P. (1879). Etudes du regime et l'action exerc{\'e}e par les eaux sur un lit a fond de graviers indefinement affouilable. *nnals des Ponts et Chaussées, 5(18)*, 141-195.
- Eads, R. E., & Thomas, R. B. (1983). Evaluation of a depth proportional intake device for automatic pumping samplers. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 19(2)*, 289-292.
- Edwards, T. K., Glysson, G. D., Guy, H. P., & Norman, V. W. (1999). *Field methods for measurement of fluvial sediment*. US Geological Survey Denver, CO. https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-c2/pdf/TWRI_3-C2.pdf
- Einstein, H. A., Anderson, A. G., & Johnson, J. W. (1940). A distinction between bed-load and suspended load in natural streams. *Eos, Transactions American Geophysical Union, 21(2)*, 628- 633. doi:10.1029/TR021i002p00628
- EPA. (2018). *Superfund: Contaminated Sediments*. United States Environmental Protection Agency. Retrieved Octobre, 2020, from <https://www.epa.gov/superfund/superfund-contaminated-sediments>
- EPA. (2020). Superfund. United States Environmental Protection Agency. Retrieved Octobre, 2020, from <https://www.epa.gov/superfund>
- Förstner, U. (2009). Sediments and priority substances in river basins. *Journal of Soils and Sediments, 9(2)*, 89-93.

- Furbish, D. J., Fathel, S. L., Schmeeckle, M. W., Jerolmack, D. J., & Schumer, R. (2017). The elements and richness of particle diffusion during sediment transport at small timescales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(1), 214-237. doi:10.1002/esp.4084
- Gaweesh, M., & Van Rijn, L. (1994). Bed-load sampling in sand-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(12). doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:12(1364)
- Geay, T., Belleudy, P., Gervaise, C., Habersack, H., Aigner, J., Kreisler, A., Seitz, H., & Laronne, J. B. (2010). Passive acoustic monitoring of bed load discharge in a large gravel bed river. *J. Geophys. Res. Earth Surf*, 21. doi:10.1002/2016JF004112
- Government of Canada. (2020). *Water Level and Flow*. Water Office. Retrieved October, 2020, from https://wateroffice.ec.gc.ca/index_e.html
- Gray, J. R., & Gartner, J. (2009). Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. *Water Resources Research*, 45. doi:10.1029/2008WR007063
- Gray, J. R., Laronne, J. B., & Marr, J. D. (2010). *Bedload-surrogate monitoring technologies*. US Department of the Interior, US Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5091/pdf/sir2010-5091.pdf>
- Griffiths, R. E., Topping, D. J., Anderson, R. S., Hancock, G. S., & Melis, T. S. (2014). In *Design of a sediment-monitoring gaging network on ephemeral tributaries of the Colorado River in Glen, Marble, and Grand Canyons, Arizona* (p. 21). U.S. Geological Survey Open File Report 2014-1137. doi:10.3133/ofr20141137
- Griffiths, R. E., Topping, D. J., Andrews, T., Bennett, G. E., Sabol, T. A., & Melis, T. S. (2012). *Design and maintenance of a network for collecting high-resolution suspended-sediment data at remote locations on rivers, with examples from the Colorado River* (Vol. 8). US Geological Survey Techniques and Methods, Book.

- Habersack, H., Kreisler, A., Rindler, R., Aigner, J., Seitz, H., Liedermann, M., & Laronne, J. B. (2017). Integrated automatic and continuous bedload monitoring in gravel bed rivers. *Geomorphology*, 291, 80-93.
- Helley, E. J., & Smith, W. (1971). *Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler*. US Department of the Interior, Geological Survey, Water Resources Division.
- Hicks, D., & Gómez, B. (2016). Sediment transport. In *Tools in Fluvial Geomorphology*, edited by G. M. Kondolf and H. Piégay (pp. 425-461). John Wiley, Hoboken N. J.
- IAEA. (2005). *Fluvial sediment transport: analytical techniques for measuring sediment load*. International Atomic Energy Agency.
- ISO. (2014). *ISO 11657:2014(en) Hydrometry — Suspended sediment in streams and canals — Determination of concentration by surrogate techniques*. Online Browsing Platform. Retrieved Octubre, 2020, from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11657:ed-1:v1:en>
- Japan Meteorological Agency. (2020). Real-time Landslide Risk Map. Retrieved Octubre, 2020, from <https://www.jma.go.jp/en/doshamesh/index.html>
- Knighton, A. D. (1999). Downstream variation in stream power. *Geomorphology*, 29(3-4), 293-306.
- Kondolf, G. M. (1997). Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21, 533-551.
- Lamarre, H., MacVicar, B., & Roy, A. G. (2005). Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. *Journal of Sedimentary Research*, 75(4), 736-741. doi:10.2110/jsr.2005.059
- Lane, E. (1955). The importance of fluvial morphology in hydraulics engineering. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. *Journal of the hydraulics*

Division, 81.

- Laronne, J. B., Outhet, D. N., Carling, P. A., & McCabe, T. J. (1994). Scour chain employment in gravel bed rivers. *Catena*, 22(4), 299-306.
- Leopold, L. B., & Emmett, W. W. (1997). *Bedload and river hydraulics: inferences from the East Fork River, Wyoming* (Vol. 1583). US Geological Survey.
- Mao, L., Comiti, F., & Lenzi, M. A. (2010). Bedload dynamics in steep mountain rivers: insights from the Rio Cordon Experimental Station (Italian Alps). *Bedload-surrogate monitoring technologies*, edited by: Gray, JR, Laronne, JB, and Marr, JD G, 253-265. <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5091/papers/Mao.pdf>
- Mao, L., Dell'Agnesse, A., Huincache, C., Penna, D., Engel, M., Niedrist, G., & Comiti, F. (2014). Bedload hysteresis in a glacier-fed mountain river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(7), 964-976. doi: 10.1002/esp.3563
- Martínez-Carreras, N., Barnich, F., François Iffly, J., O'Nagy, O., & Popleteev, A. (2020). *A high capacity, automatic and small-volume water sampler*. 22nd EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formeln für Geschiebetransport, 2. *Tagung des Int. Verbandes für wasserbauliches Versuchswesen, Stockholm*.
- Ministerio del Medioambiente. (2017). *Guía para la Elaboración de Normas Secundarias de Calidad Ambiental en Aguas Continentales y Marinas*. Ministerio del Medio Ambiente. Santiago, Chile.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan. (2020). River Administration in Japan. Retrieved Octubre, 2020, from https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/english/admin.html
- Morisawa, M. (1968). Streams; their dynamics and morphology. *McGraw-Hill*.
- Morisawa, M. (1968). *Streams their dynamics and morphology*. McGraw-Hill books.

- Orwin, J. F., & Smart, C. C. (2005). An inexpensive turbidimeter for monitoring suspended sediment. *Geomorphology*, 68(1-2), 3=15.
- Pomázi, F., & Baranya, S. (2020). Comparative Assessment of Fluvial Suspended Sediment Concentration Analysis Methods. *Water*, 12(3), 873.
- Rennie, C., Vericat, D., Williams, R. D., Brasington, J., & Hicks, M. (2017). Calibration of Acoustic Doppler Current Profiler Apparent Bedload Velocity to Bedload Transport Rate. In *ravel-Bed Rivers: Processes and Disasters, Chapter: 8* (pp. 209-235). Wiley, Editors: Daizo Tsutsumi, Jonathan B. Laronne.
- Rhoads, B. L. (1987). Stream power terminology. *The Professional Geographer*, 39(2), 189-195.
- Rhoads, B. L. (2020). *River Dynamics: Geomorphology to Support Management*. Cambridge University Press.
- Rügner, H., Schwientek, M., Beckingham, B., Kuch, B., & Grathwohl, P. (2013). turbidity as a proxy for total suspended solids (TSS) and particle facilitated pollutant transport in catchments. *Environmental earth sciences*, 69(2), 373-380. doi:10.1007/s12665-013-2307-1
- Sandoval, R., & Solar, W. (1988). *Manual de terreno y centros de filtrado*. Dirección General de Aguas. Departamento de Hidrología.
- SEDNET. (n.d.). *European Sediment Network*. Retrieved Octubre, 2020, from <https://sednet.org>
- Simpson, S., & Batley, G. (2016). *Sediment quality assessment: a practical guide*. Csiro Publishing.
- Solar, W. (1999). *Manual de terreno y centros de filtrado*. Dirección General de Aguas Laboratorio de Sedimento.
- Tennessee Valley Authority, United States. Bureau of Reclamation, United States. Bureau

of Indian Affairs, & Iowa Institute of Hydraulic Research. (1940). *A Study of Methods Used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams: Analytical study of methods of sampling suspended sediment*. St. Paul Engineer District Sub-office, Hydraulic Laboratory, University of Iowa. https://water.usgs.gov/fisp/docs/Report_2.pdf

Trevathan, J., Read, W., & Schmidtke, S. (1993). Towards the Development of an Affordable and Practical Light Attenuation Turbidity Sensor for Remote Near Real-Time Aquatic Monitoring. *Sensors*, 20(7).

USGS. (2014a). *Operator's manual for the US P-61-A1 point-integrating suspended-sediment sampler*. Federal Interagency Sedimentation Project. (https://water.usgs.gov/fisp/docs/Instructions_US_P-61-A1_030115.pdf)

USGS. (2014b). *Sampling with the US DH-48 depth-integrating suspended-sediment sampler*. Federal Interagency Sedimentation Project. https://water.usgs.gov/fisp/docs/Instructions_US_DH-48_001010.pdf

USGS. (2017-a). Federal Interagency Sedimentation Project. Retrieved Octubre, 2020, from <https://water.usgs.gov/fisp/>

USGS. (2017-b). *Contaminants of Emerging Concern in the Environment*. Environmental Health - Toxic Substances Hydrology Program. <https://toxics.usgs.gov/investigations/cec/index.php>

Vericat, D., Wheaton, J. M., & Brasington, J. (2017). Revisiting the Morphological Approach. Gravel-Bed Rivers. In *Gravel-Bed Rivers: Processes and Disasters, Chapter: 8* (pp. 121-158). Wiley. doi:10.1002/9781118971437.ch5

Walling, D., & Teed, A. (1971). A simple pumping sampler for research into suspended sediment transport in small catchments. *Journal of Hydrology*, 13, 325-337.

Whiteaker, T., Maidment, D., Goodall, J., & Takamatsu, M. (2006). Integrating Arc Hydro Features with a Schematic Network. *Transaction in GIS*, 10(2), 219-237.

doi:10.1111/j.1467-9671.2006.00254.x

WMO. (1994). *Guide to hydrological practices*. Secretariat of the World Meteorological Organization.

Xiaoqing, Y. (2003). *Manual on sediment management and measurement*. *Operational Hydrology Rep. No. 47*. World Meteorological Organization.
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=1709

Yuqian, L. (1989). *Manual on operation methods for the measurement of sediment transport*. *Operational Hydrology Rep. No. 29*. World Meteorological Organization.
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=1691

Anexos

Anexo A. Resultados de la encuesta a los usuarios

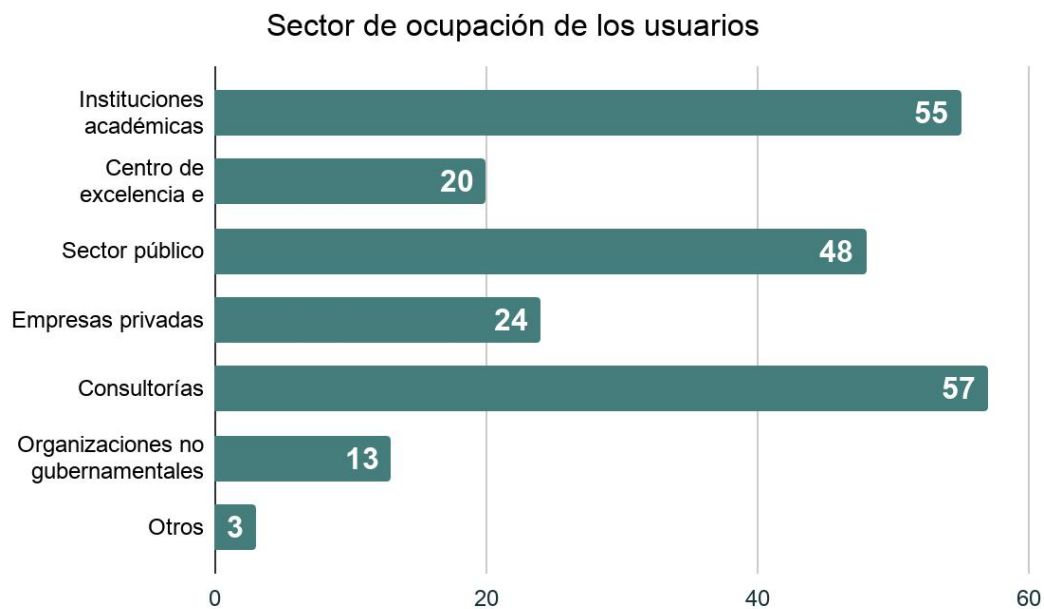


Figura A1. Respuesta ante el requerimiento: Indique el área en que se desempeña (marque todas las respuestas que apliquen). Este ítem fue respondido por 160 encuestados, mientras que el tamaño de la muestra es de 220, debido a que esta se trata de una pregunta con múltiples respuestas.

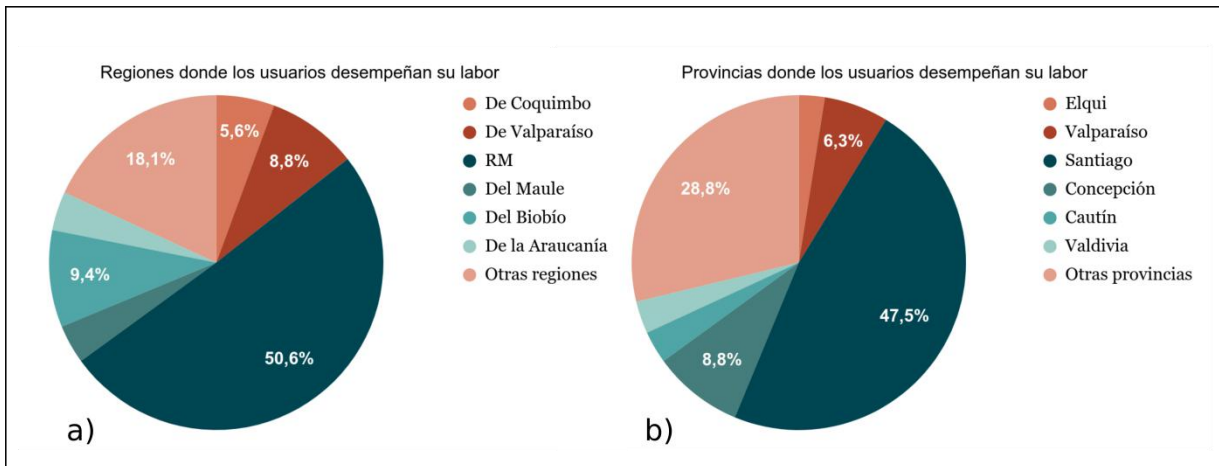


Figura A2. Zonas geográficas donde los usuarios de los datos sedimentométricos desempeñan su labor. a) Respuesta ante el requerimiento: Indique la región donde desempeña su labor. b) Respuesta ante el requerimiento: Indique la provincia donde desempeña su labor. Muestra total, 160 respuestas, correspondiente al total de usuarios y futuros usuarios de datos sedimentométricos.

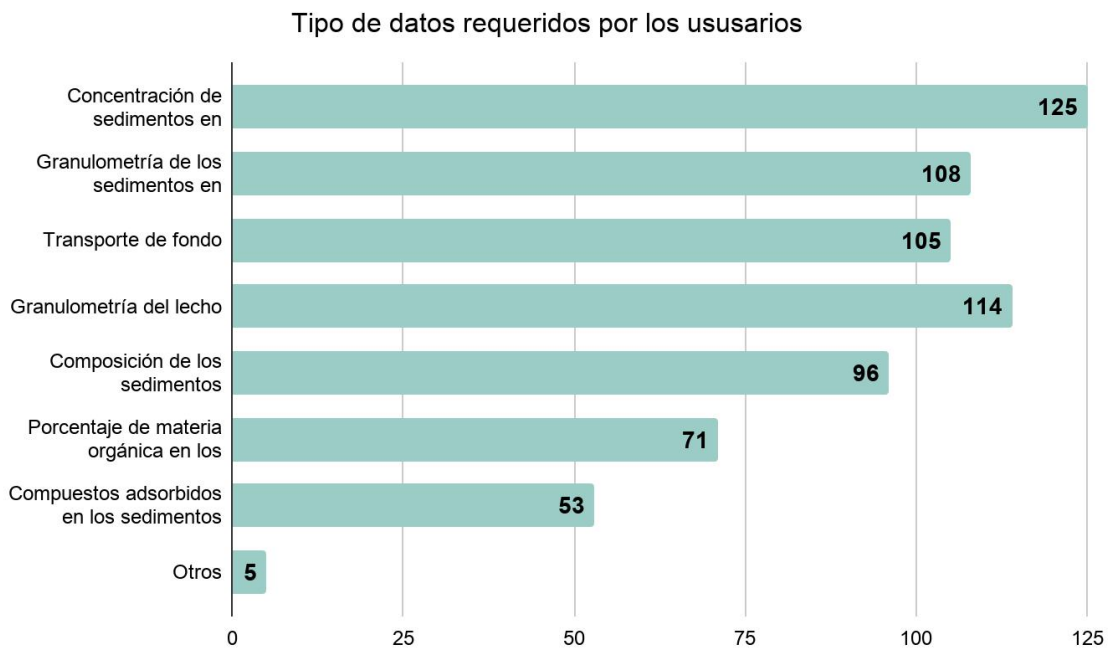


Figura A3. Respuesta ante la pregunta: ¿Qué tipo de datos sedimentológicos ha necesitado o cree que necesitará en el futuro, ya sea desde la DGA o de otra fuente? (marque todas las respuestas que apliquen). Este ítem fue respondido por 160 usuarios, mientras que El tamaño de la muestra es de 677, debido a que esta se trata de una pregunta con múltiples respuestas.

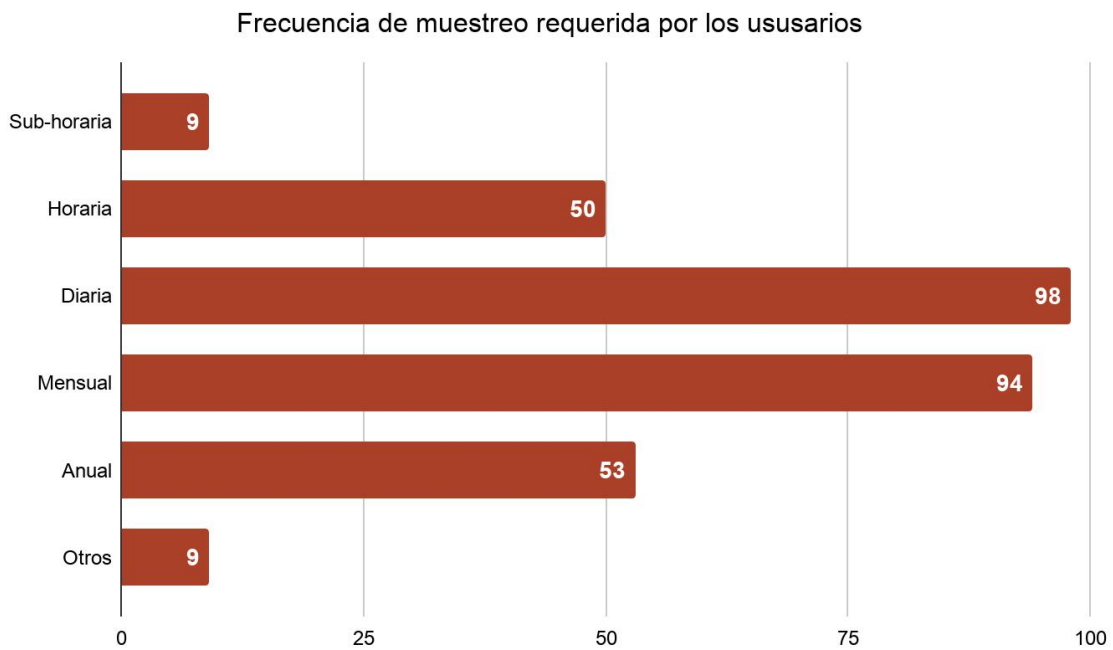
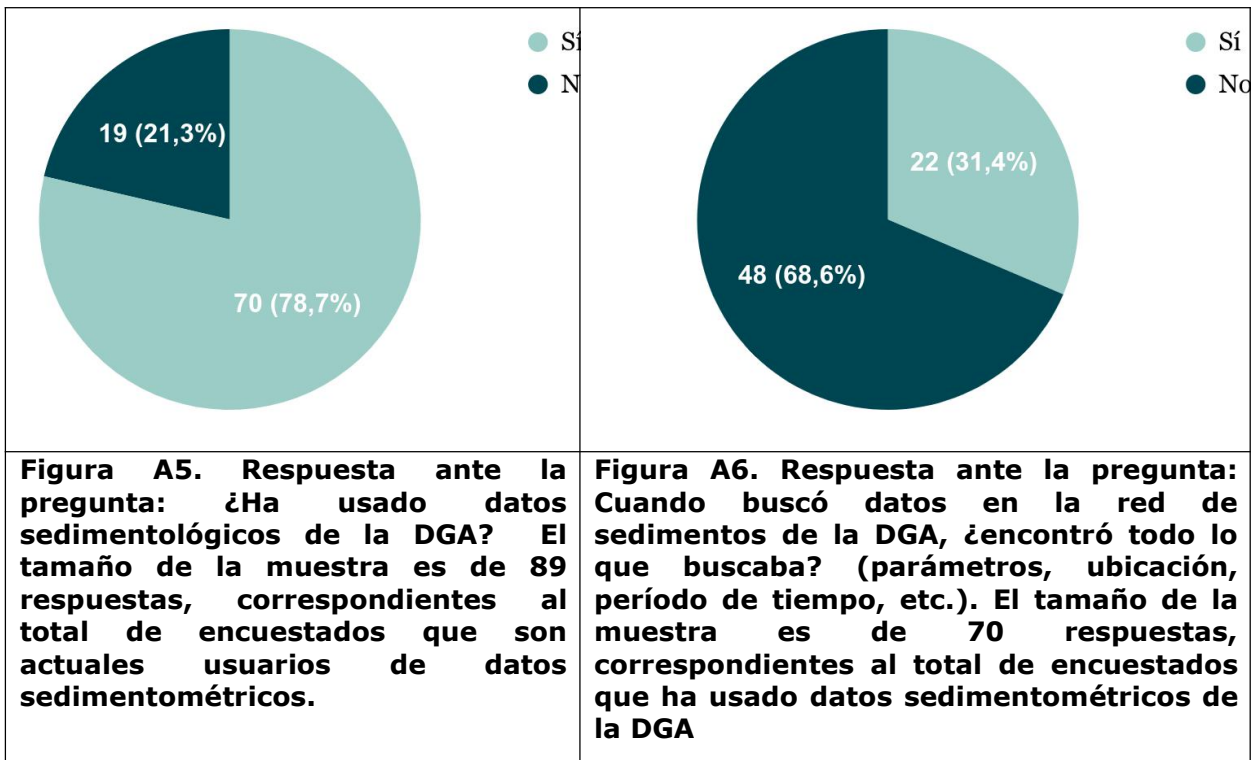


Figura A4. Respuesta ante la pregunta: ¿Cuál es la frecuencia de muestreo que ha necesitado, o cree que necesitará en el futuro? (marque todas las respuestas que apliquen). Este ítem fue respondido por 169 usuarios, mientras que El tamaño de la muestra es de 313, debido a que esta se trata de una pregunta con múltiples respuestas.



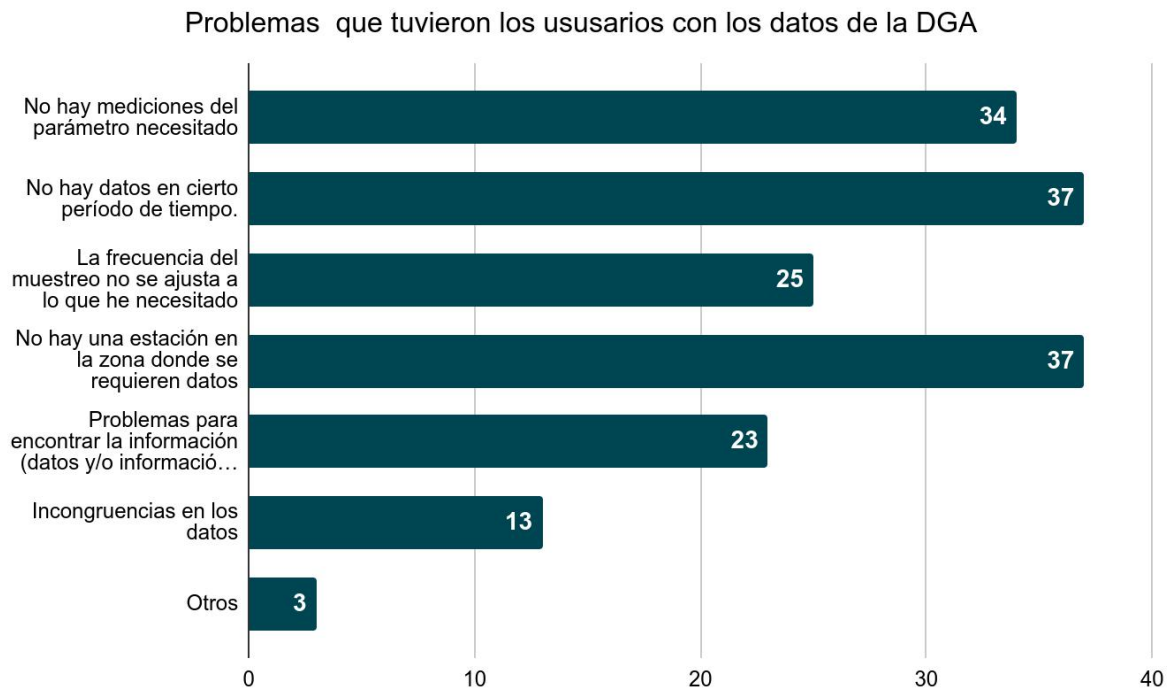


Figura A7. Respuesta ante el requerimiento: Selecciones todos los problemas que tuvo en la búsqueda de datos sedimentológicos en la DGA. Este ítem fue respondido por 48 usuarios, mientras que el tamaño de la muestra es de 172, debido a que esta se trata de una pregunta con múltiples respuestas.

Opinión de los usuarios acerca del enfoque que debiese tener la red de sedimentos

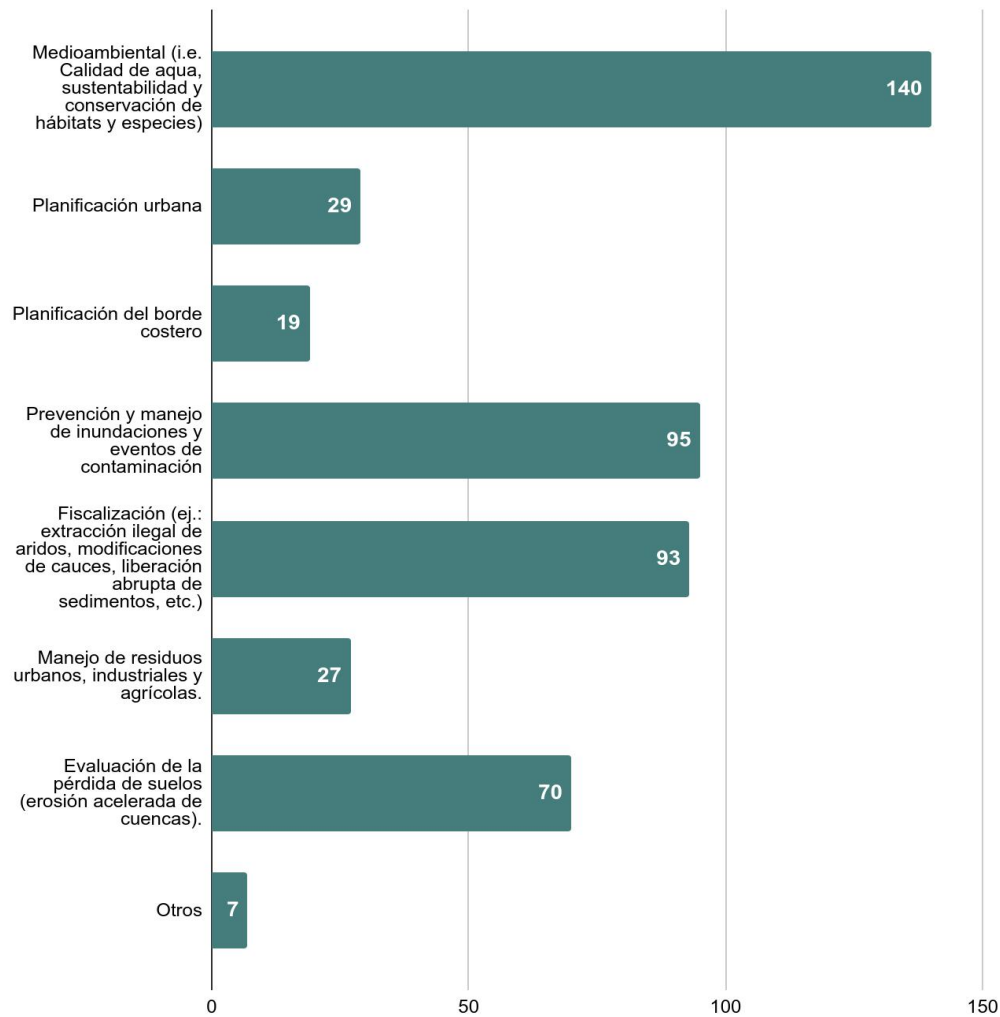


Figura A8. Respuesta ante la pregunta: ¿Cuál considera que debería ser el enfoque de la red de sedimentos? (marque las tres opciones que considere más importantes). Este ítem fue respondido por 160 usuarios, mientras que el tamaño de la muestra es de 480, debido a que cada encuestado debía seleccionar tres opciones.

Opinión de los usuarios acerca del modelo de gestión que debiese tener de la red de sedimentos

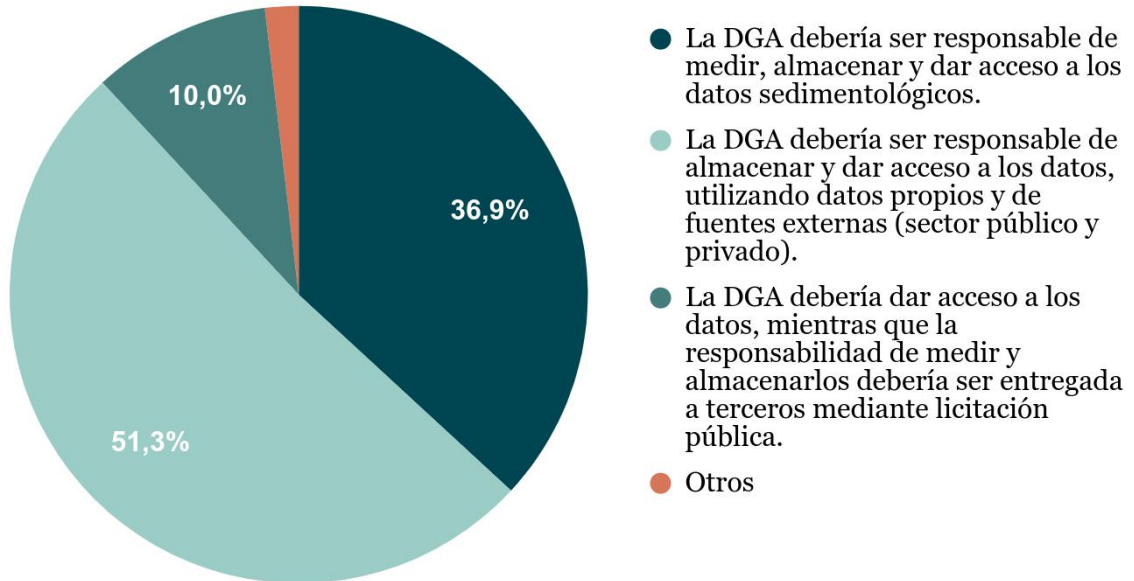


Figura.A 9. Respuesta ante la pregunta: A su juicio, ¿qué modelo de gestión debería usar la red de sedimentos de la DGA? Muestra total, 160 respuestas, correspondiente al total de usuarios y futuros usuarios de datos sedimentométricos.

Tabla A1. Comentarios adicionales de los encuestados, clasificados según tipo.

Ampliación de la red: Nuevas mediciones y colaboraciones
Aumento de la red
¿Es posible participar en la toma de estos datos con la DGA como especialista en suelos, desde la geología y riesgos geológicos?

Considerar calidad de agua y actualizar normativas de calidad o descargas.
Se pueden considerar datos de perfiles estratigráficos de pruebas de bombeo
En general, que al menos coincidan con la red de monitoreo de aguas.
Espero que la red de sedimentos de la DGA se fortalezca y se complete la red, se curen los datos y el acceso a estos sea expedito. Por ejemplo, la parte media y baja de la cuenca del río Maipo casi no tiene estaciones sedimentométricas activas, siendo esta una cuenca que alberga a casi 1/3 de la población.
Es de suma importancia empezar a transporte de fondo, la necesidad de evaluación de erosión y socavación de estructura crítica debería ser prioridad y más en las cercanías de zonas de extracción de áridos.
Esperamos una ampliación de la red, mejora y más entrega de información desde el mundo privado, más fiscalización.
DGA debería fiscalizar la calidad de datos privados, para incorporarlos o no a la red.
Densificar más la red
Invitar a los académicos de todo el país en este proceso, no solo a los de la universidad de Chile o la PUC.
Mayor cantidad de estaciones
Sería ideal que exista continuidad en el tiempo de muestreo de las estaciones, es necesario abarcar varios puntos de muestreo a lo largo del río en diferentes partes de la cuenca (alta, media y baja), y que las estaciones de muestreo distribuidas espacialmente se correspondan con el muestreo temporal.

Soy ingeniero civil, mención ingeniería hidráulica, de la U. de Chile, consultor senior. Y opino, en lo de fondo, que el control superior, tanto de estaciones públicas y privadas, lo debe ejercer la DGA. Consecuentemente, se debe aumentar su dotación, capacitación, con el correspondiente aumento de su presupuesto en la ley. Esto, porque se pierde mucho dinero al licitar para privados, y los trabajos suelen ser deficientes, sin compromiso; por ende, sería un derroche, como la experiencia ha demostrado (tengo experiencia; omito los ejemplos). Mejor colocar los fondos en la DGA, para a su vez potenciarla y subir su nivel profesional, equipamiento y cobertura. Tener presente que esto es un servicio país. Se debe fortalecer las instituciones, no debilitarlas, porque ello repercute en su ineficacia e ineficiencia.

Mejoramiento de estándares y confiabilidad de los datos

La responsabilidad es de la DGA en la calidad y confiabilidad datos no se puede entregar a terceros

Transparencia en la metodología utilizada.

Se requiere una depuración de la estadística sedimentométrica similar a la hecha en análisis crítico
De los 80 Generando datos de gasto sólido en suspensión

Considero que sería mejor externalizar el servicio a una empresa especializada para mejorar la calidad del dato y la periodicidad.

En Patagonia las redes de monitoreo, para validar el esfuerzo de muestreo, deberán ser necesariamente representativas de las diferentes cuencas.

Asegurar la disponibilidad efectiva de datos en las estaciones de monitoreo de acceso público

La red de sedimentos es muy importante en la investigación que estoy realizando y me he encontrado con muchas estaciones que han dejado de estar activas o que tienen vacíos de muchos años, lo que afecta el análisis de las dinámicas sedimentarias de las cuencas. Da la impresión de que el estudio de los sedimentos no es prioridad.

Es muy importante que no se detengan los monitoreos existentes

En la misma plataforma de descarga de datos debería existir un informe de cómo opera el muestreador, con más información respecto a la toma de muestras (instrumentos, zona de muestreo)

si es un puente o de orilla, etc.).
DGA debiera exhibir el control de calidad de los satos que se levantan, de manera que los datos dispuestos en los sistemas estén validados.
Dentro de lo posible, detallar a través de un documento oficial, los equipos y métodos de medición que se utilizaron para medir y monitorear los cauces y sus variables sedimentológicas.
Revisión de la concordancia de los datos, no es posible que para un día determinado se registre caudal 0, con valores (sobre 0) de concentración.
Sería ideal que los días que no cuenten con datos vengan en blanco o con algún indicador de ausencia de datos (ej. -9999).
Mejoramiento y modernización del sistema y/o los instrumentos
Mayor equipamiento para la conservación de muestras, como Coleman de refrigeración portátil con cámara de frío
Falta modernizar el sistema actual.
Los sedimentos son un testigo clave de contaminación y es importante que se tengan presente en los estudios actuales, es por eso que es un buen trabajo la encuesta para indagar y perfeccionar esta área para un mediano corto plazo
Sería más fácil separar los objetivos de la medición de sedimentos. Los datos sub-horarios serían útiles para ver el transporte por crecidas, pero para otros usos no son necesarios
Debería repetir el ejercicio (encuesta) con otras variables hidro-meteorológicas
Acceso a los datos
Deben rescatarse las bases de datos de actuales empresas privadas que alguna vez fueron públicas.
Toda la información debe estar fácilmente disponible por página web y no tener que solicitarla por

ley de transparencia
La forma de entregar los datos no es muy cómoda para trabajarlos luego, sería bueno entregarlos en otro formato de plantilla, para así sea más amigable el trabajo con ellos
En general, el formato de datos en que entregan datos (independiente de la variable) no es adecuado. Deberían dar la opción de entregar datos en formato de texto txt, con un vector de tiempo y otro de la variable de interés.
La accesibilidad y actualización de los datos validados
Misión de la red de sedimentos
[La DGA es] clave para el registro y alerta temprana de grandes avenidas.
Creo que la información que se genera debería ser más difundida y explicada tanto al público general como a los usuarios internos DGA.
Solo agradecer la consulta, creo actualmente junto con hacer el más eficiente uso y manejo de los recursos hídricos, es fundamental poder planificar y monitorear su calidad físico-química, así como disponer de la mejor información estadística para efectos del diseño y uso de la infraestructura asociada al manejo de los recursos hídricos.

Anexo B. Precios de referencias de equipos

Tabla B1. Precios de referencia de equipos de medición de sedimento.

Nombre y modelo	Precio	Referencia	Observación
Helley-Smith Hand-Held Sediment Sampler, Model 8015, 4lb	362 USD	https://rickly.com/helley-smith-hand-held-sediment-sampler-model-8015-4lb/	Uso para vadeo
Helley-Smith Suspended Sediment Sampler, Model 8035, 65lb	1071 USD	https://rickly.com/helley-smith-suspended-sediment-sampler-model-8035-65lb/	Uso colgado desde puente
- ADCP M9 (Sontek)	24.000 USD	https://www.sontek.com/media/pdfs/riversurveyor-s5-m9-brochure.pdf	Uso con una plataforma llamada hydroboard II o bien con un brazo de acero inoxidable desde una embarcación
- Basic transmission with bluetooth (PCM telemetrie)	2500 USD		
- Cable conexion	580 USD		
- Hydroboard II	2600 USD	https://www.sontek.com/media/pdfs/hydroboard-web.pdf	Plataforma hydroboard II+mochila de transporte
- Soft carrying	300 USD		

case bag			
-Turbidimetro OBS+3 - Data logger CR200X -Fuente de Poder Regulada PS150	2254 USD 802 USD 454 USD	https://www.campbellsci.com/obs-3plus	Mide turbiedad y sedimentos en suspensión
Gravelometro	80 USD	https://www.forestry-suppliers.com/product_pages/products.php?mi=22080&itemnum=53249	Granulometria de gravas
Tamices	90 - 150 USD	https://www.cromtek.cl/producto/tamices-analiticos/	Tamices dependiendo de la malla para arenas y finos
USGS A-55 Sounding Reel	1444 USD	https://rickly.com/usgs-a-55-sounding-reel/	Cable para colgar un Helley-Smith
Kit calibracion de turbidez	500 USD (511.000 CPL)	https://www.merckmillipore.com/CL/es/product/Calibration-standard-3000-T,MDA_CHEM-118343	Para calibración de turbidímetros

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DIVISION DE HIDROLOGIA
FORMULARIO DE MUESTREO DE SEDIMENTOS EN SUSPENSION
2.- MUESTREO RUTINARIO

NOMBRE DE LA ESTACION						REGION			
CUENCA		DIA AL DIA		MES		AÑO			
CAJA N°		DISTANCIA A LA ORILLA METROS				ORILLA <input type="checkbox"/> DERECHA <input type="checkbox"/> IZQUIERDA			
TERRENO						LABORATORIO			
						REGIONAL		NIVEL CENTRAL	
DIA	HORA	ESTADO TIEMPO	TEMP [°C]	LIM (mt)	BOTELLA N°	SOBRE N°	VOLUMEN (lts)	CRISOL N°	PESO (mg)
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
OBSERVADOR									
OBSERVACIONES									

ESTADO TIEMPO
D : DESPEJADO
N : NUBLADO
C : CUBIERTO
LL : LLUVIA
P : PARCIAL

Figura C2. Planilla que debe ser llenada por el observador en la medición de sedimentos en suspensión mediante muestreo rutinario.