

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**EL ROL DE LA INGENIERÍA DE PRESAS, EN LA GESTIÓN INTEGRADA DE  
CUENCAS FLUVIALES, PARA PRESAS Y CUENCAS SUSTENTABLES Y  
RESILIENTES**

**GABRIEL TRONCOSO B.<sup>1</sup>**

**RESUMEN**

Las presas y sus reservorios son fundamentales para el desarrollo de cuencas fluviales; sin embargo, en Chile, especialmente en el caso de las presas mineras, su integración en la planificación y gestión territorial es insuficiente. Esto genera desafíos relacionados con la seguridad hídrica, los cuales se ven exacerbados por el cambio climático, lo que resalta la urgente necesidad de desarrollar capacidades y formación técnica para implementar controles innovadores y efectivos.

Los ingenieros de presas mineras de relaves y aguas en Chile han cultivado una cultura de gestión de riesgos basada en experiencias previas con fallas y condiciones sísmicas y climáticas adversas. Este trabajo presenta un enfoque multidisciplinario que aborda aspectos como el uso multipropósito del agua, la gestión de ecosistemas y sedimentos, así como la hidrogeología y la geoquímica. Estos elementos permiten avanzar en la construcción de una cultura en torno a la resiliencia de las represas en sistemas complejos e interconectados, ejemplificada en tres de las cuencas fluviales más pobladas de Chile.

Para lograr resultados sostenibles, es crucial que la toma de decisiones sea informada y que considere la gestión del cambio y los riesgos, apoyándose en tecnologías avanzadas y mejores prácticas. Los ingenieros pueden desempeñar un papel clave al ofrecer información técnica y soluciones innovadoras, al tiempo que fomentan el empoderamiento y la colaboración con las comunidades para avanzar en la planificación de cuencas sostenibles y resilientes.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil Hidráulico, Consultor en GEKO DIP SPA y Presidente Comité Técnico Internacional U: Dams and River Basin Management, en ICOLD - email: gtrncoso@geko-ingenieria.cl

## **1. INTRODUCCIÓN**

El rol de los embalses y sus reservorios en el desarrollo y gestión sustentable de los países — y particularmente de las cuencas hidrográficas donde se ubican — es indudable y ampliamente estudiado, como se puede leer en el Boletín 149 de ICOLD. Es fundamental fomentar la participación temprana y colaborativa de las comunidades y los interesados, junto con los tomadores de decisiones, durante las etapas de planificación de proyectos y todo el ciclo de vida de las presas. Esto debe realizarse con estándares adecuados y un análisis riguroso de riesgos e incertidumbres, así como el establecimiento de medidas de control y mitigación. Estas acciones son esenciales para minimizar las consecuencias y maximizar los beneficios sociales, ecológicos y económicos a lo largo del ciclo de vida del proyecto de la presa y su cuenca hidrográfica. Además, es crucial considerar posibles fallas, la activación de peligros naturales y cambios en la población o en el entorno, especialmente frente a la actual amenaza del cambio climático en relación con la seguridad hídrica y el control de crecidas.

### **1.1.Contexto General**

La gestión integrada de cuencas —según el Banco Mundial— tiene por objetivo: Establecer un marco de coordinación en el que todas las administraciones y partes interesadas involucradas en la planificación y gestión de las cuencas hidrográficas puedan reunirse para desarrollar un conjunto acordado de políticas y estrategias. Esto permite lograr un enfoque equilibrado en la gestión de la tierra, el agua y los recursos naturales. Por lo tanto, la participación de los operadores de presas es indispensable en la planificación y elaboración de estrategias dentro de la cuenca.

Chile, con 4,000 km de costa y un ancho promedio de 200 km, presenta 129 cuencas hidrográficas, principalmente exorreicas, que se extienden desde las altas cumbres de la cordillera de Los Andes hasta el océano Pacífico. Esta diversidad de cuencas, poblaciones, actividades económicas y ecosistemas se ve enriquecida por la minería del cobre, que genera desechos de relaves. En el país, hay 757 depósitos de relaves en diferentes etapas de su ciclo de vida, de los cuales al menos 15 son clasificados como de alta consecuencia y han sido evaluados bajo estándares internacionales para la gestión de presas, como lo es el “ Global Industry Standard on Tailings Management “ reconocido por sus siglas como GISTM.

### **1.2. Desafíos y Objetivos**

No obstante, las instancias de coordinación con desarrolladores de proyectos de presas y sus stakeholders suelen limitarse a las etapas de planificación temprana, enfocándose en establecer indicadores y compromisos para la fiscalización. Esto diluye la planificación a lo largo del tiempo y se centra en actividades de participación ciudadana y capacitación, lo que deja poco espacio para que los ingenieros de presas aporten su conocimiento técnico. Esto dificulta la toma de decisiones y la implementación de controles adecuados frente a riesgos declarados.

El objetivo de este trabajo es, basado en la experiencia como ingeniero independiente y especialista en equipos de ingeniería de registro en siete tranques de relaves distribuidos en

tres cuencas hidrográficas, resaltar el aporte y los desafíos que los ingenieros de presas pueden enfrentar en la gestión integrada de estas cuencas. Se busca fomentar un trabajo colaborativo y coordinado que permita una asociación efectiva y beneficiosa para todas las partes involucradas.

## **2. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN CHILE**

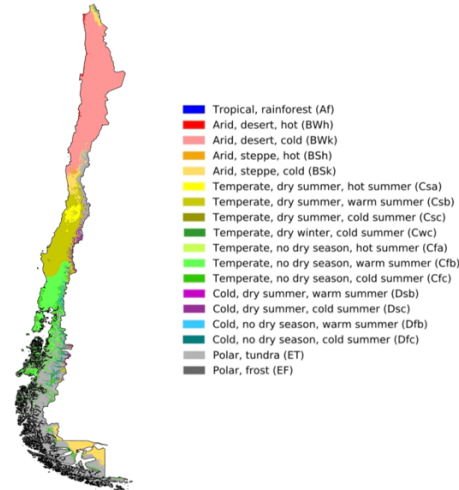
### **2.1. Geografía y Clima**

Según datos de la Dirección General de Aguas (DGA) de Chile, existen 129 cuencas hidrográficas que cubren una superficie total de 889,520 km<sup>2</sup> del territorio continental, incluyendo la isla grande de Chiloé. De esta superficie, 756,625 km<sup>2</sup> son específicamente de cuencas, y el 15% de esta área corresponde a zonas transfronterizas compartidas con países limítrofes al este, como Argentina y Bolivia.

Estas cuencas abarcan diversas características geográficas, que incluyen altiplanos y salares en el desierto del norte, así como ríos y lagos en regiones con altas cumbres de la cordillera de Los Andes en la zona centro-sur. También se encuentran zonas glaciales en la Patagonia chileno-argentina, aunque algunas cuencas aún carecen de una definición limítrofe clara.

Del total de la superficie de las cuencas que cubren la totalidad del territorio chileno continental, solo un 10% son endorreicas, esto es que sus aguas en superficie no llegan al mar, por tanto, 803.090 km<sup>2</sup> corresponde a la superficie de cuencas hidrográficas exorreicas que escurren mayoritariamente y preferentemente de esta a oeste, hasta el Océano Pacífico.

El territorio chileno se puede clasificar en 4 zonas geográficas, según similares condiciones climáticas desde el Norte a Sur como: Norte Grande, Norte Chico, Zona Central, Zona Sur y Zona Austral más reconocida como zona patagónica. Los climas del Chile continental son esencialmente áridos (B), templados (C) y polares (E), este último debido a la elevación de los Andes. Los climas predominantes son la alta tundra (ET) y el mediterráneo (Cs).



\*Isotherm used to separate temperate (C) and continental (D) climates is -3°C  
 Data source: Climate types calculated from data from WorldClim.org

Figure 1 Köppen clasificación de climas en Chile

De esta forma, en general se puede deducir que las zonas geográficas de Chile y sus cuencas hidrográficas se pueden distribuir según se muestra en Tabla 1.

Tabla 1 Cuencas superficiales y zonas geográfico-climáticas

Zona Geográfica	Número total de cuencas	Superficie de las cuencas (Miles Km <sup>2</sup> )	Clasificación de climas Küppen
Norte Grande	19	183,24	Arid, desert.
Norte Chico	21	135,13	Arid, desert to Arid, Steppe.
Central	25*	122,27	Temperate, dry summer, hot summer to cold summer.*
Sur	25*	132,70	Temperate, no dry season, hot summer to cold summer.*
Austral	19	375,11	Polar tundra to frost. Arid Steppe, cold.
*zonas montañosas altas de los Andes	50		Cold, dry summer, warm summer to cold summer

## 2.2. Distribución de la población

Por medio de una aproximación matemática en función de la superficie del territorio y densidad poblacional regional, según datos de último censo, es factible distribuir la población en forma aproximada en las 129 cuencas hidrográficas catastradas.

En el gráfico de la Tabla 2 se muestra la superficie total de cuencas supeditadas en cada región o cuales, también comparten superficie en porcentaje, interregionalmente, traspasando los límites geopolíticos de cada región. También se muestra la densidad poblacional chilena asociada a cada cuenca. Notar que la superficie total de cuencas, no necesariamente es coincidente con la superficie de territorio chileno pues existen cuencas transfronterizas y por

ende, una superficie aproximadamente de 10% de las cuencas, están en territorio Boliviano o Argentino, razón por la cual, la densidad poblacional puede variar respecto a las informadas por medios oficiales.

Tabla 2 Superficie y población en cuencas, según distribución geopolítica

Zona Geográfica	Región (Límites geopolíticos)	Población Miles (2024)	Total de superficie de las cuencas Km <sup>2</sup>	Densidad poblacional /Km <sup>2</sup>
NORTE GRANDE	I	406,29	42498,8	9,56
	XV	261,78	16605,5	15,76
NORTE CHICO	II	718,23	126056,7	5,70
	III	319,99	75751,1	4,22
CENTRAL	IV	879,27	40560,4	21,68
	V	2025,69	16146,5	125,46
	XIII	8420,73	15452,8	544,93
	VI	1025,59	16418,8	62,46
	VII	1171,98	30390,9	38,56
SUR	VIII	2207,94	37087,6	59,53
	VII-IX	1032,16	31734,6	32,52
	XIV	412,79	18410,0	22,42
	X-XI	912,17	49844,5	18,30
AUSTRAL	X-XI	108,54	142874,1	0,76
	XII	183,24	229688,4	0,80

De esta manera, es posible estimar, la mayor concentración de la población, se ubica en las cuencas centrales de Chile, con el 73% de la población del país, distribuida en 25 cuencas en las cuales, cerca del 40% de la población chilena habita solo en una cuenca, llamada: cuenca del río Maipo, que es la cuenca que asigna a Santiago capital y la mayor parte de la región metropolitana. En la Figura 2 es posible ver la distribución geográfica de la población y la superficie de la cuenca. La población más alta se encuentra en el centro de Chile en zonas templadas, y la densidad más baja, en zonas climáticas remotas del sur y del norte, polares y desérticas.

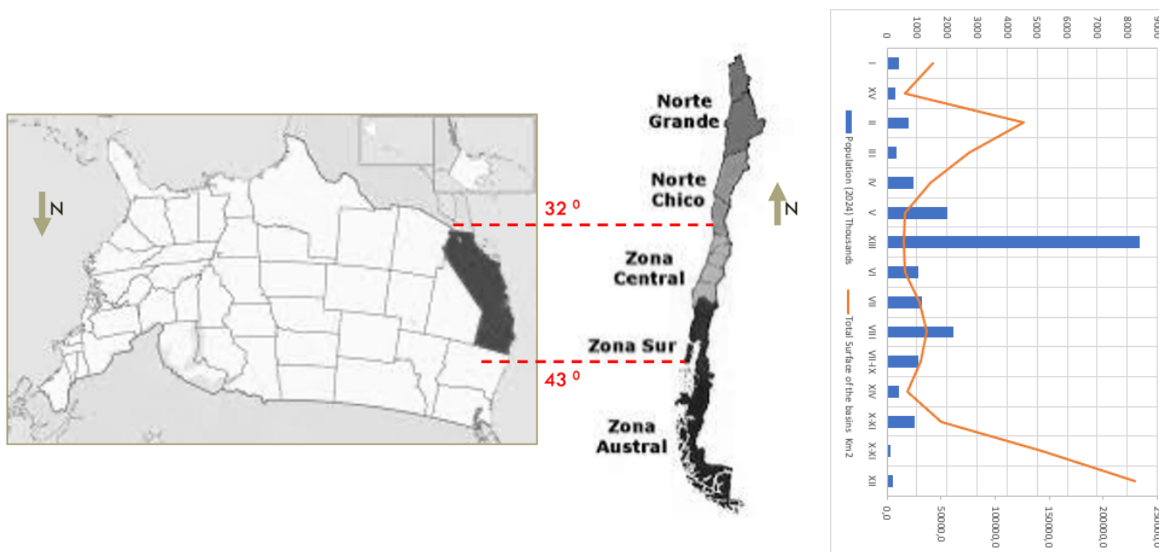


Figura 2 Distribución geográfica de la población y del área de las cuencas. Vista esquemática de referencia, del centro de Chile en el hemisferio sur, cuencas exorreicas al Océano Pacífico, en paralelos equivalentes en el hemisferio norte en EE. UU. en la costa oeste, como el estado de California.

Las cuatro cuencas más pobladas de Chile, que concentran más del 55% de la población chilena, se nombran y describen en la Tabla 3.

Tabla 3 Cuencas ubicadas en Chile Central que concentran el 55% de la población.

COD	Nombre	Área Km <sup>2</sup>	Región	% Por región	Población Aproximada
054	Rio Aconcagua	7334,27	V	100%	920135
057	Rio Maipo	15274,14	V - XIII - VI	(4 - 91 - 5)% (0,2 - 7 - 92 -	7698644
060	Rio Rapel	13766,76	V - XIII - VI - VII	0,8)%	1323979
083	Rio Bio-Bio	24370,61	VIII - IX	(67 - 33)%	1233650

### 2.3. Uso del Agua

Los indicadores chilenos totales de consumo de agua, se definen de acuerdo con la Tabla 4.

El principal consumo de agua es agrícola, que se desarrolla principalmente en las cuencas norte chico, centro y sur de Chile. Sin embargo, el consumo de agua potable está directamente asociado a una mayor concentración de población en las cuencas centrales. La minería incluso solo representa el 4% del consumo de agua, hay que darse cuenta de que las minas se encuentran en su mayoría en cuencas desérticas y áridas desde las zonas central hasta el Norte grande, sin acceso a fuentes importantes de agua superficial, por lo que la minería está impulsando el desarrollo de fuentes y tecnologías alternativas, como aguas subterráneas, desalinización y bombeo, uso de agua de mar, hidroeficiencia y recuperación de agua. El agua juega un papel importante en la minería para procesos como la molienda, el espesamiento y la conducción de relaves y pulpa.

Tabla 4 Indicadores de consumo de agua por sector por año, DGA 2016.

Sector / Actividad	Volumen (Hm <sup>3</sup> )	% Actividad / Sector
Agricultural	7887	72%
Drinking water	1291	12%
Industry	731	7%
Energy	495	5%
Mining	430	4%
Cattle raising	75	1%
Total (Hm <sup>3</sup> )	10909	

De la tabla anterior y considerando la población chilena, es posible averiguar que la tasa de consumo, para agua potable es: 64,3 m<sup>3</sup> por año, por persona. Así, el consumo total de agua para beber y con fines sanitarios, solo en la zona central es: 954,6 Hm<sup>3</sup>, de los cuales 541,5 Hm<sup>3</sup> se consumen en la cuenca del río Maipo.

#### 2.4. Presas y Tranques de relaves

De acuerdo con el Servicio Nacional de Geología y Minería [7] existen 696 instalaciones de presas de relaves en diferente estado: 112 activas, 436 no activas, 148 abandonadas o cerradas. Hay un catastro activo en el que otras 61 instalaciones de relaves están abandonadas y con propietario desconocido. Así que trabajo en progreso para aclarar su estado. Estas presas almacenan una cantidad total de 16.840 Hm<sup>3</sup> de relaves. En otras palabras, en pocas palabras: la industria minera está acostumbrada a gestionar, por año, un 150% más de volumen de relaves, que el volumen de consumo chileno de agua.

En la Tabla 5, es posible encontrar la distribución de las instalaciones de relaves en cinco zonas geográficas. La mayor concentración de instalaciones de almacenamiento de relaves se encuentra en las zonas central y norte. El autor tuvo la oportunidad en los últimos 10 años de participar en 15 presas de relaves de clasificación de altas consecuencias, en diversos roles de ingeniería, incluido un ingeniero especialista en el equipo de ingeniería de registro para 3 instalaciones. De ellos, 10 se encuentran en las tres cuencas más pobladas. Entonces, este trabajo de ahora en adelante, se centrará en estas tres cuencas. La cuarta cuenca más poblada es la cuenca del río Bio Bio, sin embargo, no hay presas de relaves en esa cuenca.

De acuerdo con el Catastro de Represas de la FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, existen un total de 49 embalses de agua natural y represas en Chile, principalmente para: agua potable, riego e hidroeléctrica. Con una capacidad total de almacenamiento de agua de: 14.211 Hm<sup>3</sup>, suficiente para abastecer de agua en un año de consumo chileno, sin embargo la ubicación en cuencas diferentes a donde se generan demandas, inducen a que se requiera más capacidad de embalse. El plan de desarrollo en curso de los embalses parece no ser suficiente para cubrir las incertidumbres del cambio climático y la pérdida de capacidad de los embalses debido a las altas cargas de sedimentos.

La distribución del número total de instalaciones de relaves y presas en las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel se muestra en la Figura 3.

Tabla 5 Estado y ubicación de las instalaciones de almacenamiento de relaves

Zona Geográfica	Región (Límites geopolíticos)	Total de tranques de relaves	Activos	No activos	Abandonados
NORTE GRANDE	I	7	1		6
	XV				
NORTE CHICO	II	43	12	20	11
	III	155	28	105	22
CENTRAL	IV	368	39	232	97
	V	73	18	47	8
	XIII	24	6	14	4
	VI	18	4	14	
	VII	3	2	1	
SUR	VIII				
	VII-IX				
	XIV				
AUSTRAL	X-XI	5	2	3	
	XII				

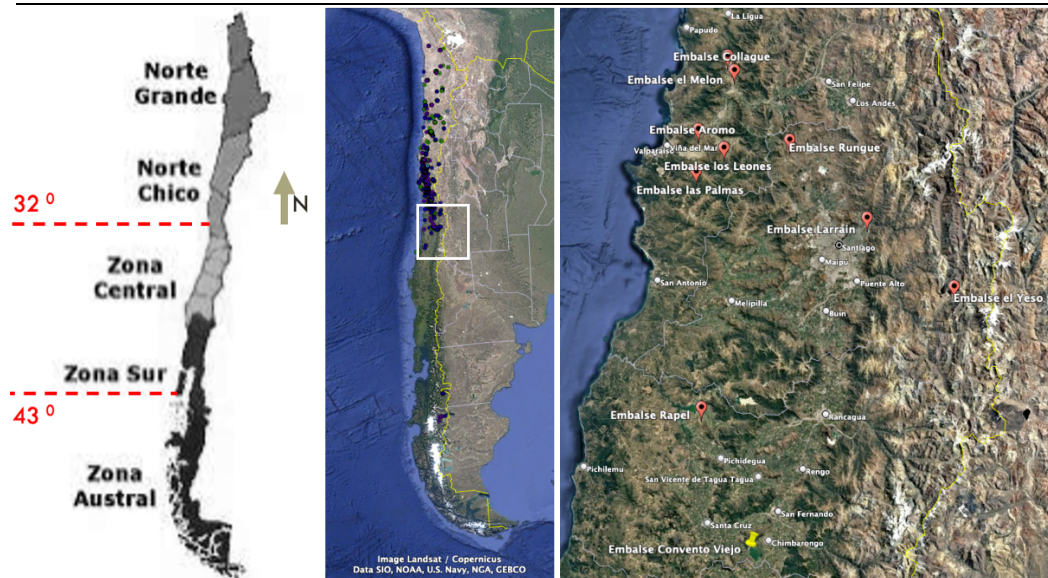


Figura 3 Ubicación de instalaciones de almacenamiento de relaves y presas en las cuencas del Aconcagua, Maipo y Rapel.

### 3. ANÁLISIS CUALITATIVO SOBRE LA EXPOSICIÓN DE LA ZONA DE CHILE CENTRAL AL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS RIESGOS

De acuerdo con el portal de conocimiento sobre cambio climático del Banco Mundial: Chile es muy vulnerable a diversos peligros naturales, como terremotos, actividad volcánica y tsunamis, así como a riesgos asociados al cambio climático, como incendios forestales, inundaciones, deslizamientos de tierra y sequías. Entre 2008 y 2015, el país experimentó sequías que afectaron significativamente las regiones central y sur.

Se prevé que el cambio climático altere la frecuencia e intensidad de estos peligros, lo que podría tener graves consecuencias para el crecimiento económico y el desarrollo regional, afectando áreas como la generación de electricidad, la agricultura y la salud pública

Si hacemos un análisis de riesgo de consecuencias, desde la perspectiva de la población humana que reside en una cuenca determinada, podemos determinar que de las áreas geográficas descritas, la zona central de Chile, sus sectores costeros, valles y montañas, serían las zonas más afectadas, por ser el de mayor densidad poblacional, y luego, mayor exposición de su población a peligros como inundaciones, incendios, sequías y fallas en la infraestructura, con motivo de eventos sísmicos, con peligro para la vida y la salud humana.

Sin descartar la posibilidad de que un evento sísmico pueda ocurrir junto con un evento climático, podemos deducir que el riesgo e incertidumbre frente al cambio climático, en la zona central de Chile debe ser de especial atención.

Según reporte del Banco Mundial y su portal: "Climate Change Knowledge Portal", para las cuencas de la zona central de Chile (Watershed #LAC002700) la evolución de la temperatura y precipitación, agrupados en promedios por cada estación, cada 30 años, ha presentado la siguiente variación desde 1900 a 2020, como se muestra en la Figura 4.

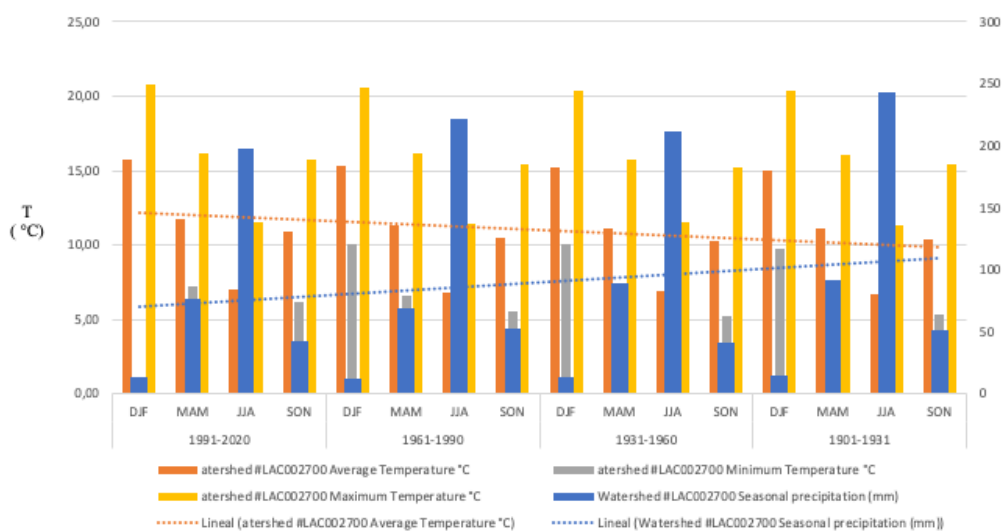


Figura 4 Evolución de la temperatura y la precipitación 1900-2020, en las cuencas centrales de Chile, de acuerdo con el Banco Mundial.

De esto, se deduce que la exposición al riesgo de cambio climático, frente al aumento de temperaturas y disminución de precipitaciones, frente a un creciente aumento de la población urbana, es muy asertivo, razón por la cual: medidas de control y mitigación deben ser diseñadas, incorporadas en la planificación territorial e implementadas, y que estas sean económicamente viables, con cuidado al medio ambiente y equidad social, imponiendo una serie de desafíos a tomadores de decisiones y stakeholders.

#### **4. PRÁCTICAS INTEGRADAS DE GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN**

Gestión integrada como parte de la planificación: No es solo una cuestión de respetar los límites de otras partes, también es una cuestión de ampliar los límites a nivel de cuenca. Planificar con la comunidad, no para la comunidad.

##### **4.1 Presas y gestión integrada de cuencas**

La gestión integrada de las cuencas hidrográficas tiene como objetivo establecer un marco de coordinación mediante el cual todas las administraciones y partes interesadas involucradas en la planificación y gestión de las cuencas hidrográficas puedan reunirse para desarrollar un conjunto acordado de políticas y estrategias de modo que se pueda lograr un enfoque equilibrado y aceptable para la gestión de la tierra, el agua y los recursos naturales [3].

Las represas representan un actor esencial en una cuenca fluvial, ya que no solo proporcionan beneficios para fines de desarrollo [5], sino que también podrían tener impactos en los ecosistemas y la población río abajo en situaciones de emergencia. De las definiciones anteriores, podríamos destacar tres temas, que tienen en común la planificación y gestión de cuencas y presas, para procesos de toma de decisiones que integrados, darán como resultado presas y cuencas más sostenibles y resilientes, para garantizar la seguridad hídrica:

- Gobernanza: Marco, rendición de cuentas, políticas y estrategias
- Planificación: Con las partes interesadas, incluidos los ingenieros de presas.
- Gestión: Riesgos y Cambio, a escala de cuenca.

##### **4.2. Rol de las presas e Ingeniero de registro de tranques de relave, en la planificación**

En el ámbito de la gran minería, las presas y tranques de relaves de alta y mayor clasificación cuentan con la figura del "Ingeniero de Registro", una posición formalmente establecida debido a la implementación del GISTM y las modificaciones al decreto 248 de Sernageomin. En Chile, esta figura es comúnmente utilizada, especialmente en empresas como CODELCO, así como en compañías nacionales y multinacionales, para la gestión de relaves.

En las cuencas estudiadas hay 10 instalaciones de almacenamiento de relaves, para las cuales el autor ha estado participando en diversos roles de ingeniería, tales como: especialista apoyo e IdR, especialista geotécnico e hidráulico, revisor independiente e ingeniero consultor para implementación de estándares GISTM, durante diferentes etapas del ciclo de vida de cada presa. Debido a los acuerdos de confidencialidad, en diferentes asignaciones, no es posible

aportar a este documento información sobre detalles ni de producción o de rendimiento comercial, por lo que la información y datos aquí presentados, es todo de dominio público.

El nombre y el estado de cada presa y la etapa correspondiente del ciclo de vida se mencionan en la Tabla 5, también se describen los principales desafíos para los ingenieros y los incidentes detectados de dominio público.

Tabla 5 Desafíos e incidentes de ingeniería de los principales tranques de relaves, en las cuencas de Aconcagua, Maipo y Rapel, Ref [8]

Basin Name	Name of the tailing storage facility	Stage of life cycle	Challenges for engineering	Incident
Aconcagua River	Los Leones	Inactive	Operation as water reservoir	
	Piuquenes	Inactive	Old water ways designs, adaptation is required	
	El Torito	Active	First TSF obtaining agreement with communities about EPRP application	El Cobre TSF failure 1965 earthquake, 200 death
	Tranque N4	Inactive	Used for pilot testing for HDS technology.	
Maipo River	Perez Caldera	In Remotion	30 years remotion plan notcomply, because water scarcity	Bypass tunnel raice tower failure, floods 1987, alert of overtopping
	Ovejería	Active	Both TSF nearby, similar stakeholders, water recovery and shaire agreements. Application of new technology Mad-muster, floating solar pannels. Special requirements and studies regarding underground water and infiltrations	
	Las Tórtolas	Active		
Rapel River	Barahona	Inactive	Water recovery and stabilization wells. Control of acid drainage.	1918 Earthquake failure
	Caren	Active	Stage construction and operation as water dam. Molibdenum recovery plant built downstream and pilot farm, irrigated with TSF clear water	2006 tailing release, with enviermenta impact downstream
	Cauquenes - Colihues	Re procesing	Repressing applying pitoning technology	

## 5. CONTRIBUCIÓN DE LOS INGENIEROS DE TRANQUES DE RELAVES MINEROS A NIVEL DE CUENCA

De la experiencia del autor y recabada de Ingenieros, que han actuado como Ingenieros de registro (IdR) en cada uno de los tranques de relaves mencionados en la Tabla 5, se deducen algunas prácticas y ejercicios que se desprenden de la operación y/o de sus procesos de Ingeniería, que bien podrán aportar a la gestión integrada en cuencas.

Algunos desafíos relacionados con el empoderamiento de los ingenieros, informar, analizar e involucrar a las partes interesadas en la gestión del cambio y los riesgos para "procesos de toma de decisiones informados", como en:

- Gobernanza:** Incluye la ingeniería independiente, políticas de gestión de riesgos y el empoderamiento de las instituciones estatales en la regulación y derechos sobre el agua. Se promueven las mejores prácticas operativas para reducir incertidumbres y establecer controles críticos, así como la evaluación periódica de riesgos con el objetivo de mantenerlos "tan bajos como sea razonablemente practicable" (ALARP, por sus siglas en inglés). Este proceso implica una evaluación y mejora continua, así como la creación de políticas y la coordinación multidisciplinaria para abordar de manera oportuna y resiliente riesgos como la sedimentación, el cambio climático, el medio ambiente, el desempeño social, la seguridad de las presas y la seguridad pública.

- **Gestión del cambio:** Estudio sobre las incertidumbres y la vigilancia de los recursos hídricos. Este estudio se centra en la aplicación de soluciones adaptativas y en la mejora de las tecnologías para la vigilancia y monitoreo de los recursos hídricos. Se enfatiza la importancia de mantener comunicaciones transparentes y garantizar la disponibilidad de información entre todas las partes interesadas en una cuenca para toma de decisiones informada. Esto contribuye a fortalecer la confianza entre los diferentes actores del ámbito público, privado y comunitario. Además, se busca optimizar el uso de los recursos hídricos a nivel de cuenca y desarrollar capacidades en este ámbito.
- **Planificación con la comunidad:** Reducir las asimetrías en la percepción sobre los riesgos, colaboración multipropósito, operaciones de represas y aplicación de políticas de asociatividad y “win-win” mutuamente beneficiosa con los grupos de interés, a nivel de cuenca hidrográfica y/o también transfronterizas. Todavía se debe avanzar en el manejo de las cuencas de agua subterráneas y las conexiones hidrogeológicas con las cuencas superficiales. El monitoreo de la calidad del agua potable rural (APR) cercana a proyectos mineros, el uso eficiente de la energía y el análisis en torno al uso y operación de barreras hidráulicas y proyectos de desalinización, uso de agua de mar, son variables y alternativas que también deben evaluarse e incorporarse en la planificación de recursos hídricos a nivel de cuenca.

## 6. CONCLUSIONES

El cambio climático está desafiando nuestra profesión, sin embargo, hay mucha información de fondo y conocimiento que se ha desarrollado por los ingenieros de presas, además para adaptar o proporcionar diseños y controles de mitigación, que podría ayudar de manera importante a la toma de decisiones a escala de cuenca. Muchas contribuciones podrían provenir de los ingenieros de presas sobre la gestión integrada de cuencas fluviales, sobre ella: gobernanza, planificación, gestión de riesgos y cambios, como se describe a continuación:

### 6.1. Gobernanza

Gobernanza para la asociatividad público-privada-comunitaria. Rendición de cuentas, rol y responsabilidades de los ingenieros de Infraestructura pública y privada. Lecciones aprendidas de varios incidentes y fallas para cambiar la ley si es necesario, actualizar los estándares y normas.

### 6.2 Planificación

Planificación de recursos hídricos con la comunidad, evaluación de la capacidad de los embalses, mejoras de infraestructura, manejo de sedimentos y enrutamiento aguas abajo, alertas y preparación para emergencias, balances económicos para demandas y financiamiento. Evaluación y benchmarking alternativo de nuevas fuentes de suministro de agua, uso multipropósito.

### **6.3 Gestión de cambios y riesgos**

Gestión de riesgos y cambios para la toma de decisiones informadas, incluida la aplicación de la Mejor Tecnología Disponible (BTA por sus siglas en Inglés) y las mejores prácticas operativas (BOP por sus siglas en Inglés). Aplicación de criterios para definir lo que es: Tan bajo como sea razonablemente posible (ALARP por sus siglas en Inglés), sobre reducción de riesgos e incertidumbres, para la seguridad hídrica, para fines productivos, ecosistemas y personas.

Sin duda, las contribuciones y el conocimiento de los ingenieros de presas y tranques de relaves son indispensables para el desarrollo de planes integrados a nivel territorial. Sin embargo, es necesario un cambio cultural en nuestra profesión, que fomente la colaboración entre propietarios, operadores, constructores, ingenieros y científicos, permitiendo trabajar fuera de la zona de confort y en equipo multidisciplinario.

Esto dará lugar a soluciones innovadoras que aborden los objetivos de desarrollo sostenible y resiliencia, mejorando la gestión de riesgos a nivel de cuenca y promoviendo la planificación colaborativa con las comunidades, incluso ante diferentes percepciones.

La planificación con la comunidad, más la asociatividad público-privada-comunidad, más el desarrollo de capacidades a escala de cuenca, debería ser un deber.

### **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a Dr. Jorge H. Troncoso, a sus más de 60 años de aportes a la práctica de la Ingeniería de presas y tranques de relaves en Chile e Internacional, quién generosamente ha mantenido un espíritu de colaboración y transferencia de conocimiento, especialmente de su vasta experiencia como Ingeniero de registro y consultor, en varias de las presas y su historia, mencionadas en este escrito.

### **REFERENCIAS**

[1] DGA Catastro de cuencas hidrográficas de Chile de la Dirección general de aguas. Santiago, Chile 2024.

[2] Sarricolea, Pablo. Herrera-Ossandon, Mariajosé. Meseguer-Ruiz, Óliver. Climatic regionalisation of continental Chile. Catálogo Biblioteca CIREN, Santiago, Chile. 2016.

[3] The World Bank. Integrated river basin Management from concepts to Good practice. Washington, D.C., U.S.A. 2006.

[4] World Bank Group. Climate risk country profile, Chile. Washington, D.C., U.S.A. 2021.

[5] ICOLD, Bulletin 149. Role of Dams on the development and management of river basins. A general review. 2014.

[6] GISTM, Estándar global de gestión de tranques de relaves. GISTM/ICMM 2021.

[7] Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de depósito de relaves. Resultado Catastro de Depósitos de relaves 2016. Santiago, Chile, 2016.

[8] Paper ID 847: The role of dams and tailing dams engineers, on integrated river basin management, for sustainable and resilient dams and it basins. International Symposium ICOLD. Chengdu, China, 2025.