



**Revista de la Sociedad Chilena
de Ingeniería Hidráulica**



ISSN 0716-3746 Volumen 38 Número 1, 2023

REVISTA DE LA
SOCIEDAD CHILENA DE
INGENIERÍA HIDRÁULICA

SOCHID

Sede Instituto de Ingenieros de Chile – San Martín 352 – Fono 2 2698 4028 – Santiago CHILE

DIRECTORIO SOCHID

Presidente: *Hernán Alcayaga S.*
Vicepresidente: *Damaris Orphanópoulos S..*
Tesorero: *Cristián Núñez R.*
Directores: *Cristián Escauriaza M.*
Karla González N.
Aldo Tamburrino T.
Secretario General: *Francisco Romero B.*

DIRECTORES HONORARIOS

Francisco J. Domínguez S. (Q.E.P.D.)
Horacio Mery M.
Eduardo Varas C.
Sergio Radrigán V.
Humberto Peña T.
Ernesto Brown F. (Q.E.P.D.)
Bonifacio Fernández L.
Jorge Bravo S
Luis Ayala R.
Ludwig Stowhas B.
Ricardo González V.
José Vargas B.
Luis Estellé A.
Raúl Demangel C.

EDITOR DE LA REVISTA

Aldo Tamburrino Tavantzis
atamburr@ing.uchile.cl
San Martín 352, Santiago
Fono 2 2698 4028
www.sochid.cl

Imagen de la portada: Diseño usado en el primer número de la Revista en 1986

REVISTA DE LA SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

ÍNDICE

Editorial	1
Columna de Opinión: Después de la crecida Scarlett Vásquez Paulus	3
Factibilidad económica de una operación sostenible de la represa hidroeléctrica Pangue, en la cuenca del río Biobío, Chile Juan E. Vallejos Carle, Alberto del Villar García	7
Algunas reflexiones sobre el oficio de practicar (y pensar sobre) la hidráulica Patricio Winckler Grez	25
The hydraulic machine of Toledo and its introduction to China and Japan in the 16th and 17th centuries Albert Koenig, Aldo Tamburrino	41
Hidro-Grafía Aldo Tamburrino Tavantzis	55

EDITORIAL

Con entusiasmo y gran expectación, aguardamos ansiosos el encuentro en Valdivia para el XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, programado para los días 18, 19 y 20 de octubre. Este evento bienal adquiere un significado especial por dos importantes razones: será organizado por primera vez por la Universidad Austral y, además, retomaremos el formato presencial, lo que añade un valor excepcional a esta ocasión. Confiamos plenamente en que esta actividad se destacará, como es tradición, tanto por la cantidad de participantes como por la calidad de los artículos presentados. Esperamos con entusiasmo compartir conocimientos, fomentar nuevas conexiones y enriquecer nuestro campo profesional en este relevante encuentro hidráulico.

En este primer número de 2023 de la Revista, además de las secciones tradicionales, se ha incluido una Columna de Opinión. Con esta columna queremos reforzar el objeto de la Revista, que es no solo difundir trabajos en las áreas de interés de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, sino también buscamos fomentar un espacio de diálogo y un intercambio enriquecedor de ideas entre nuestros socios, especialmente en aquellos temas que conciernen de manera relevante a la comunidad hidráulica nacional.

Por último, como es nuestra costumbre, extendemos una cordial invitación a todos quienes están interesados en las distintas áreas de la ingeniería hidráulica para que colaboren con artículos y opiniones, y que promuevan la difusión de la Revista.

Aldo Tamburrino Tavantzis
Editor

COLUMNA DE OPINIÓN

DESPUÉS DE LA CRECIDA

Junio de 2023 nos recordó de la manera más implacable que las comunidades insertas en territorios estamos expuestas a la acción de la naturaleza. En menos de una semana la respuesta hidrológica ante precipitaciones intensas con isoterma sobre los 3.000 metros, provocó grandes crecidas en los ríos de la zona centro y sur de Chile, impactando siete regiones con un dramático saldo de 13.379 personas damnificadas, 1.632 albergadas y 12.314 aisladas, cerca de 1.500 viviendas destruidas, y un fuerte impacto en infraestructura vial y ferroviaria, con más de 100 caminos interrumpidos, 3 puentes ferroviarios dañados y más de 15 puentes viales afectados.

Esta arremetida de las aguas sucede a pocos meses de que amplias zonas de nuestro país se vieran afectadas por mega incendios forestales, todo esto antecedido por una sequía sin precedentes que ya ha durado casi 14 años. Lamentablemente, dadas las tendencias climáticas, esta dupla incendios - crecidas será cada vez más frecuente, así como las condiciones climatológicas particulares del pasado evento descritas en detalle por René Garreaud, Director del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 en el siguiente link: <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-vuelven-los-gigantes-un-analisis-preliminar-de-la-tormenta-ocurrida-entre-el-21-y-26-de-junio-de-2023-en-chile-central/> .

La ausencia de vegetación y la erosión de suelos provoca que la superficie donde se genera la escorrentía, en lugar de estar preparada para retener las aguas generando un efecto esponja y que parte de ella se infiltre, actúa como una costra con material listo y dispuesto a ser arrastrado por las aguas el que se integra al gran flujo que llega hacia la infraestructura. Por otra parte también afecta la estabilidad de laderas aumentando el riesgo de derrumbes.

Al revisar el abundante material audiovisual que se ha generado en torno al funcionamiento de las obras, se pueden sacar distintas conclusiones; podemos verificar la respuesta de las estructuras que funcionaron bien, como por ejemplo los vertederos de los embalses, y analizar las obras que fallaron a la luz de su antigüedad, su estado de conservación o su diseño. Bajo esa mirada, seguramente encontraremos que las fallas se debieron a múltiples factores, algunos de ellos asociados al diseño adoptado en su momento.

Los parámetros de diseño fueron definidos durante años de desarrollo de la ingeniería chilena, plasmados en manuales de diseño que nos han permitido gozar del servicio de excelentes obras de ingeniería que constituyen un orgullo para Chile. Entre los parámetros de diseño más importantes desde el punto de vista hidráulico está el caudal asociado a un determinado período de retorno, que se relaciona con una frecuencia de ocurrencia. Por ejemplo, para el diseño de puentes el Manual de Carreteras adopta un período de retorno de

200 años verificado para 300 años. Claramente debiésemos poner atención a este criterio teniendo en cuenta el cambio climático.

Entonces, la gran pregunta es ¿qué parámetros de diseño se deben considerar dadas las condiciones climáticas que enfrentamos y las proyectadas? El equipo del Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas ha venido trabajando estos temas hace un tiempo y han avanzado. Sin embargo, un trabajo colaborativo amplio, con la participación de expertos que trabajan en distintos espacios, tanto académicos como en los sectores público y privado, entregaría elementos fundamentales para elaborar y llevar a la práctica las mejores respuestas posibles a esta pregunta.

Además, podemos pensar en una reparación y reconstrucción que considere otros factores que permitan el diseño de obras más resilientes al cambio climático y/o que se complementen con soluciones basadas en la naturaleza; que permitan, además de ayudar a la respuesta hidráulica frente a eventos extremos, mejorar los servicios ambientales de los ecosistemas asociados a los ríos y considerarlos en su manera más amplia como corredores fluviales.

El hacernos cargo de esta nueva situación requiere tener una mirada estratégica generosa, salir de la caja y producir las condiciones para que el conocimiento que se está generando en la academia y en otros espacios muy reducidos pueda ser aplicado con soluciones innovadoras, complementando los sólidos desarrollos de la ingeniería tradicional. Para lograr esto la interdisciplina juega un rol fundamental.

Estos eventos no llegan en cualquier momento, el 13 de junio de 2022 se promulgó la Ley Marco del Cambio Climático que establece como meta que el país sea carbono neutral y resiliente al clima a más tardar el 2050, una fecha que incluso podría adelantarse si las circunstancias así lo permiten; en esta ley se menciona la necesidad de adaptación y mitigación a los efectos del cambio climático asociado también a la infraestructura. Por otro lado, al 17 de mayo de 2023 se han declarado 100 humedales urbanos, donde aún queda por resolver cómo realizar la conservación de cauces exigida en el DFL 850 del MOP, orientada a prevenir desbordes y anegamientos y a la vez proteger estos importantes sistemas. Sumemos además la creación del Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, legislación aprobada el 18 de junio de 2023 y en espera de su promulgación después de 9 años de tramitación y que pone la vara mucho más alta respecto de la acción humana sobre los sistemas hídricos, en especial, considerando su rol frente a la protección de biodiversidad.

La infraestructura es fundamental para el desarrollo del país y el desafío al cual nos enfrentamos en ello es enorme. Cambiar la mirada respecto de los diseños no sólo incorporando aspectos medioambientales, sino que también respondiendo a sociedades más complejas, requiere un mayor esfuerzo financiero en las etapas más tempranas de los proyectos. Sin duda, esta inversión se traducirá en importantes beneficios en las siguientes etapas, incluida su operación y hasta su desmantelamiento.

Los acontecimientos recientes nos recuerdan que estamos frente a una gran oportunidad para la infraestructura sostenible, sólo debemos tomarla y responsablemente actuar después de la crecida.

SCARLETT VÁSQUEZ PAULUS
scarlett.vasquez@confluencias.cl
Ingeniera Civil Hidráulica, U. de Chile
Socia CONFLUENCIAS
www.confluencias.cl

FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE UNA OPERACIÓN SOSTENIBLE DE LA REPRESA HIDROELÉCTRICA PANGUE, EN LA CUENCA DEL RÍO BIOBÍO, CHILE

JUAN E. VALLEJOS CARLE¹, ALBERTO DEL VILLAR GARCÍA²

¹Junta de Vigilancia de la cuenca Río Biobío y
Asociación de Canalistas del Canal Biobío Negrete
juan.vallejos@jvbb.cl

²Departamento de Economía y Dirección de Empresas, Facultad de Ciencias Económicas,
Empresariales y Turismo, Universidad Alcalá de Henares
alberto.delvillar@uah.es

RESUMEN

El sistema eléctrico chileno, diseñado para suplir una demanda variable, cuenta en la actualidad con una serie de centrales hidroeléctricas que, por su versatilidad, permiten entregar potencia en un corto tiempo. Esta condición, para el caso de las centrales ubicadas en los ríos, supone violentas descargas de agua durante lapsos cortos, variables e impredecibles. Estas variaciones bruscas en el caudal del río, conocida como *hydropeaking*, producen serias afectaciones a otros usuarios de la cuenca como agricultores y pescadores, pero muy especialmente, al ecosistema fluvial.

Con el objeto de contribuir al uso sostenible mediante la gestión integrada del agua en la cuenca del Biobío, se plantean algunas reglas a la operación del embalse Pangue, ubicado sobre el río Biobío en la zona central de Chile, que permitan una mejor utilización del agua por parte de los usuarios agrícolas de la cuenca, aporte a la sostenibilidad del ecosistema fluvial y no afecte en forma significativa los resultados económicos de la empresa generadora. De esta manera, se pretende evitar conflictos y usar el agua con una mirada multisectorial, apuntando a enfrentar de mejor manera los escenarios de escases hídrica previstos por los modelos de cambio climático para Chile.

Palabras claves: Cuenca hidrográfica, Gestión Integrada de recursos hídricos, *Hydropeaking*, Ecosistema fluvial, Gestión sostenible.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Especialistas destacan que la unidad básica para la gestión del agua es la cuenca hidrográfica, como también, la gravitante importancia que tiene gestionar adecuadamente el agua para asegurar la sostenibilidad del ecosistema. En tal sentido, la Cumbre Mundial 2002 sobre el desarrollo sostenible hizo un llamado a todos los países para que desarrollaran Planes de Gestión Integrada de Recursos Hídricos y Eficiencia Energética, ante lo cual, muchos países han debido adecuar su legislación, su estructura organizacional y sus presupuestos, para

asumir este sistema de planificación que considera la cuenca hidrográfica como área de gestión.

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) a nivel de cuencas hidrográficas puede ser definida como “un proceso de gestión coordinada del agua, la tierra y los recursos asociados dentro de los límites de una cuenca para optimizar y compartir equitativamente el resultante bienestar socioeconómico sin comprometer la salud de los ecosistemas vitales a largo plazo” (GWP, 2009). La GIRH es ampliamente usada para el combate de crecidas y sequías, para preservar los ecosistemas acuáticos o para racionalizar otras relaciones entre aguas arriba y aguas abajo (UNEP, 2014). Estos aspectos resultan especialmente relevantes, para la gestión de los recursos hídricos, cuando existen embalses artificiales que regulan los caudales de los ríos y modifican el régimen natural de los flujos, ya que, los objetivos de la planificación territorial y de la gestión integrada de los recursos hídricos, se tornan muy dificultosos de cumplir cuando la operación de los embalses no se realiza con propósitos comunes a todos los usuarios de la cuenca.

Es claro que la construcción privada de embalses exige una explotación rentable a sus inversores, por lo que, de no mediar una intervención estatal, la gestión de las aguas embalsadas se enfoca a obtener la mayor eficiencia económica del sector que realiza la inversión. Esta mirada monosectorial en la explotación de grandes embalses ha variado, en el mundo, hacia una mirada multisectorial que permita un uso racional del agua para distintos sectores, entre los que se considera, además de los sectores productivos, especialmente importante la conservación del medio ambiente. Según la OCDE, en Sudamérica sólo un 25% de las presas y embalses son gestionados en multipropósito, cifra que sólo se sitúa bajo el 30% que ostenta Norteamérica, por lo que elevar esta cifra es hoy un desafío mundial.

La energía hidroeléctrica está siendo fomentada a nivel mundial por ser renovable y limpia. Sin embargo, su producción conlleva impactos al ecosistema fluvial, destacando las consecuencias ecológicas de la alteración de los regímenes naturales de caudales. Concretamente, las centrales a pie de presa operan de forma intermitente de acuerdo con los precios y la demanda de energía, que varían de forma instantánea, provocando el fenómeno de *hydropeaking*, el que consiste en la variación frecuente y rápida del caudal en un breve periodo de tiempo, generalmente a lo largo del día y que resulta en alteraciones de parámetros hidráulicos como el nivel del agua, la velocidad del flujo, la tensión de arrastre, de la morfología fluvial y de la calidad del agua. (Bejarano et al, 2017)

Chile, en la actualidad, no gestiona los recursos hídricos en forma integrada y no cuenta con organismos de cuenca con atribuciones que permitan desarrollar planes para la GIRH en las cuencas, por lo que la explotación y gestión de los recursos hídricos se realiza en forma independiente desde cada sector, en tanto, el crecimiento poblacional y económico del país, sumado a escenarios de cambio climático tendientes a disminuir la oferta de recursos hídricos, ha generado un estrés hídrico en muchas cuencas del país y ocasiona serios conflictos entre los distintos sectores productivos. A esta tensa relación se ha sumado el medioambiente, con la creciente necesidad de preservar los recursos naturales y los paisajes relacionados al agua, hasta ahora ignorados.

La cuenca del río Biobío, con 24.264 km² es la tercera mayor cuenca del país y se ubica en

la zona centro sur de Chile. Su cauce principal es el río Biobío, el que se desarrolla por 380 km desde la laguna Galletue, en la cordillera de Los Andes a 1.160 m.s.n.m., hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, en las proximidades de la ciudad de Concepción. El río Biobío, posee tres embalses de generación hidroeléctrica, siendo el mayor de ellos el embalse originado por la represa de la central hidroeléctrica Ralco con una capacidad de 1222 hm³, aguas abajo de este se ubica el embalse originado por la central hidroeléctrica Pangué, una capacidad de acumulación de unos 175 hm³. Finalmente, se ubica aguas abajo el embalse originado por la central hidroeléctrica Angostura de menor capacidad. A lo largo de su recorrido, las aguas del río Biobío son utilizadas, entre otros usos, para generación hidroeléctrica, riego, industria, agua potable, pesca deportiva, turismo y recreación, junto con ser fuente para la vida de muchas especies endémicas.

Las centrales hidroeléctricas, ubicadas en la alta cordillera, poseen un sistema de operación en horas punta, lo que supone la descarga violenta de caudales durante las horas punta de generación (500 m³/s) y la disminución significativa de los caudales durante las horas de bajo consumo (30 m³/s). Tales fluctuaciones de caudal, realizadas en forma violenta e impredecible, generan el fenómeno que se conoce como *hydropeaking*, el que resulta en serias afectaciones al ecosistema fluvial y causa importantes problemas en la operación de los canales de riego que tienen sus captaciones aguas abajo de la presa, entre otros problemas.

Existe abundante investigación científica que apunta a la necesidad de corregir los efectos del *hydropeaking* en beneficio de la conservación del ecosistema fluvial. Adicionalmente, existe evidencia que el *hydropeaking* ha elevado los costes de la administración de canales de riego. En consecuencia, parece razonable plantearse un modelo de generación hidroeléctrica en la cuenca del Biobío que disminuya los efectos del *hydropeaking* y evite problemas mayores en el futuro, debido al esperable aumento de la conflictividad asociada al uso del agua, especialmente si consideramos que (según el informe de WRI, 2015) Chile está dentro de los 30 Estados del mundo con mayor estrés hídrico, donde se destaca como la única nación latinoamericana que pasará a un estrés hídrico extremadamente alto al año 2040 y es una de las naciones con mayor probabilidad de enfrentar una disminución en el suministro de agua, debido a los efectos combinados del alza de las temperaturas en regiones críticas y los cambios en los patrones de precipitación.

El presente estudio modela la intervención de la central hidroeléctrica Pangué debido a que, si bien, la central hidroeléctrica Angostura es la que se ubica más aguas abajo, esta no posee capacidad de regulación de los caudales evacuados en Pangué, no sólo porque su capacidad de embalse es significativamente menor sino porque las regulaciones impuestas por la autoridad prácticamente no le permiten realizar variaciones en el nivel de embalsamiento, en consecuencia, se limita a operar de la misma forma en que lo hace la central Pangué. De igual manera se ha desestimado proponer modificaciones en las regulaciones del embalse Ralco, ya que su régimen de operación es modificado por la central Pangué, actuando como contraembalse.

Este estudio, tiene por objetivo evaluar económicamente un modelo para la operación del embalse Pangué que reduzca las afectaciones de los usuarios agrícolas de la cuenca y aporte a la conservación del ecosistema fluvial del río Biobío.

Objetivos específicos:

- Determinar los principales efectos sobre el sector agrícola del actual modelo de generación de la central hidroeléctrica Pangué y estimar los costes asociados.
- Identificar los efectos del actual modelo de operación sobre el ecosistema fluvial del río Biobío.
- Identificar medidas de mitigación de los efectos del *hydropeaking* sobre el ecosistema y los usuarios agrícolas del río Biobío
- Proponer y evaluar la factibilidad económica de un modelo de evacuación de caudales desde el embalse Pangué, que disminuya los efectos del *hydropeaking*

2. METODOLOGÍA

Los costes en que incurren las organizaciones de regantes, producto del *hydropeaking*, se determinaron por entrevista personal a los directivos de las principales organizaciones de usuarios de agua de la cuenca. De igual manera, se entrevistó a dirigentes y representantes de entidades gremiales de la zona, para recopilar antecedentes técnicos y de valorización de la producción agrícola local.

Los costes del impacto de la generación se calcularon considerando el gasto anual que destina cada organización a la vigilancia y el control del *hydropeaking*, más los costes por mermas en la producción de las hectáreas que se ven afectadas por el *hydropeaking*.

Para lo anterior se calculó el Coste Anual Equivalente (*CAE*), utilizando la siguiente fórmula:

$$CAE = M \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (1)$$

En la Ec. (1), M es el monto a anualizar, n es la vida útil e i es la tasa de retorno.

El segundo objetivo, se abordó con una revisión bibliográfica respecto de los problemas que ocasiona el *hydropeaking* en el ecosistema fluvial del río Biobío.

Las medidas para disminuir los efectos de *hydropeaking* y las restricciones que presenta su aplicación se obtuvieron mediante una revisión bibliográfica. Luego se seleccionaron las medidas que se ajustan de mejor manera a la realidad de cuenca en estudio.

Para el modelo, se determinó las tasas de subida y bajada de caudal a proponer persiguiendo el menor impacto económico a las centrales hidroeléctricas. El tiempo actual promedio que utiliza la generadora para tomar o reducir la carga se calcula como $T = \Delta Q / t_a$ (min); donde ΔQ es la variación de caudal (m^3/s) y t_a es la tasa de variación actual del caudal en un minuto en (m^3/s)

Las variaciones de caudal para ascenso y descenso en un mismo mes se obtuvieron de la siguiente manera:

$$\Delta Q_{asc} = Q_{Max} - Q \quad (2)$$

$$\Delta Q_{desc} = Q - Q_{Min} \quad (3)$$

En las Ecs. (2) y (3), Q_{Max} es el caudal medio máximo, Q_{Min} es el caudal medio mínimo y Q es el caudal medio.

Una vez determinado el tiempo que se requiere para modificar el caudal, se realizaron iteraciones variando las tasas y se determinó el tiempo adicional que tomará a la empresa de generación asumir la nueva consigna en su tasa de aumento o disminución del caudal. La tasa adicional se determinó como $t_{ad} = t_a - t_p$ (m^3/s) en un minuto; donde t_a es la tasa actual y t_p es la tasa de variación de caudal propuesta.

Con la tasa adicional se calculó el tiempo adicional empleado y la pérdida en generación para cada mes según el costo marginal promedio informado por el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN), como:

$$Pérdida = t_{ad} Cmg G Q \text{ (US\$ en un minuto)} \quad (4)$$

En la Ec. (4), *Pérdida* es la pérdida de generación, t_{ad} es el tiempo adicional, Cmg es el costo marginal en (US\$/Mw-h), G es la generación media (Mw-h) y Q es el caudal medio en (m^3/s)

El beneficio para la situación actual se determinó como la diferencia entre un ingreso constante de la empresa menos el coste de cada una de las afectaciones detalladas anteriormente.

$$B = I - C \quad (5)$$

En la Ec. (5), I es el ingreso de la empresa para el periodo (US\$) y C es el coste calculado para el escenario en evaluación (US\$)

De la misma manera se calculó el *CAE* para el escenario propuesto, asumiendo que no existen costes adicionales para las organizaciones de regantes y sus agricultores, por lo que el monto que debe asumir la empresa de generación eléctrica está dado por el menor ingreso producto de la nueva consigna de generación.

Luego se realiza un Análisis Coste Beneficio mediante un análisis diferencial de los *CAE* para la situación de operación actual del embalse pague (CAE_1) versus desembalsar las aguas según la propuesta (CAE_2).

$$CAE_1 = \text{Coste para las OUA} + \text{Coste para los agricultores} \quad (6)$$

$$CAE_2 = \text{Coste para la empresa por menor generación} \quad (7)$$

El beneficio de la situación actual (B_1) se calculó, para la empresa hidroeléctrica, como los ingresos de la generación menos los costos que esta empresa debiera asumir por los efectos del *hydropeaking*. En tanto el beneficio para la situación propuesta (B_2), se calcula considerando los mismos ingresos menos los costos que deberá asumir por la regulación del

caudal, de esta manera se tiene que $B_1 = I_1 - C_1$ y $B_2 = I_2 - C_2$, donde $I_1 = I_2$. De esta manera, el beneficio neto (B_n) se calcula por análisis diferencial como:

$$B_n = CAE_1 - CAE_2 \quad (8)$$

En la Ec. (8) B_n es el beneficio neto, CAE_1 es el coste anual equivalente para el sector agrícola y CAE_2 es coste anual equivalente para la empresa generadora.

2.1 Efectos del *hydropeaking* sobre las OUA (organizaciones de regantes) y los usuarios agrícolas

Las organizaciones de regantes, han identificado diversos problemas que ocasiona la variación brusca de los caudales, como: mala percepción de los usuarios de los canales de riego; destrucción de las laderas de los canales sin revestir; fallas en elementos mecánicos por exceso de manipulación para mantener más estable los niveles; variabilidad en la generación hidroeléctrica al interior de la red de canales; puntos de entrega ubicados en cotas altas que requieren el canal esté a plena carga para operar, afectados por una menor o nula cantidad de agua a la que tienen derecho; turnos de riego perdidos por los regantes debido a disminuciones bruscas que no permiten entregar agua en el dispositivo de entrega. Tanto las pérdidas de turnos de riego, cómo los problemas de admisión en cotas altas se asocian a pérdidas de cultivos. A continuación, se describen algunos de los problemas que generan costes adicionales medibles producto del *hydropeaking* a las OUA y sus agricultores:

- Aumento de vigilancia y operación de compuertas para el control y distribución del agua: Este ítem supone una mayor contratación de personal por parte de la organización, que permita aminorar la intensidad, duración y frecuencia de las variaciones de caudal dentro de la red de riego.
- Aumento en mantención de la red de canales sin revestir y en los sistemas mecánicos de control y distribución: En este caso, la organización debe destinar más recursos a la mantención de los canales y sus mecanismos, ya que, en ellos ocurre un deterioro acelerado.
- Disminución de ingresos en los agricultores que pierden sus turnos de riego producto de las variaciones del caudal: Esta situación se da en los sectores en que, por diversas razones, poseen una insuficiente capacidad de conducción de los canales o los caudales a distribuir son muy pequeños, lo que obliga a la organización a distribuir el agua por turnos de riego, es decir, estos agricultores sólo pueden regar durante algunos días del mes o algunas horas del día. De igual manera, las constantes variaciones interrumpen los caudales de riego (aumentando el tiempo necesario para regar una determinada superficie), lo que produce menores rendimientos en los cultivos al seguir regando toda el área originalmente sembrada, pero con una menor cantidad de agua.

Asociación de Canalistas Canal Biobío Sur, posee derechos por 45 m³/s y posee una red de canales de 800 km de longitud para el riego de 40.000 hectáreas. En la actualidad tiene un gasto anual €5.000 por conceptos de vigilancia directa del *hydropeaking*, mientras que un 9.5% de la superficie regada por esta organización, recibe el agua por entregas ubicadas en las partes altas de los canales, que se ven afectadas durante los caudales mínimos de generación. Se calcula que al menos el 2.1% de la superficie regada con el sistema ha perdido

la capacidad de regar con seguridad. También estima que una importante superficie ha variado su destino desde el uso agrícola al uso forestal debido a que sus producciones no se relacionan tan directamente con la oportunidad de recibir el agua. Adicionalmente, esta organización posee una serie de minicentrales hidroeléctricas que se ven afectadas en su operación debido a las variaciones de los niveles del canal, sin embargo, en el presente estudio no se han considerado dichos perjuicios económicos toda vez que la función principal de la organización es la distribución del agua de riego y por lo tanto dichas disminuciones también podrían ser explicadas por otras necesidades de la organización de regantes.

La Asociación de Canalistas Canal Biobío Norte, posee derechos por 15 m³/s y posee una red de canales 150 km de longitud para regar 12.000 hectáreas. En la actualidad tiene un gasto anual €6.000 por conceptos de vigilancia directa del *hydropeaking*. Poseen un 13% de la superficie regada que recibe por entregas ubicadas en las partes altas de los canales y un 2.55% de la superficie se le administra agua por sistemas de turnos que se ven afectadas durante los caudales mínimos de generación. Este canal posee una bocatoma rústica que deriva sus aguas mediante una ataguía (azud) de material fluvial y ha identificado como una de las mayores afectaciones la destrucción de esa ataguía producto del despacho de caudales en forma violenta, lo que obliga a reconstruirla regularmente, afectando superficie importante de riego durante el tiempo que lleva su reposición.

La Asociación de Canalistas Canal Biobío Negrete posee derechos por 28 m³/s, de los cuales 18 son destinados al riego y 10 a la generación hidroeléctrica. Posee una red de canales de 200 km de longitud para regar 14.000 hectáreas. En la actualidad tiene un gasto anual €4.000 por conceptos de vigilancia directa del *hydropeaking*, mientras que un 11.5% de la superficie regada posee entregas ubicadas en las partes altas de los canales y un 2.4 % de la superficie total debe regar con sistema de turnos, que se ven afectadas durante los caudales mínimos de generación.

Por otro lado, estudios locales señalan una rentabilidad promedio anual de las zonas regadas es de €1.500 por hectárea, en tanto que las mermas por riegos deficientes las estiman en un 30% de dichas utilidades. A su vez, los estudios de las agrupaciones locales concluyen que la rentabilidad de los cultivos de secano en promedio no supera los €750 por hectárea.

Se determinó que el deterioro permanente que sufren tanto los canales que se conducen en terreno natural como los sistemas de operación y control que deben ser operados en forma constante, producto de *hydropeaking*, imponen un coste adicional promedio de inversión en infraestructura, para las tres organizaciones estudiadas, entre un 3 % y 5% del presupuesto anual de la organización.

La tasa de retorno utilizada para calcular el CAE se determinó en un 8%, valor que es aceptado para la evaluación de proyectos del sector Agrícola.

2.2 Efectos del *hydropeaking* sobre el ecosistema fluvial del Río Biobío

Diversos autores han expuesto la importancia de los ecosistemas fluviales y los impactos que estos sufren producto del *hydropeaking*. Según señala DeBoer et.al. 2019., las extensas riberas fluviales se encuentran entre los ecosistemas más productivos de la tierra y los más

afectados por los seres humanos. En tanto, la modificación de los regímenes de flujo natural altera la abundancia y composición de las condiciones biológicas en los ambientes acuáticos. Así, las represas afectan los ecosistemas fluviales de varias formas. Alterando las fluctuaciones naturales de los caudales, modificando las características fisicoquímicas del agua fluvial y fragmentando la continuidad de los ríos (Vaikasas et al. 2013). En consecuencia, el régimen de caudal de un río es fundamental para determinar sus características ecológicas. Se ha documentado que el embalse de los ríos impacta severamente el régimen de flujo natural, lo que resulta en cambios abióticos y bióticos en los ecosistemas río abajo (Gillespie et al, 2014).

Meier et al (2015) realizó la traducción de la tabla desarrollada por Baumann y Claus (2003), donde se identifican impactos ecológicos de *hydropеaking*. Dicha tabla deriva de una extensa revisión de trabajos científicos y, según señala el autor, es el resumen más completo a la fecha al considerar las menciones de 240 trabajos. En dicho estudio se muestran afectaciones a la morfología del cauce, a sus parámetros hidráulicos, a la calidad del agua (especialmente la temperatura), a los hábitats acuáticos, a la estructura de la comunidad biológica, a la estructura de Macrozoobentos e Ictiofauna y a la función en peces juveniles, entre las de mayor relevancia.

Si bien la relevancia de los impactos del *hydropеaking* es sitio específica, ya que depende de las características particulares del cauce, de la cuenca, de los embalses, de las descargas, de la ecología local y de la distancia desde el punto de descarga al lugar de medición del impacto, entre otros factores, se han identificado otros impactos asociados a los usos aguas abajo como en la agricultura, la pesca, la recreación y en la propia percepción de los usuarios que utilizan aguas luego de que estas han sido generadas en los embalses. En tal sentido, de acuerdo con lo investigado por Meier et al (2015), en el trabajo desarrollado por Faure (2000), los usuarios identificaron, entre otros, peligro para la vida de las personas, serias limitaciones para el desarrollo de actividades debido a lo impredecible de las fluctuaciones y la degradación de infraestructura como la pérdida de materiales como caminos o embarcaciones.

Para la realidad de Chile, en el trabajo desarrollado de Meier et al (2015), se demuestra que todos y cada uno de los 40 ríos seleccionados, como posibles candidatos a sufrir *hydropеaking*, sí sufren de este fenómeno, mientras que en sólo 3 de esos ríos se tiene que el hidrograma turbinado guarda alguna semejanza con un hidrograma en régimen natural y que 25 tienen fluctuaciones consideradas intermedias o altas. De esta manera, viéndose el régimen natural alterado de los cauces en Chile, parece evidente que el *hydropеaking* genera externalidades de diverso alcance y a diversos usuarios aguas abajo de las centrales hidroeléctricas que descargan directamente a cauces naturales sin obras de mitigación para sus efectos.

Particularmente, la cuenca del río Biobío del centro-sur de Chile exhibe la mayor riqueza de especies de todos los ríos del país y su cauce principal es uno de los ríos más importantes para el uso humano. El uso de sus aguas para el suministro de agua potable, riego, efluentes de aguas residuales, generación de energía hidroeléctrica y la industria, han aumentado dramáticamente durante la primera década del siglo XXI. Para ayudar a comprender los efectos de las actividades humanas en el río Biobío, se han documentado los cambios recientes en la comunidad de peces, en tal sentido, la comparación con registros anteriores

indica pérdida o reducción en la distribución de especies nativas y una expansión concurrente en la distribución, además de abundancia de especies introducidas tolerantes durante los últimos 10 a 15 años. Estos hallazgos sugieren un efecto a gran escala y a largo plazo de los recientes impactos humanos en el río (Habit et al, 2006). Adicionalmente, en las evaluaciones de impacto ambiental no se han considerado los impactos debido a la operación con horarios en punta (*hydropeaking*), como tampoco los efectos acumulativos de la construcción consecutiva de embalses y que, la presencia de las centrales en el Alto Biobío, ha provocado la disminución y fragmentación de especies de bagres nativos clasificados “En peligro”. Según se ha demostrado en estudios recientes, la especie endémica de la cuenca del Biobío “Carmelita de Concepción” (*Percilia Irwini*) ha sido extirpada del tramo ubicado entre la Central Ralco y la Central Pangué y que su abundancia se está reduciendo rápidamente en la zona entre la Central Pangué y la central Angostura. (EULA, 2020)

Finalmente, se puede constatar en publicaciones de prensa local, que las variaciones bruscas de altura de agua, tanto en el lago Ralco como en el río Biobío aguas abajo de este embalse, han provocado accidentes graves con pérdidas de vidas humanas que han sido atribuidas al aumento violento del caudal, a su vez provocan molestias en los usuarios de las riveras, para la pesca, el baño y la navegación. Dentro de estas afectaciones no valorizadas, resulta particularmente conflictivo el que las empresas sanitarias deban recurrir a otras fuentes para abastecer la población debido a la disminución de la altura de agua en la zona de captación.

A continuación, se presentan antecedentes generales de los caudales de río Biobío del año 2019 a fin de caracterizar de mejor forma la cuenca.

Tabla 1. Caudal, duración y tasa de variación, estación Rucalhue, río Biobío, 2019

Caudal mínimo evacuado	30 m ³ /s
Caudal medio anual	450 m ³ /s
Caudal máximo turbinado	500 m ³ /s
Duración media de caudales mínimos	6 h
Duración media de caudales máximos	3 h
Tasa máxima de variación de caudal en ascenso	6.5 m ³ /min
Tasa máxima de variación de caudal en descenso	5 m ³ /min

Fuente: Elaboración propia a partir de estadística de caudales DGA, estación Rucalhue, año 2019

2.3 Identificación de medidas de mitigación de los efectos del *hydropeaking* sobre el ecosistema fluvial y los usuarios agrícolas del río Biobío

Los estudios sobre el *hydropeaking*, han propuesto variadas medidas tendientes a disminuir e incluso evitar sus impactos ya que, las variaciones de caudal en forma continua y los picos de descarga, tienen una serie de consecuencias no sólo en otros usuarios, como los agrícolas e industriales que deben absorber esas variaciones de caudal en sus sistemas captación y distribución, sino que, como se mencionó anteriormente, hay una seria afectación al ecosistema fluvial y a otros tipos de usuarios y organizaciones.

En el entendido que es difícil y sobre todo costoso evitar o eliminar los efectos del *hydropeaking*, parece necesario, al menos, plantearse medidas de mitigación de esos efectos,

que nos propongan un escenario futuro de mayor sostenibilidad, en una mirada tendiente a equilibrar la importancia económica de la generación hidroeléctrica de punta con sus negativos efectos sociales y medioambientales. En consecuencia, el presente trabajo, aborda las medidas que más se adaptan a las características de funcionamiento del cauce principal del río Biobío, de manera que sea viable su implementación en el corto o mediano plazo.

En la investigación desarrollada por Meier et al (2015), establece que pueden usarse medidas de mitigación para mejorar el estado ecológico de ríos y lagos impactados por *hydropeaking*, las que pueden clasificarse en tres tipos. A saber:

- a) Medidas operacionales: Restringen la operación de la central hidroeléctrica, fijando umbrales para entrega de agua en el cauce. Las más comunes intentan atenuar la magnitud de los peaks (razón entre caudal máximo y mínimo), disminuir las tasas de subida y bajada (ramping rates) y mantener un mayor caudal mínimo entre eventos. Estas medidas buscan evitar o minimizar la varazón de peces, la deriva de macroinvertebrados y la reducción en la disponibilidad y diversidad de hábitats de peces.
- b) Medidas estructurales: Se consideran obras hidráulicas como contraembalses, cavernas de almacenamiento, cauces adicionales para abastecer lugares específicos, entre otras. El principal objetivo de estas estructuras es reducir las fluctuaciones de caudal y temperatura del agua.
- c) Medidas de compensación: Corresponden a trabajos de restauración o mantención ejecutados en el mismo cauce del río, modificando sus características, medidas de protección contra la erosión o programas de compensación para reponer hábitats perdidos.

2.4 Propuesta y evaluación económica de un modelo evacuación de caudales para la central Pangué

En la presente propuesta de operación de la central hidroeléctrica Pangué, se ha tenido en cuenta la factibilidad técnica y económica de operar en un régimen de menor impacto por *hydropeaking*, las características particulares de las regulaciones eléctricas del país, el modelo de derechos de aprovechamiento de aguas en Chile, la importancia gravitante de la generación hidroeléctrica para la economía, la necesidad de establecer una condición de mínimo conflicto para enfrentar condiciones futuras de escasez y la necesidad de proteger los ecosistemas para una adecuada conservación del recurso, entre los principales aspectos.

Para lo anterior, se proponen dos líneas de acción. La primera es actuar con medidas operacionales sobre las regulaciones del caudal evacuado desde la central, tendiendo a disminuir algunos de los principales efectos del *hydropeaking* descritos anteriormente. Una segunda línea de acción propone actuar sobre los sistemas de comunicación e información hacia los usuarios y la sociedad civil que pudiera verse afectada en la cuenca producto de la operación de la central.

Se han desechado las alternativas de construcción de infraestructura por resultar inviables debido al alto monto de inversión.

Las acciones escogidas como más factibles de implementar, con el objetivo de aminorar los

impactos de *hydropeaking* ocasionado por la operación de la central hidroeléctrica Pangué, son:

- **Caudal mínimo:** Se estima necesario establecer un caudal mínimo de evacuación, que asegure el abastecimiento de los derechos concedidos aguas abajo de las centrales, junto con brindar un caudal mínimo ecológico que mantenga algunas condiciones esenciales para la conservación del ecosistema fluvial, al menos aguas abajo del muro de la central Pangué. Se han propuesto caudales mínimos muy ajustados a cubrir las necesidades de los demás usuarios, junto con evitar que algunos tramos del río queden secos.
El caudal mínimo propuesto se determinó de acuerdo con el registro de niveles fluviométricos en las bocatomas de las asociaciones de regantes, de manera de permitir una adecuada captación de sus derechos, registros que fueron correlacionados con la estadística fluviométrica de la DGA.
- **Tasa de bajada de caudal:** La tasa de bajada es uno de los aspectos ambientales más importantes, debido a la escasa capacidad de adaptación a las variaciones de nivel que tienen las especies endémicas del río Biobío.
- **Tasa de subida de caudal:** El disminuir la tasa de ascenso de caudal permite, esencialmente, dar tiempo de reacción a los usuarios de aguas abajo y evitar accidentes.
- ❖ **Acciones sobre la comunicación:** La comunicación aparece como un elemento central en los modelos de gobernanza de los recursos hídricos actuales, por lo que se ha estimado necesario realizar una propuesta de mejoramiento en la comunicación que permita establecer una plataforma mínima para la gobernanza y la gestión de las aguas en la cuenca, lo que se espera tenga un impacto importante en la disminución de los conflictos.
- **Información en tiempo real:** Se ha estimado establecer un centro de control de acceso universal a la información en tiempo real de caudales y alturas limnimétricas para distintos tramos del río.

2.4.1 Evaluación económica del modelo propuesto

La evaluación económica se realizó comparando en *CAE* en dos escenarios de la operación de central hidroeléctrica Pangué. En un primer escenario se evaluó el coste actual asumido por la empresa en la actualidad y se le sumó la valorización de las afectaciones del sector agrícola que aún no ha asumido. El segundo escenario, con el que se comparará el anterior, considera el coste anual equivalente, que resulta para la misma empresa, la menor generación al adoptar las medidas propuestas en el presente trabajo, es decir asumiendo un caudal mínimo mayor al actual, reduciendo las tasas de aumento y disminución de caudal e implementando un centro de control para la información. Para el caso de este último escenario, se dispone de la estadística de precios del Coordinador Eléctrico Nacional para el año 2019 y de la estadística de caudales evacuados por la central hidroeléctrica Pangué durante el mismo periodo. Finalmente se ha agregado el coste de inversión, por parte de la empresa, de un centro de control de información de caudales evacuados y una plataforma virtual de acceso público a la información.

2.4.2 Cálculo de coste anual equivalente para el escenario actual

Para las Organizaciones de usuarios que extraen agua desde el río Biobío se determinó que, en la condición actual de operación de la central Pangué, la generadora produce un coste directo de €15.000 por año. Adicionalmente, se han calculado un deterioro promedio del 4% del presupuesto de la organización producto del deterioro acelerado de las obras.

Por otro lado, se ha calculado un coste inherente a la menor producción de los agricultores, producto de las mermas ocasionadas por la entrega variable del caudal, que se traduce en un 30% de menor producción en sus cultivos afectados por problemas de abastecimiento de agua. Para los cálculos, se ha considerado en ese porcentaje de afectación sobre la superficie de riego para cada una de las organizaciones de regantes en estudio. Finalmente, para este escenario, se ha calculado la pérdida de producción de las zonas sometidas a turnos como la diferencia entre la producción de riego y secano para la zona, al estimar que estos productores quedan limitados a una producción de secano al no tener segura la entrega de agua para el riego por lo que no están dispuestos a arriesgar inversión.

No se han valorizado costes ambientales asociados al *hydropeaking*, debido a que no existen estudios locales de valorización de las afectaciones al ecosistema fluvial que permitan una adecuada aproximación del coste que este efecto impone al ecosistema. De igual manera, se excluyó de la valorización los costes de efectos intangibles como la pérdida de vidas humanas, problemas asociados al turismo y otras afectaciones que no se encuentran claramente determinadas y por lo tanto no valorizadas.

2.4.3 Cálculo de coste anual equivalente para escenario propuesto

Resulta como coste principal, para este escenario, la pérdida por generación de la central hidroeléctrica producto de los mayores caudales que deberá destinar a la generación en horario fuera de punta ya sea por la atenuación de las tasas de ascenso y descenso como por el mayor caudal mínimo de evacuación. Este cálculo de pérdida de generación se obtiene de estimar los tiempos adicionales destinados a tomar carga (aumentar caudales de generación) como los de disminuir carga (disminuir los caudales de generación) a fin de respetar la regla de generación propuesta, debido a que se generará una parte del caudal a un precio menor al del horario punta, sin embargo, el volumen acumulado producto de la nueva consigna de operación podrá ser generado durante el periodo de menor disponibilidad de caudal, que para el año en estudio es el mes de abril, lo que se incorpora al flujo como un ingreso adicional compensatorio a la pérdida.

Al calcular $B_1 = I_1 - C_1$ y $B_2 = I_2 - C_2$ tenemos que los ingresos de la empresa hidroeléctrica serán iguales para las dos alternativas y sólo variarán los costos que la empresa deberá asumir en ambos casos.

Así; si queremos comparar B_1 con B_2 e $I_1 = I_2 = Cte.$, implica que bastará con comparar $C_1 = C_2$ y de esta manera tenemos que los beneficios de las alternativas serán mayores mientras menores sean los costos que estas alternativas imponen a la generadora. Entonces tenemos que: $C_1 = CAE_1$ y $C_2 = CAE_2$, entonces bastará con determinar cuál es menor costo equivalente para determinar cuál es la alternativa de mayor beneficio para la empresa.

Los costes para la generación se calcularon para los meses de riego, esto es entre septiembre y abril, ya que en los demás meses no ocurren pérdidas asociadas a los cultivos con las que comparar.

Los costes de menor generación se obtuvieron de la información estadística de caudales del año 2019 disponible en la Dirección General de Aguas en la estación Rucalhue. El costo marginal de la energía pagado a la hidroeléctrica Pangué como la estadística de horas punta durante el mismo periodo, fueron obtenidos del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN).

En consideración a que el agua no generada, en el escenario propuesto, quedará acumulada en el embalse, se calculó el beneficio de dicho caudal simulando su generación en el mes de abril, correspondiente al de mínimo caudal natural para ese año. De esta manera, en dicho existe un ingreso adicional para la empresa generadora, que compensa parte de las pérdidas que se producen al aplicar el modelo propuesto, esto es mantener un caudal mínimo mayor al actual y disminuir las tasas de aumento y disminución de caudal de generación, más el costo de inversión en un centro de recopilación información fluviométrica y su disposición a la comunidad

Para este segundo escenario, se suma el coste de instalar una red hidrométrica y la operación del centro de control de información de acceso libre, el que se ha estimado en base a un proyecto desarrollado en la cuenca del Maule de similares características, denominado “Diseño de un Sistema de Gestión Integral para la calidad de Aguas en la Cuenca del Río Maule. Plan Piloto Sector Maule Norte” (2008), elaborado por la Universidad de Chile. De este proyecto se seleccionaron los ítems necesarios para establecer el centro de control diseñado cuyos costes de inversión y operación fueron actualizados según la corrección monetaria nacional del IPC (Índice de Precios al Consumidor). Los ítems considerados de ese estudio fueron el personal, la instrumentación y los gastos generales, para 3 años de operación.

Finalmente, se realizó un análisis diferencial entre la situación actual, equivalente a los costes que deben asumir las OUA y sus agricultores (CAE₁) y la situación modificada, que corresponde al coste de imponer restricciones en la evacuación del caudal a la generadora e implementar un centro de control de la información (CAE₂) calculando el beneficio como la diferencia entre ambos costos anuales equivalentes.

3. RESULTADOS

3.1 Efectos del modelo actual de generación sobre las OUA y el sector agrícola

El *hydropeaking*, ocasionado por la operación en punta de la central hidroeléctrica Pangué, impone a las organizaciones de regantes (OUA) y sus agricultores un CAE de €4.408.980.

En la actualidad la empresa hidroeléctrica paga a las OUA €15.500 al año a modo de compensación por el *hydropeaking*, lo que equivale al 24% de los costes adicionales directos

que le impone el *hydropeaking* sobre la red de canales. En tanto, los agricultores actualmente no tienen una compensación por las pérdidas económicas derivadas del *hydropeaking*.

Se han identificado varias afectaciones del *hydropeaking* que no han sido valorizadas en este estudio, entre las más importantes se encuentran los problemas para la generación de otras centrales aguas debajo de Pangué, las alteraciones ambientales y los daños intangibles sobre la población.

3.2 Efectos del modelo actual de generación sobre el ecosistema fluvial

El ecosistema fluvial del río Biobío se está viendo severamente afectado, siendo lo más grave la extirpación de la especie endémica “Carmelita de Concepción” (*Percilia Irwini*) desde el tramo de río ubicado entre la central Ralco y la Central Pangué. Igualmente resulta preocupante la disminución de esta misma especie en el tramo entre los embalses Pangué y Angostura.

No existe valorización económica de efecto del *hydropeaking* sobre el ecosistema fluvial del río Biobío que permita establecer medidas compensatorias.

3.3 Medidas de mitigación de los efectos del *hydropeaking*

Si bien se han documentado una amplia gama de medidas tendientes a disminuir los efectos del *hydropeaking*, las más viables de aplicar en el caso de la realidad chilena y específicamente para la cuenca del río Biobío, se relacionan con acciones sobre el modelo de operación de las centrales hidroeléctricas de manera tal que apunten a disminuir la intensidad de *hydropeaking*.

Las medidas de mitigación que apuntan a realizar obras que directamente actúen sobre los caudales, se visualizan como poco viables de realizar debido al alto valor que dichas obras requieren.

3.4 Modelo de generación y evaluación económica para atenuar los efectos *hydropeaking*

Las medidas de mitigación de los efectos del *hydropeaking* más factibles de aplicar a la central hidroeléctrica Pangué, propuestas en este estudio son:

- Aumentar el caudal mínimo de evacuación a 90 m³/s para cumplir en todo tiempo con los derechos de los agricultores y mantener un caudal ecológico y disminuir la relación entre caudal máximo y mínimo, en beneficios del ecosistema fluvial.
- Limitar la tasa de aumento del caudal a 3 m³/s en un minuto, con el fin de evitar accidentes en bañistas o pescadores y permitir una operación razonable de los sistemas de aducción en canales de riego.
- Limitar la tasa de disminución de caudal a 3 m³/s, con el objeto de mejorar las condiciones de vida de algunas especies que habitan el río y dar un mayor tiempo de reacción a las organizaciones de usuarios para la operación de los sistemas de admisión

de agua desde el río.

- Instalar centro de control para la información pública, que permita visualizar registros de caudales y niveles fluviométricos en tiempo real, de manera que sirva de herramienta para el soporte de decisiones a toda la población para mejorar la confianza y convivencia entre usuarios y aportar un elemento efectivo de gobernanza en la gestión del agua en la cuenca del Biobío.

3.5 Factibilidad económica del modelo de generación propuesto.

El costo anual equivalente (*CAE*) para la operación actual de la central hidroeléctrica Pangué, tiene un valor total de €4.408.980.

El *CAE* para la situación proyectada, resulta en un valor total de €3.517.273, el que se compone de las pérdidas por la menor generación en horas punta y la implementación, mantención y operación de un centro de control para la información de la población en un valor de €119.947.

El análisis Coste Beneficio de los escenarios estudiados indica que operar las centrales con las restricciones propuestas en el modelo es un 20% más barato que cubrir los perjuicios realizados con el actual modelo de operación.

El análisis diferencial entrega un Beneficio para la empresa hidroeléctrica de €891.707 por año si adopta las medidas propuestas con un índice de beneficio sobre coste (*B/C*) de 1,2535.

4. CONCLUSIONES

Con relación a los principales efectos sobre el sector agrícola del actual modelo de generación de la central hidroeléctrica Pangué, se concluye que existe una seria afectación económica tanto a las organizaciones de usuarios agua como a los agricultores de la cuenca del río Biobío, derivada de los efectos del *hydropeaking*.

Debido a que especies endémicas de peces presentes en la cuenca no se han adaptado a las variaciones continuas de caudal, es recomendable realizar ajustes la operación de las centrales para evitar su extirpación y la introducción de especies exóticas.

La afectación económica que sufren las organizaciones de regantes y los agricultores producto del *hydropeaking* ocasionado por la central hidroeléctrica Pangué es un 20% superior al costo por pérdidas de energía y potencia que podría tener la empresa generadora, si adoptara las medidas propuestas para atenuar el *hydropeaking*.

El beneficio de implementar las medidas propuestas supone un Beneficio para la empresa hidroeléctrica de €891.707 al año, con una relación *B/C* de 1,2535.

Con relación a disminuir los efectos de *hydropeaking*, las medidas que resultan más factibles de aplicar apuntan a una moderación de las tasas de ascenso y descenso de los caudales durante la operación de la central hidroeléctrica, como también la mantención de un caudal

mínimo de evacuación.

La implementación de un sistema de información de acceso libre que permita conocer los caudales y niveles fluviométricos en puntos de interés contribuirá a disminuir la conflictividad en la cuenca.

REFERENCIAS

- Bejarano, María D., et al. (2017). “Herramientas para la cuantificación del impacto hidrológico y ecológico de la producción hidroeléctrica.” Ponencia en V Jornadas de Ingeniería del Agua. Entornos fluviales y aguas de transición: impactos de los medios urbanos, La Coruña.
- Boye, Henry y De Vivo, Michael (2016). “The environmental and social acceptability of dams”, Field Actions Science Reports (online), Special Issue 14/2016, online since April 2016, connection on 30 April 2019.
- Calcagno, Alberto T. (2007). “Planeamiento y gestión de presas y embalses en un marco de sostenibilidad Ambiental”. Aqua-LAC-Año1-Nº1, pp. 82-89.
<https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2009-v1-1-08>
- De Boer, J.A., Thoms, M.C., Casper, A. F., DeLong, M.D. (2019). “The response of fish diversity in a highly modified large river system to multiple anthropogenic stressors”. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 124 (2), 384-404.
- Elgueta, A., M.C. Thoms, K. Górski, G. Díaz, E. M. Habit. (2019). “Functional process zones and their fish communities in temperate Andean river networks”. River Res. Applic., 35(10),1702-1711.
- García, A., K. Jorde, E. Habit, D. Caamaño, O. Parra (2011). “Downstream environmental effects of dam operations: Changes in habitat quality for native fish species”, River Res. Applic, 27 (3), 312-327.
- Global Water Partnership., International Network of Basin Organizations. (2009). *Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas*.
- Habit, E., Belk, M. C., Tuckfield, C., Parra O., (2006). “Response of the fish community to human-induced changes in the Biobio River in Chile”, Freshwater Biolog. 51, 1-11
- Habit, E., A. García, G. Díaz, P. Arriagada, O. Link, O. Parra, M. Thoms (2018). “River science and management issues in Chile: Hydropower development and native fish communities”, River Res Applic., 35 (5), 489-499.
- Jasper, F. (2014). *Towards integrated water resources management*. United Nations Environment programme. UNESCO
- León, A., (2008). *Diseño de un Sistema de Gestión Integral para la calidad de Aguas en la Cuenca del Río Maule. Plan Piloto Sector Maule Norte*. Universidad de Chile. Proyecto financiado por CORFO.
- Meier, C., R. López (2015). Ministerio de Energía, Chile., Instituto de investigaciones tecnológicas, Universidad de Concepción. *Análisis de medidas de mitigación para los efectos de las variaciones intradiarias de caudal, producto de la generación de punta*. Publicación División de Desarrollo Sustentable, Subsecretaría de Energía, Ministerio de Energía.
- OECD. (2017). *Multi-purpose water infrastructure. Recommendations to maximize economic benefits*.
- Sapag, N., R. Sapag (1995). *Preparación y evaluación de proyectos*. McGraw-Hill

Interamericana S.A.

Vaikasas S, K. Palaima, V. Pliuraite (2013). “Influence of hydropower dams on the state of macroinvertebrates assemblages in the Virvyte river, Lithuania”. Journal of environmental engineering and landscape management. 2013 Volume 21(4): 305-315.

Wang, J., L. Ding, J. Tao, C. Ding, D. He (2019) “The effects of dams on macroinvertebrates: Global trends and insights”. River Res. App., 35(6), 702-713.

ACERCA DE LOS AUTORES

Juan Vallejos es Ingeniero Civil Agrícola con mención en Riego de la Universidad de Concepción, Master en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos de la Universidad Alcalá de Henares, es Presidente de la Junta de Vigilancia de la Cuenca del Río Biobío y Gerente de la Asociación de Canalistas del Canal Biobío Negrete. Consultor Senior en Recursos Hídricos y Derechos de Agua.

Alberto del Villar es Profesor Interino Titular de Universidad en el Departamento de Economía Aplicada de la Universidad de Alcalá. Licenciado en Ciencias Económicas y Empresariales (UNED), Máster en Hacienda Pública y Tributación (IEF) y Doctor en Ciencias Económicas (Universidad de Alcalá). Ha impartido clases en numerosos cursos y seminarios en relación a diferentes aspectos sobre Economía y Tarificación del Agua, y desde el año 1998 imparte docencia en la Universidad de Alcalá. Su actividad investigadora se ha centrado en el análisis del mecanismo de precios, tarificación y costes de los servicios del agua.

ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE EL OFICIO DE PRACTICAR (Y PENSAR SOBRE) LA HIDRÁULICA

PATRICIO WINCKLER GREZ

Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso, Chile

patricio.winckler@uv.cl

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2100-293X>

RESUMEN

Este texto se inspira en la exposición que tuve la oportunidad de hacer en la Asamblea Anual de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, en 2022, y cuyo tema principal fue reflexionar sobre la práctica cotidiana de la disciplina. El texto, basado en casi veinte años de experiencia docente, aborda temas como el uso de modelos, analogías, juegos y anécdotas en el proceso educativo. También se plantean preguntas sobre cómo la inteligencia artificial podría afectar nuestro quehacer. El texto se nutre de esos escasos momentos lúcidos, divagaciones ocasionales y las frecuentes caídas que ocurren en la búsqueda diaria de una “verdad” científica. Por ende, dista mucho de ser un texto de filosofía de la ciencia, pero aporta con la frescura de ser escrito en primera persona.

Palabras claves: Modelos numéricos y físicos, cambio climático, inteligencia artificial.

1. PRELUDIO

El tiempo pasa y no en vano. A casi 20 años desde que por primera vez enfrenté a un grupo de estudiantes -algo nervioso y con una clase casi memorizada- tiendo a reflexionar sobre el oficio que practico a diario acá en la Universidad de Valparaíso (UV). En este oficio, hay ciertas preguntas para las que tenemos una respuesta docta y otras que simplemente nos sobrepasan. Son precisamente esas las que me motivan, como en aquella primera clase de marzo de 2005. Ante una invitación del Profesor Aldo Tamburrino a participar en este número, me propuse plantear algunas de esas preguntas e intentar respuestas, que no son definitivas. De paso, aprovecho de homenajear a algunos de los mentores que han hecho de la Ingeniería Hidráulica chilena, una disciplina robusta y entretenida.

2. EL USO DE MODELOS EN INGENIERÍA

Hace un par de años repasaba las primeras páginas de *La Peste*, de Albert Camus (1967), libro que escogí premeditadamente de la biblioteca pues, al fin y al cabo, estábamos en pandemia. Durante meses, la novela permaneció en el escritorio bajo decenas de tareas, manuscritos y memorias que corregir. Por esos días, me llamaba la atención la discusión mediática sobre si los modelos serían capaces de pronosticar el momento en que se achataría la curva de fallecidos. El COVID nos obligó a mirar diariamente decenas de modelos, o más bien sus resultados, en los recuentos de la prensa. Sin conocer los supuestos, ecuaciones de gobierno, condiciones iniciales y relaciones constitutivas de uno u otro modelo, me era difícil, sino imposible, analizar su calidad en lo que dura un reportaje de televisión. Así, constituía casi un acto de fe el confiar en cada resultado teniendo a la vista sólo atributos como la jerarquía de la institución o del autor, la coincidencia con presupuestos personales o el sesgo propio de la disciplina con que se abordara. Esos meses de ostracismo me hicieron reflexionar sobre el uso de modelos; ideas que fueron presentadas en la Asamblea de 2022 ante unas 50 personas, entre las que se encontraban varios de mis maestros (Figura 1).



Figura 1. Los profesores Alejandro López, José Vargas y Ludwig Stowhas comentando sobre la idoneidad de este conferencista, quien, a su vez, siente algo incómodo el escrutinio de sus maestros.

Creo pertinente primero definir lo que es un modelo y ejemplificar cómo lo usamos para escrutar la naturaleza. En el mundo (pragmático) de la ingeniería, un modelo es una representación simplificada y por ende imperfecta de la realidad, cuya complejidad debe ser acorde al tipo de problema que se enfrenta. Esta definición, definitivamente incompleta, está inspirada en las ideas del Profesor Roberto Torreti sobre modelos¹, y en conceptos como la verosimilitud, definida como el grado de correspondencia de una teoría científica con la

¹ https://www.youtube.com/watch?v=MkGup_iii5U&t=1690s

verdad (Popper, 1972; Oyarzún, 2019). Y claro, la definición es pragmática pues se basa en la búsqueda de soluciones a problemas, y no en la búsqueda de la esquivada realidad.

Veamos un ejemplo que uso normalmente en clases para explicar el concepto de modelo. La Figura 2 ilustra tres modelos con diferentes niveles de complejidad, cantidad de grados de libertad y costo computacional, que buscan caracterizar cómo se mueve el Edificio Huckle, sede de la Facultad de Ingeniería de la UV. Las acciones externas, indicadas como flechas rojas actuando en cada piso, podrían representar al efecto del viento o las fuerzas inerciales asociadas a un sismo².

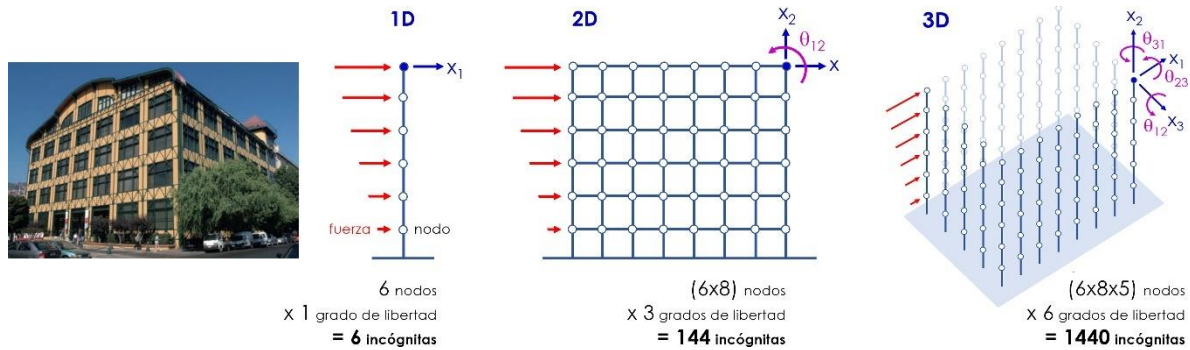


Figura 2. Modelos estructurales con niveles de complejidad crecientes del Edificio Huckle, Facultad de Ingeniería de la UV. Esta figura está inspirada en una presentación de Rafael Aránguiz, profesor de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

El nivel de complejidad de cada modelo dependerá del tipo de pregunta o problema a resolver. Así, un modelo muy simple (1D) permite entender el movimiento de los pisos y establecer si el edificio experimentará desplazamientos acotados como para garantizar su integridad durante un sismo. Un modelo de este tipo se recoge, con algo más de refinación, en el método de análisis estático de la norma de diseño sísmico Nch.433 (INN, 2009). El modelo 1D, sin embargo, no permite describir el movimiento entre vigas y columnas, cuestión que solo se logra con un modelo de complejidad intermedia (2D). Si el movimiento del suelo ante un sismo es complejo, como lo es en la cruda realidad, un modelo (3D) permitirá entender efectos como la torsión, que generó daños irreparables a edificios como el Faro en 1985, según relata el profesor Rafael Ridell (1992). Así, cada modelo responde preguntas diferentes, pero, parafraseando a Torreti y Popper, ninguno recoge la complejidad de ese mundo real simbolizado, en este caso, con el edificio Huckle.

Podemos encontrar casos similares en la hidráulica ambiental. Por ejemplo, si nos interesara estimar el efecto de la descarga de una planta desaladora o de un sistema de refrigeración en aguas costeras, podríamos recurrir a diferentes tipos de modelos, dependiendo, entre otras cosas, del volumen de la descarga o del tamaño del proyecto. La Figura 3 ilustra diferentes

² La idea de representar las fuerzas sísmicas mediante un vector cuya magnitud es proporcional al peso de la estructura fue definida, en un acto de imaginación a mi juicio alucinante, por ingenieros italianos en 1909, luego del terremoto de Messina en 1908 (Fajfar, 2018).

tipos de modelos de mezcla, desde los de mayor complejidad y costo computacional a los más simples y con mayor rapidez de cómputo. Así, el uso de modelos basados en las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (RANS) o en la simulación de grandes remolinos (LES) es adecuado para caracterizar con bastante detalle la interacción de los chorros de descarga con el medio, en tanto que los modelos tipo DNS se hacen impracticables por el alto costo computacional que implican en la actualidad. Los modelos bidimensionales basados en las ecuaciones de onda larga (SWE), por su parte, presentan la ventaja de cubrir dominios suficientemente grandes como para caracterizar el flujo generado por las mareas, el viento y el oleaje, pero no permiten resolver la estructura tridimensional de la descarga. Finalmente, los modelos empíricos o aquellos basados en ecuaciones integradas, son adecuados para geometrías simples y en condiciones estacionarias, pero no permiten caracterizar en forma adecuada el campo lejano (Winckler, 2021a).

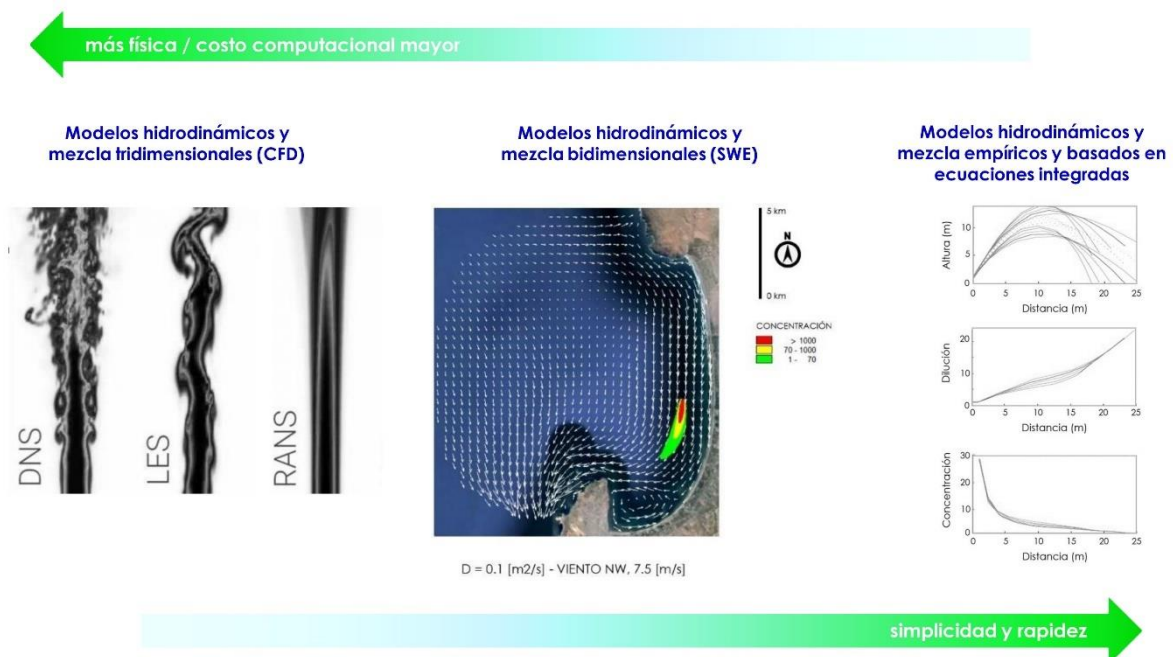


Figura 3. Diferentes tipos de modelos de mezcla de dos fluidos, desde los de mayor complejidad (izquierda) a los de mayor simplicidad y rapidez de cómputo (Adaptado de Winckler, 2021a).

Los modelos también requieren de buenos datos de entrada, cuya calidad sea también acorde con la calidad que buscamos en la modelación. Desafortunadamente, la realidad jamás nos brinda datos perfectos por lo que tanto el modelo y los datos que intentamos reconstruir tienen una incertidumbre asociada. En la literatura anglosajona se utiliza el concepto de *Garbage in, garbage out* (Kilkenny y Robinson, 2018) para indicar que, si a un modelo se le ingresa datos erróneos, expulsará resultados también incorrectos. Para mejorar el proceso de modelado es recomendable, entonces, efectuar un acucioso control de calidad de los datos y resultados en cada una de sus fases. Por otra parte, las respuestas de los modelos están sujetas a incertidumbre por falta de conocimiento de tipo epistemológico (i.e., falta de conocimiento)

o de tipo aleatorio, debido a la variabilidad natural del fenómeno (Kiureghian & Ditlevsen, 2009) y su comprensión permitirá evaluar la exactitud y precisión del modelo en cuestión³.

Por otra parte, en el proceso de modelación, simplificamos el problema en un sistema cerrado (Cellucci, 1993) como la suma de componentes que se vinculan mediante esas relaciones causales definidas *a priori*. En este proceso de reducir el sistema a ecuaciones de gobierno que se relacionan con el exterior mediante condiciones de borde, también cometemos errores. Un buen ejemplo lo constituye el edificio de la Figura 2, que es en sí un sistema cerrado que se vincula con el exterior mediante fuerzas externas. En suma, mediante el uso de modelos interrogamos a una naturaleza que se niega a ser descifrada, acotando la incertidumbre de las respuestas, y generando otras preguntas como consecuencia del asombro. Y para que el uso de los modelos sea eficaz, se necesita calma, buena letra y experiencia.

3. LOS JUEGOS Y LAS ANÉCDOTAS

Recuerdo de mi infancia leer a menudo *The New Encyclopedia for the younger generation* (1958), donde, entre otras imágenes fantásticas, se mostraba el sistema digestivo como un bello mecanismo de partes ilustradas, correas transportadoras, engranajes y obreros (Figura 4). Mediante esa analogía mecanicista, pensaba conocer procesos de una naturaleza bastante más compleja que la realidad. Con los ojos de hoy, dicha imagen puede parecer ingenua, pero sin duda generó curiosidad en un peque de ocho años. Siendo enemigo de las generalizaciones, creo que el oficio de educar en la ingeniería requiere de estrategias simples, como las analogías, los juegos y las anécdotas. Aun cuando muchas de estas herramientas se aprenden con las canas -pues no forman parte de las mallas curriculares de las escuelas de ingeniería-, pueden ser un complemento útil para transmitir los a veces complejos principios de la física que utilizamos.



Figura 4. Un cuerpo mecanizado según *The New Encyclopedia for the younger generation* (1958). Martina y Tomás aprendiendo sobre densidad de fluidos.

³ La exactitud (*accuracy*) corresponde a cuán cerca se encuentra el valor medido del valor real, definido este último por una solución analítica o resultados experimentales. La precisión (*precision*) corresponde a la dispersión del conjunto de mediciones de una magnitud, respecto del valor medio de las mismas. Medidas de la exactitud y la precisión son el sesgo (*bias*) y la desviación estándar, respectivamente.

Hace unas semanas leía el libro de anécdotas *Surely You're Joking, Mr. Feynman*, de Richard Feynman (1985), un gran físico teórico que vivió algunos años en Ithaca, el pueblo donde estudié durante 5 años. Feynmann tenía la habilidad de pasar libremente de la mecánica cuántica a sus anécdotas carnalescas en Rio de Janeiro. Y su forma de abordar la física me pareció inspiradora. Lejos del genio de Feynmann, en nuestro camino también tuvimos que aprender el lenguaje de las matemáticas y, mediante éste explicar fenómenos como el golpe de ariete, que el maestro Ludwig desarrollaba con tiza y pizarrón (Figura 1).

En los primeros años también enfrentamos conceptos que, ya maduros, damos por sentados pero que no son simples en esencia. Recuerdo, por ejemplo, haber intentado enseñar a mis hijos Tomás y Martina -en aquel tiempo de 3 y 5 años- el concepto de densidad (Figura 4). Luego de varios intentos fallidos, pudieron entender que la miel es más densa que el agua, y ésta que el aceite, jugando simplemente con un par de vasos y legos. La densidad, una propiedad macroscópica aparentemente simple, se basa en la hipótesis del continuo que funciona para volúmenes de control cuya dimensión es suficiente para promediar los efectos individuales de los átomos (Rapp, 2017). Es decir, su comprensión cabal requiere de un nivel de abstracción que no cualquiera domina.

4. LA ANALOGÍA DE LA DIFUSIÓN

La difusión que ocurre entre dos sustancias que se mezclan es un buen ejemplo de una materia que puede explicarse con una combinación de experimentos, teoría y analogías. Mediante un experimento casero que consiste en tirar una gota de colorante en agua, se puede observar que el flujo neto del colorante va de una región de mayor concentración a una de menor concentración (Figura 5a). Así, un estudiante puede familiarizarse empíricamente con el fenómeno, observando y midiendo propiedades como el área de la pluma y el tiempo.

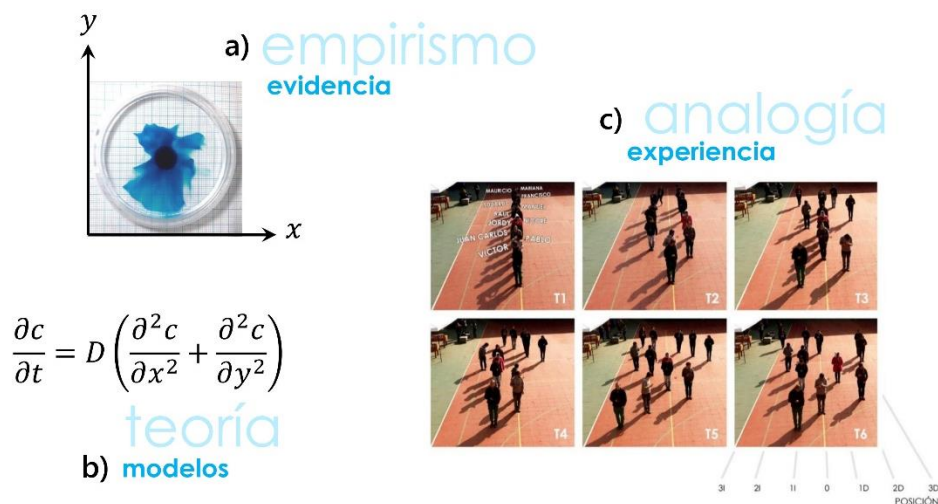


Figura 5. Diferentes aproximaciones para explicar la difusión. a) Experimento casero para mostrar la difusión de un colorante en agua en un disco Petri (el agua está caliente y por eso la mancha es irregular). b) Ecuación de difusión 2D en coordenadas cartesianas para un coeficiente de difusión constante. c) un experimento de difusión mediante el *random walk* con estudiantes de ingeniería.

De acuerdo a la teoría, la difusión se asocia al movimiento térmico de las partículas de un fluido a temperaturas por encima del cero absoluto. Este fenómeno puede modelarse a través de la Ley de Fick (1855), que establece que el flujo difusivo por unidad de área de un agente en un medio es $F_{masa} = -\rho D \nabla C$, siendo ρ la densidad del medio y D el coeficiente de difusión del agente de concentración C . El flujo difusivo tiene magnitud, dirección y sentido, y el signo menos indica que el agente se movilizará en el sentido opuesto al gradiente de concentración. El coeficiente de difusión representa la facilidad con que el agente se mezcla en el medio y depende, entre otras variables, de la temperatura de ambas sustancias. Con la Ley de Fick y un balance másico a nivel diferencial -tradicional en textos de mecánica de fluidos- es posible establecer la ecuación de difusión (Figura 5b), como complemento a la aproximación empírica mencionada previamente.

Existe una muy buena analogía para explicar la difusión de una sustancia en el medio, y se basa en el formalismo matemático del *random walk* (Fischer et al., 1979). Esta analogía dice que la trayectoria de una partícula consiste en una sucesión de pasos aleatorios que obedecen a alguna distribución de probabilidad, siendo la probabilidad del salto a la ubicación más cercana independiente de la dirección o sentido. En la Figura 5c se muestra un experimento en el que se ilustra el proceso de difusión de la masa de un conjunto de estudiantes, basado en el formalismo del *random walk*. El experimento inicia con el grupo alineado en una fila. En cada paso de tiempo, cada estudiante escoge en forma aleatoria si desplazarse a la derecha, a la izquierda o permanecer en el sitio⁴. Cada persona sigue una trayectoria aleatoria y en su conjunto presenciamos la difusión de masa, cuantificada mediante la cantidad de personas por ubicación. En la medida que pasa el tiempo, el conjunto de personas se distribuye en el espacio sin perder masa, lo que implica que el proceso de difusión es conservativo. Si el ejercicio se desarrolla con muchos estudiantes (Figura 6), la masa se distribuye siguiendo una distribución gaussiana, que corresponde a la solución analítica de la difusión para una fuente puntual e instantánea. Como ejercicio de análisis, se puede pedir a los estudiantes que grafiquen la distribución espacial de masa en el tiempo, o calcular el coeficiente de difusión.

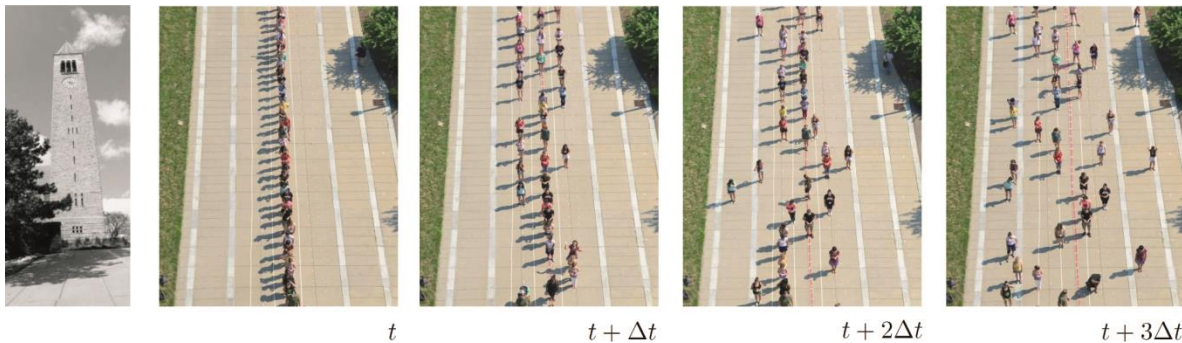


Figura 6. Experimento de difusión de la masa desarrollado un equipo de estudiantes de postgrado con niñas de *high school* durante una Escuela de Verano en Cornell University, Estados Unidos. Las fotografías fueron tomadas por estudiantes desde un campanario bajo la tutoría del autor.

⁴ La elección se puede hacer con una aplicación en el celular que genere números aleatorios entre 1 y 3, siendo 1: desplazarse a la izquierda, 2: mantenerse en el sitio y 3: desplazarse a la derecha.

La difusión de masa también puede utilizarse para explicar otros fenómenos, como la transferencia de calor. En este caso, la ley de Fick constituye una analogía casi directa a la ley de Fourier, que expresa el flujo de calor mediante la expresión $F_{calor} = -k\nabla T$, siendo k la conductividad térmica y T la temperatura. Esta expresión implica que el flujo de calor se transmite desde regiones de mayor a menor temperatura. Así, el ejercicio del *random walk* en combinación con el experimento del disco Petri, pueden utilizarse para introducir un fenómeno relativamente simple y, a partir de ello, profundizar en aspectos teóricos, aplicados o filosóficos más complicados. Y es ahí donde entra la matemática y los métodos numéricos.

La Figura 7 ilustra, a modo de ejemplo, la derivación en pizarra de una ecuación de advección-difusión de una sustancia en un canal con corriente, integrada en la columna de agua y el modelo numérico correspondiente, desarrollado en un curso de modelación para ingenieros oceánicos. La Figura 8, por su parte, ilustra un ejemplo de modelación física y modelación numérica de la difusión de un colorante en un disco petri con agua, en el cual se efectúa también un análisis de sensibilidad⁵ ante variaciones en la temperatura del medio.

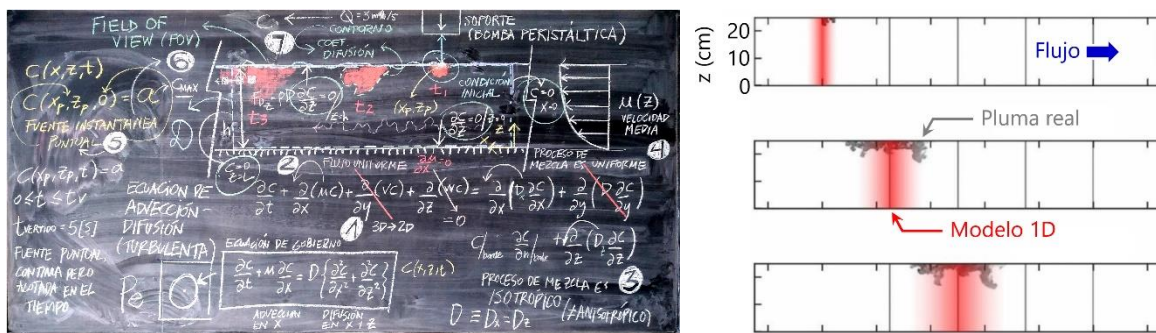


Figura 7. Derivación en pizarra de una ecuación de advección difusión, integrada en la columna de agua y el modelo numérico correspondiente.

La analogía entre la difusión de masa de y calor, por otra parte, permite indagar en cómo se gestaron estas leyes y las divergencias históricas de la ciencia de entonces, recurriendo a textos sobre historia y filosofía de la ciencia, entre los que destacan *The dichotomous history of difusión* (Narasimhan, 2009). Me parece importante mostrar a los estudiantes que la ciencia que aprenden es falible, y está en un constante movimiento que no se nota en los *papers*, que solo muestran la parte exitosa del proceso.

A partir de los fundamentos de los procesos de mezcla, los estudiantes avanzados pueden avanzar a temas más complejos, como la teoría del movimiento browniano⁶ modelado mediante la ecuación de difusión, según el mismísimo Albert Einstein (1915, p.17, ecuación I), a procesos estocásticos o estadística avanzada.

⁵ El análisis de sensibilidad es una herramienta muy potente en la práctica de ingeniería pues permite identificar qué parámetros o variables son relevantes en la caracterización de un fenómeno (Hamby, 1994).

⁶ El movimiento browniano es el movimiento aleatorio de las partículas que se hallan en un medio fluido.

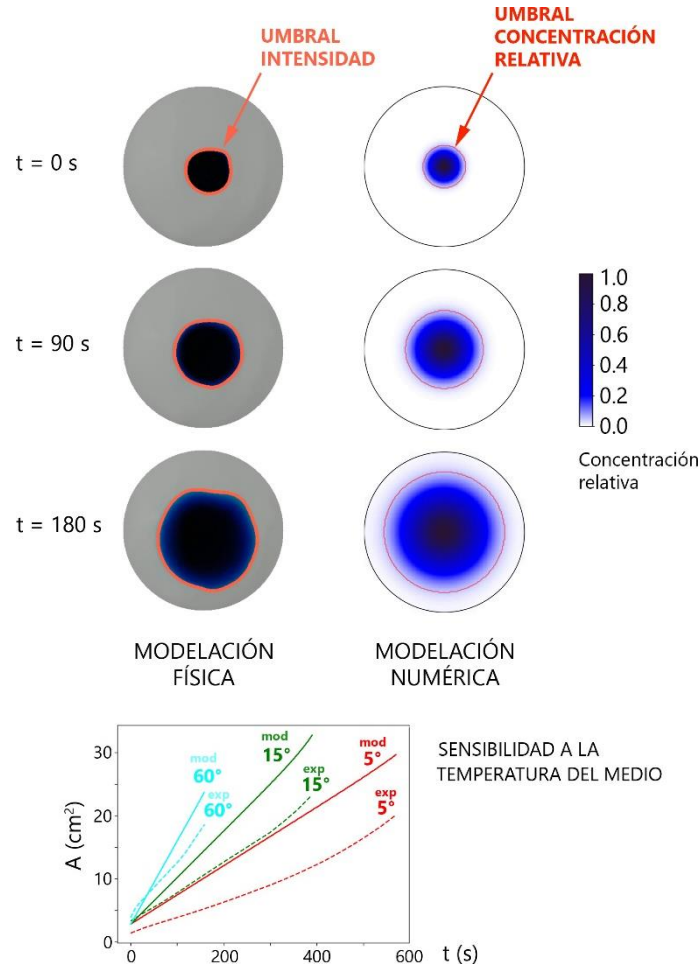


Figura 8. Ejemplo de modelación física y modelación numérica del proceso difusivo de un colorante en un disco petri con agua. Adaptado de ensayos realizados por Juan Andrés Fuenzalida, alumno de ingeniería civil de la UTFSM y Faro Schäfer, alumno de intercambio en la UTFSM.

5. UNA ANALOGÍA Y NUESTRA PERCEPCIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

A veces nos vemos obligados a explicar parte de nuestro quehacer específico a personas que no tienen una formación en ingeniería, y menos en hidráulica. Ante el constante desafío de divulgar nuestro conocimiento, he efectuado algunos esfuerzos como escribir columnas utilizando, en muchas de ellas, la analogía⁷. Adjunto a continuación, la transcripción de la columna ¿Por qué dudamos de la evidencia climática y no del diagnóstico de un cardiólogo?, inspirada en algunas ideas presentadas en la Asamblea Anual SOCHID y que fuera publicada en El Mercurio de Valparaíso el 3 de Julio de 2022.

“En el mundo de las aulas recurrimos de cuando en vez a analogías para explicar un fenómeno complejo con otro simple o cotidiano, y que le haga sentido al aprendiz. En mi experiencia de profe, recorro a la muchas veces utilizada analogía entre la Tierra y un paciente para

⁷ <https://patowinckler.cl/cronicas/>

explicar procesos como el cambio climático. Así, empleo frases como *usamos nuestros estetoscopios*, en vez de instrumentos meteorológicos, *para auscultar las dolencias de un paciente*, representando a la atmósfera y su océano colindante. También suelo explotar trucos fáciles como que *los humedales experimentan una artrosis al ser estrangulados por edificaciones mal emplazadas* (Figura 9), cuando en realidad apunto a que estos cuerpos de agua pierden capacidad de adaptación ante el aumento del nivel del mar. Estas analogías pueden tocar la tecla acertada en el momento correcto de una clase, o aclarar verdades científicas que compiten con las noticias falsas en las redes sociales.



Figura 9. El cambio climático, la sobre explotación de la cuenca y el crecimiento urbano amenazan la ecología de humedales urbanos, como el de la desembocadura del río Elqui.

Hace unos días, esperando el diagnóstico de un cardiólogo, me pregunté por qué a ratos se duda de la evidencia climática y no de los designios del médico de turno, a quien confiamos nuestra suerte ciegamente. Intentando leer los resultados inescrutables de un examen de sangre, aventuro una respuesta.

En primer lugar, la medicina está centrada en el yo (o un cercano) y los procedimientos médicos se orientan a reducir el dolor. El cambio climático, en contraste, está centrado en un sujeto abstracto -la sociedad y los ecosistemas- y sus consecuencias se diluyen en el colectivo. Así, la relación causa-remedio-efecto en la medicina me parece más cercana que en las ciencias de la tierra.

Por otra parte, un tratamiento médico suele ser una acción focalizada en un órgano preciso, con una respuesta a veces rápida, en tanto las acciones de mitigación al cambio climático actúan a nivel planetario y en escalas de tiempo de décadas, que alejan al individuo de la

sensación de urgencia. Convenciones internacionales como la COP26, son un ejemplo de una burocracia climática abstracta que se aleja mucho del pabellón de urgencia de un policlínico. También la relación entre una doctora y el paciente es de uno a uno, en tanto que la interpretación del climatólogo requiere de un ejercicio de abstracción lejano a la cotidianidad de un hijo de vecino. Paciente y doctora intercambian el uno la descripción de la dolencia y la otra el juicio experto, a través de un diálogo directo que, a pesar del metalenguaje propio de la medicina, debe ser eficiente para el beneficio del primero. El intercambio entre el climatólogo y el sujeto de estudio, en contraste, se basa sólo en la interpretación de una de las partes sobre la otra. En este caso, no existe diálogo entre ambos.

Como bien dice el profesor y premio nacional Juan Carlos Castilla, incluso gases de efecto invernadero como el CO₂ son transparentes e inodoros, pero pienso que un tobillo roto tiene forma, textura, color y hasta olor luego de un accidente pichanguero. ¿Cómo entonces enseñarle a una niña algo que no se ve, huele, toca, escucha o saborea?. ¿Qué analogía usamos en este caso? ¡Tarea para la casa, señoras y señores!.

Entre varios whatsapp, Sebastián Vicuña coincide con mis divagaciones diciendo que *nadie pone a debatir a un oncólogo con un escéptico del cáncer para ver si el riesgo es real*, y en mi caso no cuestiono cuando el cardiólogo me enchufa un incómodo aparato para medir la presión sanguínea durante 24 horas, a sabiendas de que pasaré una mala noche.

Finalmente, reflexiono: Si son usadas en forma prudente, las analogías constituyen una buena herramienta pedagógica mientras no sobre simplifiquen la realidad y sean sucedidas por una mirada más profunda en clases, un laboratorio o alguna actividad práctica. Como *médicos de la tierra*, entonces, debemos hacer esfuerzos por bajar ese metalenguaje científico a uno más coloquial, de manera de traducir esa tremenda evidencia en un mensaje claro y efectivo.

6. EL DESAFÍO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En estos casi 20 años de trabajo en clases, consultoría e investigación, he sentido cómo el vertiginoso avance de la tecnología modela nuestra forma de dar soluciones a los problemas de la ingeniería. Como muchos, siento vértigo ante la agilidad con que nuevas herramientas como la Inteligencia Artificial (IA) se cuele en nuestra vida cotidiana e intento instruirme en la infinitud de internet, aunque a veces sea en vano. Mi exposición a ella deviene de un puñado de tesis universitarias cuyo ingenio es más llano a estos nuevos desafíos y, a ratos siento que ya no me subí a ese tren.

Como muchos de mis pares, ya no tengo esos preciosos momentos en que podía leer un *paper* con calma y menos el tiempo para perderme en un código que resuelva una buena ecuación de advección difusión (Winckler et al., 2013) o las ecuaciones de Boussinesq (Winckler y Liu, 2015). A pesar de la poca exposición a la IA, he conocido experiencias donde se utiliza para generar algoritmos para simular procesos relacionados con la hidráulica, evitando en ello el proceso tradicional y casi artesanal, de generación de algoritmos para resolver ecuaciones de conservación (Figura 10).

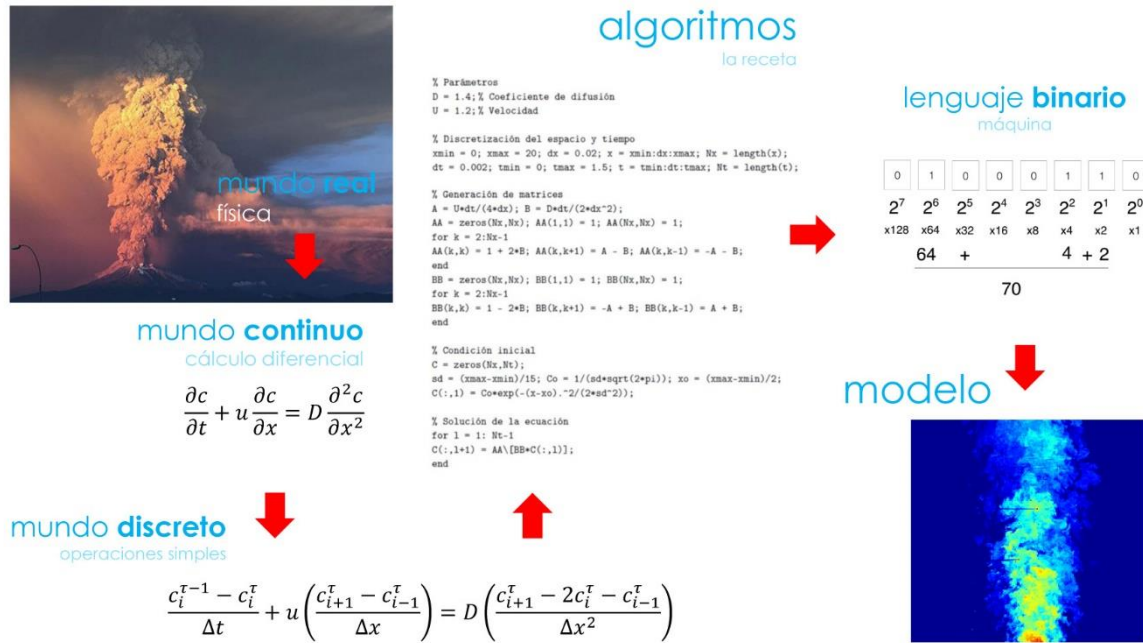


Figura 10. El proceso tradicional de generación de un modelo que permita interpretar un proceso como la advección difusión. En este caso, la ecuación de gobierno, bastante simplificada, está expresada en coordenadas cartesianas y en una dimensión.

Hace unas semanas, un periodista científico, Daniel Silva, me preguntó si la IA podía predecir la ocurrencia de terremotos o tsunamis, ante lo que quedé sumido en reflexiones algo contradictorias. A riesgo de ser rebatido por conocer rasgos muy básicos de la IA, aventuré una respuesta: Hasta donde entiendo, en su versión presente, herramientas como ChatGPT⁸ construyen conocimiento basándose en algoritmos que aprenden sobre una base de datos fundada en conocimiento actual, sea este correcto o falso, sin aún mucho discernimiento ni análisis crítico. En ese sentido, el aporte de la IA tendría un razonamiento de tipo deductivo, esto es, combinaría premisas existentes en una base de datos cerrada para llegar a conclusiones que están ocultas en las primeras. Un ejemplo de este tipo de razonamiento se resume en la siguiente secuencia argumentativa:

- Premisa 1: “Si todos los periodistas estudiaron TV en la universidad”.
- Premisa 2: “Daniel es periodista”.
- Conclusión: “Daniel estudió TV en la universidad”.

Análogamente, ambas premisas serían la base de datos, a partir de la cual la IA combinaría el conocimiento existente. Así, creo que esta tecnología es un modo de inteligencia aun rudimentaria, con una tremenda capacidad de aprender de procesos sistemáticos, pero con dificultad de incorporar otras cualidades de la inteligencia humana, como la intuición. Cuando esta pueda razonar en forma inductiva -esto es, generando nuevo conocimiento más

⁸ <https://openai.com/blog/chatgpt>

allá de las premisas- o lo haga en forma abductiva a partir de otras premisas (Cellucci, 1998), estará en un estadio de conocimiento mayor. Según entiendo, la IA adolece aun de la capacidad de comprobar en forma empírica -esto es, mediante experimentos- que representan lo que pensamos que la realidad es, parafraseando nuevamente al Profesor Torreti.

Si le creemos a la “La estructura de las revoluciones científicas” de Thomas Kuhn (1962), el avance científico ocurriría gradualmente en tiempos normales, pero explosivamente durante las revoluciones científicas, donde la intuición de mentes brillantes es la que cuestiona los paradigmas existentes. En esa categoría estarían científicos como Newton, Euler, Bernoulli o Kolmogorov, entre otros (Darrigol, 2005). En ese sentido, en su estado actual, la IA podría contribuir al avance en tiempos normales, pero no a cambiar los paradigmas que devienen del conocimiento existente.

Y volviendo a la pregunta del periodista: Los terremotos y tsunamis asociados obedecen a ciclos que duran décadas, centurias o más; incluso en lugares asísmicos no tenemos certeza de que no ocurrirá uno. Así, no existe un conocimiento acabado del ciclo sísmico y solo se cuenta con pocos estudios que han llegado a caracterizar, con una alta incertidumbre, parte de éste en zonas específicas (e.g., Aedo et al., 2023). En ese sentido, aun no existe certeza de que la IA pueda establecer el instante y magnitud de un sismo en un sitio, más allá de su capacidad para identificar patrones ocultos en la escasa información existente (Al Banna et al., 2020).

Por otra parte, para expandir el conocimiento de la sismo-tectónica y de los tsunamis asociados, en las últimas décadas se han generado cruces entre la sismología, la historia y la geología, entre otras disciplinas emergentes (Goff et al., 2012), cuyo vínculo se basa en coincidencias a veces fortuitas -como una cerveza bien conversada en un congreso de la SOCHID-, que difícilmente se podrían sistematizar en un algoritmo de aprendizaje autónomo. En ese sentido, creo que hay una dimensión humana en la ciencia que aún no nutre el cuerpo de conocimiento sobre el cual se basa la IA.

Para concluir y pecando tal vez de optimista, creo que aún tenemos un espacio para la inteligencia humana en el mundo de las geociencias, pero el advenimiento de la IA, como otras tecnologías disruptivas que alguna vez revolucionaron nuestra visión del mundo, nos plantea un desafío aún mayor en el aula y la investigación. Como bien me comentó el profe Rolando Rebolledo en una conversación de pasillo, *“cuando nos habíamos aprendido todas las respuestas nos cambiaron todas las preguntas /.../ Las preguntas nos mantienen vivos, son nuestras aperturas”*. Y en con ese espíritu seguimos día a día, como aquella primera mañana de 2005.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a los profesores Rolando Rebolledo, Juan Redmond y Rodrigo López, de la UV, por las apasionantes conversaciones durante el FONDECYT denominado “La generación inferencial de hipótesis en los procesos de modelización en ciencia desde un

enfoque dinámico e interactivo”. Expreso también mi gratitud a Natalia Calderón, por coordinar el curso “Pensar lo líquido, el flujo y lo fluido desde los estudios visuales, la ingeniería y la práctica artística” del Doctorado en Estudios Interdisciplinarios sobre Pensamiento, Cultura y Sociedad de la UV, y durante el cual tuvimos la posibilidad de contrastar varias de las ideas contenidas en el texto. También agradezco al Profesor Aldo Tamburrino, de la Universidad de Chile, por la motivación con que edita esta revista, y la constante invitación a pensar en nuestra disciplina. Finalmente, agradezco a Pablo Heresi y Jorge Carvallo por sus comentarios sobre la modelación estructural de edificios.

REFERENCIAS

- Aedo, D., Cisternas, M., Melnick, D., Esparza, C., Winckler, P., & Saldaña, B. (2023). Decadal coastal evolution spanning the 2010 Maule earthquake at Isla Santa Maria, Chile: Framing Darwin’s accounts of uplift over a seismic cycle. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Al Banna, M. H., Taher, K. A., Kaiser, M. S., Mahmud, M., Rahman, M. S., Hosen, A. S., & Cho, G. H. (2020). Application of artificial intelligence in predicting earthquakes: state-of-the-art and future challenges. *IEEE Access*, 8, 192880-192923.
- Bohm, D. (2002). *Wholeness and the implicate order* (Vol. 10). Psychology Press.
- Camus, A. (1967). *La Peste*. Editorial De Bolsillo, Buenos Aires. p. 256.
- Cellucci, C. (1993). From closed to open systems. In *Philosophy of mathematics: Proceedings of the 15th International Wittgenstein Symposium*. Wien: Hölder-Pichler-Tempky. Pp. 206-220.
- Cellucci, C. (1998). The scope of logic: deduction, abduction, analogy. *Theoria*, 64(2-3), 217-242.
- Darrigol, O. (2005). *Worlds of flow: A history of hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*. Oxford University Press.
- Der Kiureghian, A., & Ditlevsen, O. (2009). Aleatory or epistemic? Does it matter?. *Structural safety*, 31(2), 105-112.
- Einstein, A. (1915). *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. Courier Corporation. p. 140
- Fajfar, P. (2018). Analysis in seismic provisions for buildings: past, present and future. In *Recent Advances in Earthquake Engineering in Europe: 16th European Conference on Earthquake Engineering-Thessaloniki 2018* (pp. 1-49). Springer International Publishing.
- Feynman, R. P. (2018). *Surely You're Joking, Mr. Feynman!*. Adventures of a Curious Character. WW Norton & Company.
- Fick, A. (1855). Ueber diffusion. *Annalen der Physik*, 170(1), 59-86.
- Fischer, H. B., List, J. E., Koh, C. R., Imberger, J., & Brooks, N. H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic press.
- Goff, J., Chagué-Goff, C., Nichol, S., Jaffe, B., & Dominey-Howes, D. (2012). Progress in palaeotsunami research. *Sedimentary Geology*, 243, 70-88.

- Hamby, D. M. (1994). A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental monitoring and assessment*, 32, 135-154.
- INN (1996). Nch 433. Diseño sísmico de edificios. Modificada 2009.
- Kilkenny, M. F., & Robinson, K. M. (2018). Data quality: “Garbage in–garbage out”. *Health Information Management Journal*, 47(3), 103-105.
- Kuhn, Thomas S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions* (1st ed.). University of Chicago Press. pp. 172
- Narasimhan, T. N. (2009). The dichotomous history of diffusion, *Physics Today*, Vol. 62, No. 7, pp. 48-53.
- Oyarzún, S. N. D. (2019). Popper y el problema epistémico de la verosimilitud. *Mutatis Mutandis: Revista Internacional de Filosofía*, 1(12), 115-125.
- Popper, K. (1991). *Conjeturas y refutaciones El desarrollo del conocimiento científico*. Paidós Ibérica.
- Rapp (2017). Fluids. Chapter 9 in *Microfluidics: Modeling, Mechanics and Mathematics*. A volume in *Micro and Nano Technologies*. Elsevier. Pages 243-263
- Riddell, R. (1992). Performance of R/C buildings in the 1985 Chile earthquake. In *Proceedings of the 10th world conference on earthquake engineering* (Vol. 8, pp. 4251-4256).
- The New Encyclopedia for the younger generation (1958). Spring books.
- Winckler, P., Liu, P. L. F., & Mei, C. C. (2013). Advective diffusion of contaminants in the surf zone. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 139(6), 437-454.
- Winckler, P., & Liu, P. L. F. (2015). Long waves in a straight channel with non-uniform cross-section. *Journal of Fluid Mechanics*, 770, 156-188.
- Winckler, P. A Story of Four Eggs in Goto Island, Japan (2020). “Stories from the Field: 50 years of Coastal Field Work, 1970-2020”. Eds. Andy Short & Rob Brander. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 101.
- Winckler, P. (2021a). Guía para el modelado de la hidrodinámica y del proceso de mezcla de descargas salinas y térmicas asociadas a proyectos de plantas termoeléctricas y desalinizadoras. Elaborado para DIRECTEMAR.
- Winckler, P. (2021b). Crónicas en Japón. *Márgenes. Espacio Arte y Sociedad*, 14(20), 77-88.
- Winckler, P. (2022). Introducción al modelado de procesos costeros. Apuntes de clases. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Chile. https://www.researchgate.net/publication/344631139_Introduccion_al_modelado_de_procesos_costeros_V2_2020

ACERCA DEL AUTOR

Patricio Winckler Grez es académico de la Escuela de Ingeniería Oceánica, director del Magíster en Ingeniería Marítima, Adaptación y Riesgos (MI-MAR) y profesor del Doctorado en Estudios Interdisciplinarios sobre Pensamiento, Cultura y Sociedad (DEI-UV) de la UV. Comparte sus labores profesionales con la pasión de crear (<https://patowinckler.cl/>).



El autor caracterizado en huevos duros junto a tres investigadores japoneses. El dibujo ilustra una erupción volcánica submarina, cuyas cenizas se depositan en humedales producto del tsunami asociado, pasando a conformar los estratos sedimentarios que permiten datar el evento. El detalle de esta historia se incluye en Winckler (2020, 2021b).

THE HYDRAULIC MACHINE OF TOLEDO AND ITS INTRODUCTION TO CHINA AND JAPAN IN THE 16th AND 17th CENTURIES

Albert Koenig¹, Aldo Tamburrino²

¹Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China
kalbert@hku.hk

²Department of Civil Engineering, University of Chile, Santiago, Chile
atamburr@ing.uchile.cl

ORCID: 0000-0001-5406-370X

ABSTRACT

The article presents a description of one of the most significant hydraulic works of the 16th century, known as the "Artificio de Juanelo." This hydraulic system, surpassing a height difference of over 90 meters, lifted water from the Tajo River to the Alcázar de Toledo in Spain. The genius behind this creation was the Italian engineer Juanelo Turriano. Currently, the exact mechanism for water lifting is not known, but it is understood that it was powered by two hydraulic wheels. The Artificio operated from 1569 until 1617, and its remnants were finally demolished in 1868. Additionally, the article provides a description of the mechanism found in two books printed in China in 1590 and 1623. These accounts were part of the diffusion of European culture and technology in Japan and China, a strategic move employed by the Jesuits as a means to introduce Christianity to Asia.

Keywords: Artificio de Juanelo, Water lifting machine, Toledo, Turriano, Zhifang Waiji, Tenshō Embassy

1. INTRODUCTION AND OBJECTIVE

The hydraulic machine to raise water from the Tagus River to the city of Toledo was a magnificent engineering work from the 16th century, commented on by practically everyone who saw it work, including engineers, architects, cartographers, travellers, diplomats, religious figures, doctors, magistrates, courtiers, writers, playwrights, poets, etc. Back in its time, this machine was hailed as "one of the modern wonders," and its creator, Juanelo Turriano, was named "the second Archimedes" (Ramella and Vigano, 2022). Despite such accolades, the exact workings of the mechanism remain elusive due to the absence of any design diagrams or drawings, and the existing descriptions are subject to different interpretations.

The objective of this article is to present some background information about the hydraulic machine, known as "el Ingenio" or "el Artificio" of Juanelo, along with some hypotheses about its functioning, and finally, descriptions of it found in two books printed in China during the 16th and 17th centuries. The latter, as the dissemination of European sciences and techniques in Asia, served as a means used by Jesuit missionaries to reach and gain acceptance from the ruling classes of China and Japan.

2. THE ARTIFICIO OF JUANELO IN TOLEDO

Toledo, the city of three civilizations (Christian, Muslim and Jewish), was the historic seat of governments from the time of the Visigoths, the Emirate of Cordoba and the kingdom of Castile until 1561 when the capital of Spain was moved by Philipp II to Madrid. It was strategically located on a mountaintop overlooked by the royal castle (Alcázar) and surrounded on three sides by a bend in the river Tagus. However, its unusual topography made water supply exceedingly difficult. Finally, after several previous attempts had failed, Juanelo Turriano (1501-1585)¹, an Italian-Spanish master clockmaker, engineer and mathematician in the service of Charles V and Philipp II, was commissioned in 1565 to come up with a plan. He designed a most ingenious system capable of overcoming about 100 m difference in the level between the river Tagus and the reservoirs of the Alcázar. His hydraulic machine, the so-called Ingenio and, later, Artificio de Juanelo, was completed in 1569 and delivered 12.4 m³ of water a day, 50 percent more than the contract signed by Turriano, a representative of King Felipe II, and the City Council (Ayuntamiento) of Toledo. The current of the river itself served as the driving force of the Artificio while at the same time supplying the water (Bautista et al., 2010). A 1598 map of Toledo specifically highlights the Artificio or Ingenio, (Fig. 1). The unique Artificio was widely admired at the time because no other city in Europe could boast of a comparable water supply. The pumps and pipes used in contemporary water technology were not able to raise water by such high levels, not even 100 years later. Because the delivered water was mostly used in the Alcázar, Juanelo built for the inhabitants of the city between 1575 and 1581 a second Artificio, which was operated by his family. However, due to lack of maintenance and funds, both Artificios ceased functioning after 1609 or, following another source, in 1617. The last remains were demolished in 1868 (Escosura y Morrogh, 1888).

How did the Artificio function? No sufficiently detailed drawings or technical descriptions exist to explain the exact mechanisms. Juanelo's friend Ambrosio de Morales (1575), in a book which describes some cities of Spain, left a description in praise of the Artificio (Morales, 1575, pp. 192-196). Upon first reading, it may not seem to offer much information, and it can be challenging to make sense of it. However, it is one of the most valuable references used in the modern reconstruction of the Artificio. De Morales mentions that a scaled model was built first, and that the idea was taken by Juanelo from one of the machines by Roberto Valturio (Fig. 2). It is thought that plates 95 and 96 in *Le diverse et artificiose machine* (1588) by the Italian engineer Agostino Ramelli (1531-1610) give an approximate

¹ Recent biographies of Juanelo Turriano can be found in Zanetti (2015), in Spanish, and in Zanetti (2017), in English.

idea of how the Artificio might have functioned and looked like (Fig. 3). However, it is not certain whether Ramelli ever saw the Artificio or met Turriano. García de Céspedes (1606), a Spanish cosmographer and hydraulic engineer, promised a detailed description with drawings in a forthcoming book of his entitled *Libro de mechanicas donde se pone de rason de todas las mechanicas*, which unfortunately was never published. He also claimed that the Artificio was prone to repairs, and he would propose a better solution. Since the end of the 19th century, many attempts have been made to reconstruct, at least virtually, the Artificio de Juanelo because of its significance in the history of engineering (Escosura y Morrogh, 1888; Beck, 1899; Bermejo Herrero et al., 2016). Such an attempt by Ladislao Reti (1901-1973), successful chemical engineer, industrialist, and historian of science, presented in 1967 is shown in Fig. 4 (taken from a sketch in Bermejo Herrero et al., 2016). A 3D animation of Reti's idea of the Artificio is in www.youtube.com/watch?v=MwU6m9tjM2A&t=172s



Figure 1. Detail of the map of the city of Toledo taken from the edition of 1598 of the book *Civitates Orbis Terrarum* by Georg Braun and Franz Hohenberg (Vol, V) indicating the location of El Artificio (El Ingenio) de Juanelo Turriano. The text describing Toledo says “... there is a hydraulic machine, made by the marvelous genius of the Italians, that from the Tagus River, large, versatile and excavating works, the water is forced and pushed by artifice in pipes and tubes, through structural channels to the top of the citadel and mountain ...”

However, Reti's conception of the Artificio de Juanelo does not strictly follow the description by Ambrosio de Morales, who says that the machine is the same that as the one described by Valturio to lift a man up, although Juanelo's has "new beauty and subtleties". According to de Morales, “when the first two timbers that are next to the river move, all the others move

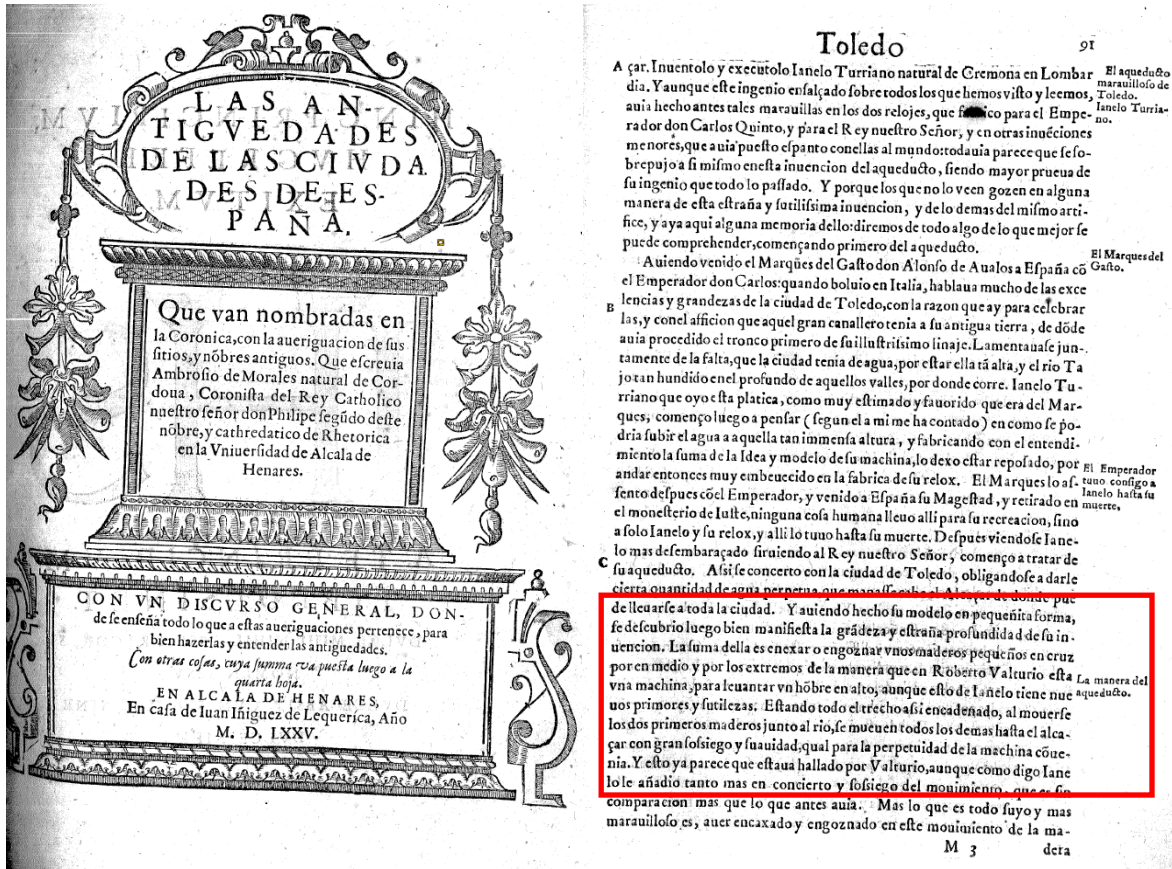


Figure 2. Title page of the book by Ambrosio de Morales and page in which the author mention that the idea of the Artificio was taken from one of Valturio’s machines. In the first line in the box, also appears one of the mentions that a model was built first “Y auiendo hecho fu modelo en pequenita forma” (And having made his model of very small size).

to the Alcazar, with great calm and smoothness”. Almost certainly, he is referring to the machine shown in Fig. 5, taken from the Book X of *De re militari* (Valturio, 1532). It has to be noted that Valturio is not the first to present such an idea, as the same machine also appears in the plate XXXXVI of *De re militari* by Vegetius (1512). The motion of this machine is not oscillatory as that of considered by Reti in his model (and the designs by Ramelli), but it has an up-and-down motion. A model based on Valturio’s mechanism was proposed by Jufre García (2011) (Fig. 6). A 3D animation is presented in <https://artificiodejuanelo.org/los-artificios/>

As the Artificio was covered all along its path, with towers where the lifting machines were located, it probably influenced the absence of drawings depicting its mechanism. The covered Artificio and its towers is clearly observed in the "View of Toledo," painted between 1598 and 1599 by Domenikos Theotokopoulos (1541-1614), "El Greco." The picture was presented in the Hidro-Grafía section of the last issue of the Revista SOCHID (2022, Vol., 37, No. 3, p. 37), and it is repeated in the same section of this issue, highlighting the location of the Artifice.

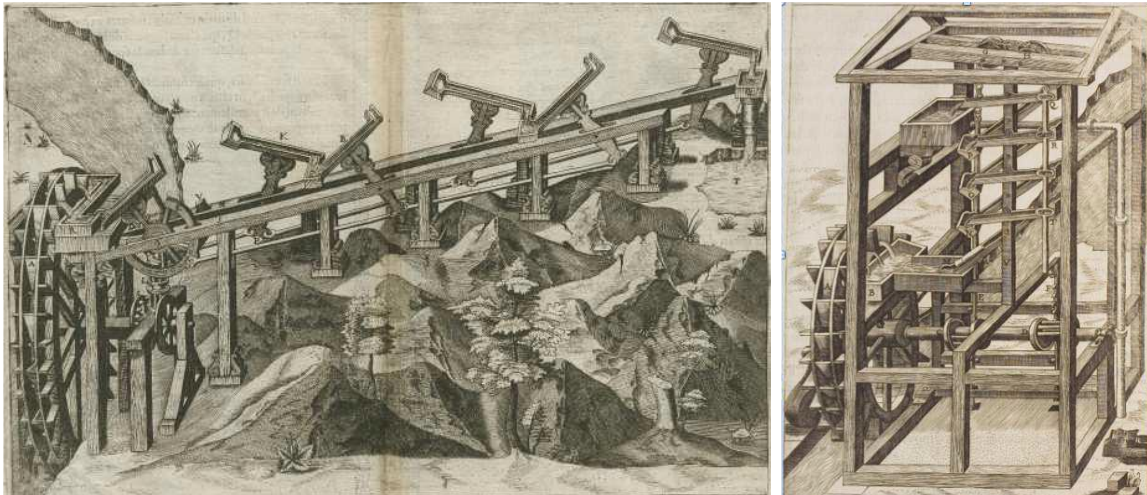


Figure 3. Two possible versions of the Artificio de Juanelo Turriano. Hydraulic machines designed by Ramelli (1588), plates XCV and XCVI.

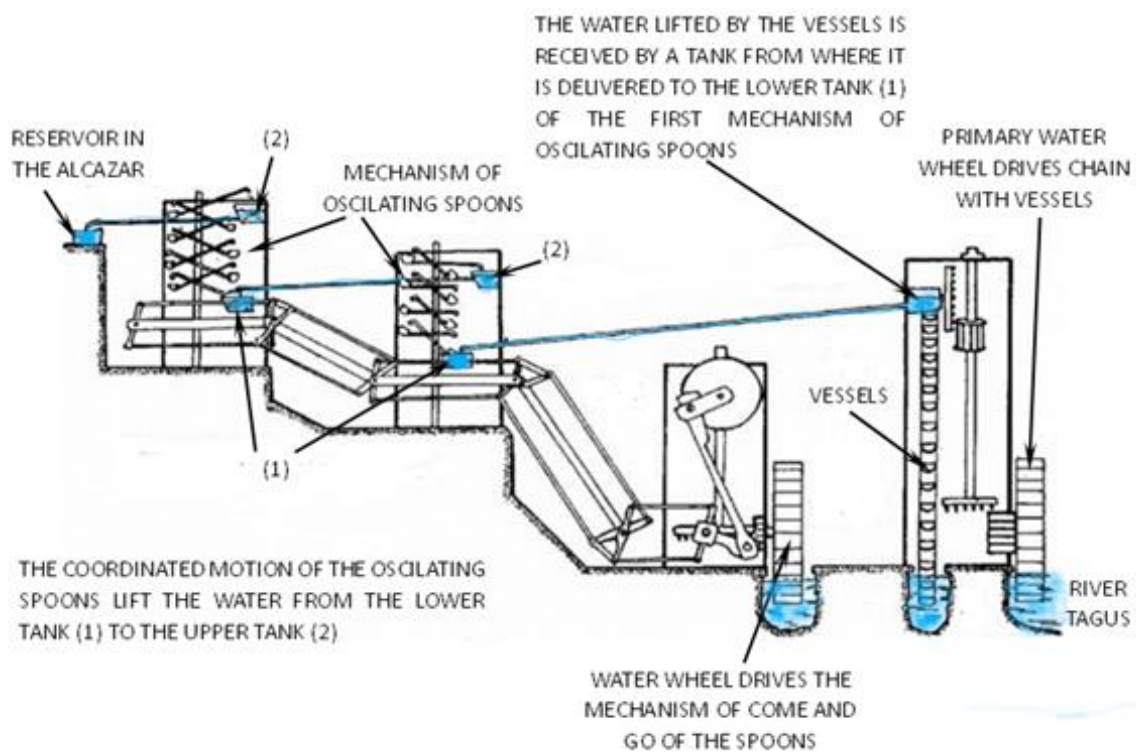


Figure 4. Schematic diagram of the Artificio de Juanelo according to the design presented by Reti in 1967 (Bermejo Herrero et al., 2016) .

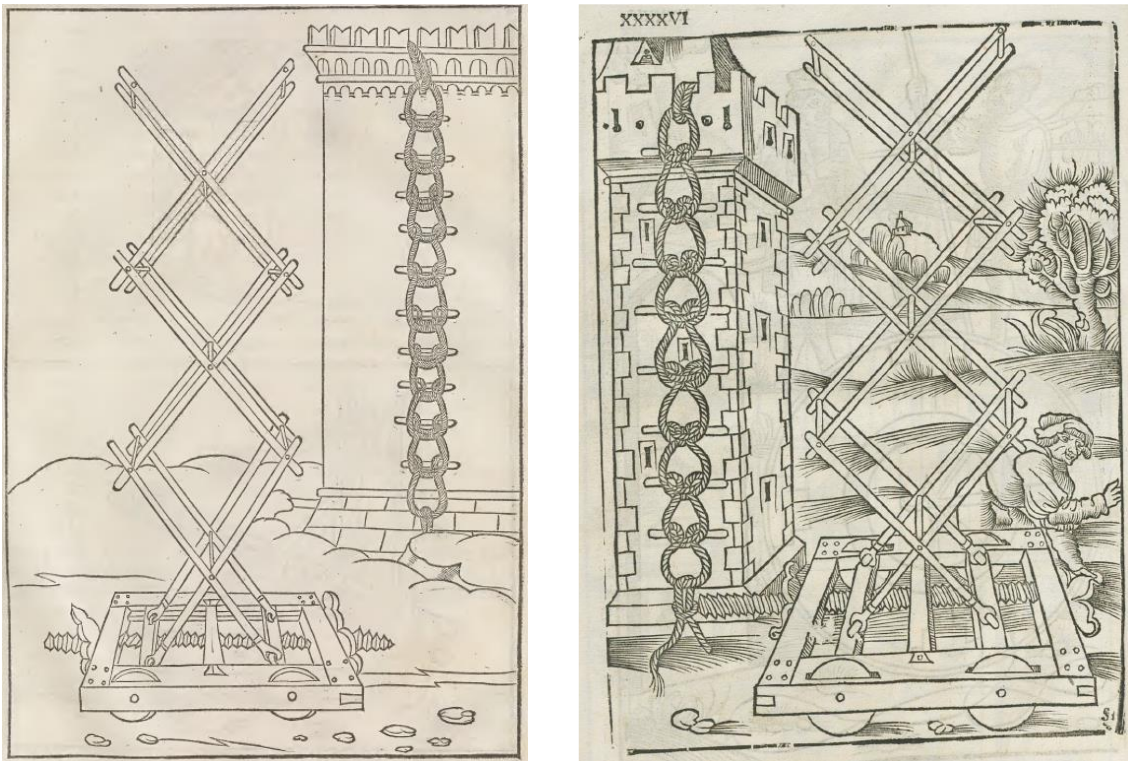


Figure 5. Elevation machine in *De re militari* by Valturio (1532) and by Vegetius (1512)



Figure 6. Model based upon Valturio's machine presented by Jufre García (2011)



Figure 7. Photograph taken by Charles Clifford in 1857 showing the arc of the Alcántara Bridge and, behind it, remnants of the Artificio de Juanelo. The J. Paul Getty Museum, Los Angeles, Object Number: 84.XP.219.38 www.getty.edu/art/collection/object/106QTF

3. THE DESTRUCTION OF THE ARTIFICIO

As mentioned before, due to lack of maintenance and funds, the Artificios ceased to work in 1617. During the reigns of Philip III (1598-1621) and Philip IV (1621-1665), attempts were made to set them working again, but they failed and were definitively abandoned, and the local community began to steal the material, especially the brass from which the spoons were made. It is interesting to mention the design by Juan Fernández del Castillo, less cumbersome and easier to maintain than Turriano's, and that used the original structure of the Artificio. Fernández del Castillo design was based upon Ctesibius pump, a positive displacement piston pump and was approved by the king Philip III in 1605 (Shulman, 2022). Even in the 19th century, remnants of the original building where the water wheel was once located remained visible, as it can be appreciated in the photograph taken in 1857 by the English photographer Charles Clifford, shown in Fig. 7, in which the structure is seen under the arc of the Alcántara Bridge.

As the demand for water supply became an increasingly pressing issue for the city, the Ayuntamiento sought ideas in 1861 to address the problem (Santacruz, 2001). In 1865, the Ayuntamiento called for a competition of projects, and in 1867, they approved the proposal

by engineer José López Vargas. The construction began in 1868, which demanded the demolition of the remnants of Juanelo's work in order to install the powerhouse there (Santacruz, 2001; Crespo, 2012). The destruction of the Artificio was organized by the local authorities and carried out with great pomp, turning into a spectacle that gathered the population of Toledo. However, after the explosion of the dynamite charges, the remnants of the building were still standing, so another attempt had to be planned, which successfully achieved its objective (Rev. BA e H-A, 1868). The destruction of the remains of this 16th-century engineering work came to the attention of the Royal Academy of San Fernando and the Royal Academy of History, who appointed investigation committees to determine the responsibilities for this event. It was also extensively discussed and criticized in various publications of the time. Details of the investigation can be found on the website <https://www.cervantesvirtual.com/obra/informe-de-los-comisionados-de-la-academia-jose-amador-de-los-rios-y-manuel-oliver-sobre-las-causas-de-la-destruccion-del-artificio-de-juanelo-sugiriendo-la-conveniencia-de-enviar-una-circular-a-las-comisiones-de-monumentos-para-que-no-se-repita-un-incidente-similar/>

4. THE INTRODUCTION OF THE HYDRAULIC MACHINE OF TOLEDO IN CHINA AND JAPAN

A vast review of the literature mentioning the works of Juanelo Turriano is presented in the book by Ramella and Vigano (2022). It includes printed works, manuscripts, and archives, covering from the 16th century to what these authors refer to as "secondary sources" of the 21st century. In this extensive review, the authors fail to include one of the printed works from China that will be mentioned later, probably because it was written in the Chinese language and only translated (into Italian) in 2009. In their comprehensive review, Ramella and Vigano do mention the second work, which was intended for dissemination in Japan. The reason for its inclusion is undoubtedly because it was printed in Latin, specifically for distribution among Japanese Jesuit seminarians.

As indicated in the Introduction, the accounts from Asian sources of the Artificio of Juanelo are presented because of the importance their authors attributed to strengthening the introduction of European presence and Christianity in Asia.

The Jesuits played an important role in disseminating European sciences and techniques in Asia, particularly in China and Japan, as this allowed them to easily reach the ruling literati class. A significant part of the technologies presented was related to machines and hydraulic mechanisms (Koenig, 2019). One of these mechanisms, highly praised by those who were familiar with it, was the system that supplied water from the Tagus River to the city of Toledo. This hydraulic system was presented in two books published in Asia:

(i) A book in Chinese, titled *Zhifang Waiji* (Chronicle of foreign lands), printed in 1623 (Fig. 8a, with a reprint in 1626, both in Hangzhou). The book was the result of the collective work of several Jesuit priests: Diego de Pantoja (1571-1618), Sabatino de Ursis (1575-1620), Matteo Ricci (1552-1610), and Giulio Aleni (1557-1627), with the Chinese official and early

Catholic convert Yang Tingyun (1557-1627) as co-author, who improved the style of the book. It constitutes the first detailed world geography in Chinese, in which various famous works of Western hydraulic engineering are briefly described. The first annotated translation of *Zhifang Waiji* into a Western language (Italian) was done by Paolo di Troia (aleni, 2009) almost 400 years of the first printing.

(ii) The second text is a lost manuscript in Spanish by the Italian Jesuit Alessandro Valignano (1539-1606), the Visitor of all Jesuit missions in Asia, which was translated into Latin by his fellow Jesuit, Eduardo (or Duarte) de Sande (1531-1600). It is titled *De missione legatorum Japonensium ad Romanam curiam, rebusque in Europa, ac toto itinere animadversis dialogus; ex ephemeride ipsorum legatorum collectus, et in sermonem lotinum versus ab Eduardo de Sande* (Fig. 8b). The translation into English was made by J.F. Moran and edited by D. Massarella (2016). *De missione*, printed in the port of Macao in 1590, describes the so-called Tenshō Embassy that took place from 1582 to 1592 (https://en.wikipedia.org/wiki/Tenshō_embassy) of Japanese children aged 13 and 14 when they began their voyage to Rome, organized by Alessandro Valignano (de Sande, 1590). During their journey, they visited various places in Europe. This book was primarily created as a text for Latin studies within Jesuit seminaries and as a valuable resource for the Japanese to gain insights into European culture, rather than targeting a European readership (Massarella, 2016). It is written as a dialogue among different members of the Embassy, and in one of the conversations, they refer to their visit to the city of Toledo and describe the



Figure 8. (a) Title page and first page with then name of the authors of *Zhifang Waiji* . (b) Title page of *De missione*, indicating that it was printed in the Chinese port of Macao (*In Macaensi portu Sinici regni*). It was the first book ever printed in Macao using the printing press brought back by the Tenshō Embassy (1582-1592) on their return trip from Europe to Japan.

works and buildings they saw there in 1584. The “Artificio de Juanelo” as described in both books is presented below.

i. The artificio as mentioned in *Zhifang Waiji* (1623, 1626):

“In Duoleduo city [Toledo] people at the top of a mountain carried water from the foot of the mountain to supply [the people] up there. Transporting [the water] was very hard and difficult. Within the last hundred years, there was an ingenious person who made a hydraulic machine which could transfer the water to the city on the mountain without relying on manpower, and this machine could run day and night by itself.” (Aleni, section on Spain, Europe).

Zhifang Waiji was read by the Chinese official and early convert Wang Zheng (1571-1644). He was inspired by the description of the Artificio de Juanelo to learn more about Western technology from the Jesuits in Peking. In 1628, with the help of the German Jesuit Johannes Schreck (1576-1630), he published *Yuanxi qiqi tushuo lu zui* (A record of the Best Illustrations and Descriptions of Extraordinary Devices of the Far West), the first Chinese book to systematically introduce European mechanics and machinery to China and to remain so until the mid-nineteenth century. The foreword cites almost verbatim Aleni’s description of the Artificio.

ii. The artificio as mentioned in *De missione* (1590):

“We stayed in this city of Toledo ...and we saw a number of other public works, among which I’ll mention only two. One of them is a construction of certain remarkable aqueducts, by means of which water from the river Tagus, that most celebrated river which I mentioned when I was dealing with Lisbon, is forced, against nature, as it were, to rise to the uppermost area of the city, which is four hundred and fifty palms away from the bank of the river. In the first place a very broad flight of steps extends from the edge of the river up to that area. There are beams laid down on these steps, and the bronze ducts for the water are supported by these beams, and they are shaped so that they take in the water at their wider end and then move it on into smaller tubes. They are linked by supported joints, and connected and fastened together by iron chains underneath, and so arranged that every time the lowest one, which is at the river’s edge, takes in water by its own movement and sends it to the one above, the others all move in a fixed order, and transmit to those above the water taken in by those below, until it reaches the highest point. This entire mechanism is moved by two wheels, which are at the lowest point, by the river’s edge, and it is roofed in so that no part of the workings of this truly royal machine can be disturbed or damaged by the weather.” (Translation from the Latin to English by Massarella, 2016, of Colloquim XVII, which gives an account of the things which took place in Lisbon, and then in Évora and Vila Viçosa, and then proceeds into the kingdom of Castile, to Toledo and to Mantua Carpetana or Madrid).

De missione is actually based on a diary kept in Portuguese language by the Japanese boys which was transcribed in 1592 by the Portuguese Jesuit Luís Frois (1532-1597), a missionary in Japan. The manuscript was published only in 1942 and 1993, respectively (Frois, 1592

[1942, 1993]). The diary briefly records the visit of the Tenshō Embassy to Toledo on October 1, 1584, when they saw the Artificio. They even talked in person to the old maestro Juanelo Turriano (1500-1585) who passed away in the following year.

The description of the Artificio in *Zhifang Waiji* follows the typical pattern of travellers who visited Toledo when the machine was in operation, providing little detail about its mechanism. In *De missione*, though still from a visitor's perspective, more information is provided. It describes the brass spoons and the alternating movement of the supporting timbers, as well as the waterwheels that activate them. The mention of the roofed structure is noteworthy, as not all descriptions include it. In *De missione*, it is considered a protective feature for the mechanism, although Soto and Martínez-Burgos (2018) suggest that Turriano designed the artifice to run through the interior of a stepped construction to safeguard it from potential plagiarists. Nevertheless, the descriptions of the Artificio are marginal in both books, covering less than half a page in the Italian translation of *Zhifang Waiji*, which itself spans over 200 pages, and in *De missione*, the account takes up half a page out of the over 400 pages that compose the book. This is not surprising, as the primary objective of these works was to showcase the advancement of European society in the East and amaze with its science and technology. While *Zhifang Waiji* was widely circulated in China, Korea and Japan and often reprinted, *De missione* was quickly forgotten. However, *De missione* formed part of the old Jesuit library in China and could have been a possible source for the Artificio's inclusion and description in *Zhifang Waiji*.

5. CONCLUSION

In this article, we have presented one of the grand hydraulic engineering feats - the "Artificio de Juanelo," once known as "one of the modern wonders," and its creator, Juanelo Turriano, dubbed "the second Archimedes." This remarkable construction was designed to lift water continuously day and night, overcoming a height difference of more than 90 meters, from the Tajo River to the Alcázar de Toledo. Its operation commenced in 1569, and a second, smaller artifice was added in 1581 to supply water to the residents of Toledo. However, with time, due to lack of maintenance and resources, both mechanisms ceased to function, leading to the theft of the bronze components that constituted part of the machinery. By 1617, the Artificios were no longer operational. Unfortunately, no blueprints or designs of this engineering marvel have been found, leaving us only with descriptions that are insufficient for replicating the masterpiece. The engravings that have survived show only the exterior view of the Artificios, with the buildings that covered them, adding to the secrecy surrounding their intricate mechanisms. In this article, we have also presented two hypothetical designs based on the descriptions of the Artificios: one proposed by Ladislao Reti (1967) and the other by Jufre García (2011). The links for 3D animation of both of them are given in the text. The dynamiting of the last remnants in 1868 drew strong criticism from the Spanish Academies of Fine Arts and History. Despite the challenges of reconstructing the precise mechanisms, our study sheds light on the significance of this exceptional

hydraulic engineering project, leaving an enduring legacy in the history of technological achievements.

Finally, this article also seizes the opportunity to present two descriptions of the “Artificio de Juanelo,” which are found in two books printed in China: one in Macao (1590) and the other in Hangzhou (1623, 1626). These accounts were authored by Jesuits with the aim of disseminating European culture and technologies, while also serving as a means to introduce Christianity to Asia.

REFERENCES

- Aleni, G. (2009) *Geografia dei paesi stranieri alla Cina*. Introduzione, traduzione e note di Paolo De Troia, Collana Opera Omnia, vol. 1, Fondazione Civiltà Bresciana.
- Bautista E., J.L. Muñoz and J. Echávarri (2010). “Juanelo (1501-1585)” In: *Distinguished figures in mechanism and machine science: their contributions and legacies, Part 2*, M. Ceccarelli (ed.) Springer Science+ Business Media B.V., Dordrecht, pp. 95-110.
- Bermejo, M., L. González, M.G. del Río, J. Martínez (2016) “Reconstrucción virtual del artificio de Juanelo Turriano para elevar agua del río Tajo a Toledo”, <https://www.juaneloturriano.com/noticias/2013/12/11/articulo-reconstruccion-virtual-del-artificio-de-juanelo-turriano-para-elevar-agua-del-rio-tajo-a-toledo> (accessed on June 22, 2023)
- Crespo, D. (2012) “Un episodio de la historia de la conservación del patrimonio tecnológico en España. La destrucción del Artificio de Juanelo en 1868”, en *Fundación Juanelo Turriano. 1987-2012*, Madrid, Fundación Juanelo Turriano, págs. 36-45.
- de Morales A. (1575) *Las antigüedades de las ciudades de España: que van nombradas en la Coronica, con la aueriguacion de sus sitios, y nōmbres antiguos*. Iuan Iñiguez de Lequerica, Alcala de Henares, pp. 90-92.
- de Sande, E. (1590) *De missione legatorum Japonensium ad Romanam curiam, rebusque in Europa, ac toto itinere animadversis dialogus; ex ephemeride ipsorum legatorum collectus, et in sermonem lotinum versus ab Eduardo de Sande S. Soc. Iesv. In Macaensi portu sinici Regni in domu Societatis IESU cum facultate Ordinarij, et Superiorum. Anno 1590*.
- Frois, Luís, S.J. (1592) [1942] *La premiere ambassade du Japon en Europe 1582-1592 Première partie Le Traité du Père Frois (texte portugais)*. Ouvrage edité y annoté par J.A, Abranches Pinto, Yoshitomo Okamoto, Henri Bernard S.J. Sophia University, Tokyo.
- Fróis, Luís, S.J. (1592) [1993] *Tratado dos Embaixadores Japões*. Rui Loureiro, Maria Lourdes de Mendonça (Eds.). Grupo de Trabalho do Ministério da Educação para as Comemorações dos Descobrimientos Portugueses, Lisboa.
- Jufre Garcia, X. (2011) “New Model of the Hydraulic Machine Known as El Artificio De Juanelo”, in J.M. de la Portilla and M. Ceccarelli (eds.), *History of Machines for Heritage and Engineering Development, History of Mechanism and Machine Science 14*, pp. 161-187.
- Koenig, A. (2019) “Introducción del tornillo de Arquímedes en Asia (China, Corea, Japón) durante los siglos XVII y XVIII”, *Revista SOCHID*, Vol. 34, No. 1, pp. 17-30.

- Massarella, D. (2016) *Japanese Travellers in Sixteenth-Century Europe. A Dialogue Concerning the Mission of the Japanese Ambassadors to the Roman Curia (1590)*, Published by Routledge for The Hakluyt Society, London.
- Ramella, R., M. Viganò (2022) *Juanelo Turriano (Giannello Torresani). Fuentes y Documentos Biográficos*. Fundación Juanelo Turriano, Ediciones Doce Calles. Madrid
- Revista de Bellas Artes e Histórico-Arqueológica (Rev. BA e H-A) (1868) “Lamento de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando y de la Academia de la Historia sobre la voladura de los restos del Artificio de Juanelo”, 23 de febrero de 1869, p. 1.
- Santacruz, G. (2001) “La reconstrucción del Artificio de Jaunelo”, *Toletum: Boletín de la Real Academia de bellas Artes y Ciencias Históricas de Toledo*, No. 44, pp. 103-142.
- Shulman, C. (2022) “The unjustly forgotten Ingenio de Juan Fernandez del Castillo in Toledo”. Preprint. Available in www.researchgate.net/publication/362181677
- Soto, V., P. Martínez-Burgos (2018) “Toledo. Imágenes de Agua y Tierra”, *Archivo Secreto*, No. 7, pp. 254-270.
- Valturio, R. (1532) *De re militari*. Printed by Christian Wechel, Paris.
- Vegetius Renuus, Flavius (1512?) *De re militari*. Printed by Knappe (?), Erfurt (?).
- Zanetti, C. (2015) *Juanelo Turriano, de Cremona a la Corte. Formación y red social de un ingeniero del renacimiento*. Fundación Juanelo Turriano, Madrid.
- Zanetti, C. (2017) *Janello Torriani and the Spanish Empire*. Brill Nuncius Series: Studies and Sources in the Material and Visual History of Science. Vol. 2. Leiden/Boston.

ABOUT THE AUTHORS

Albert Koenig obtained a BSAE degree from the University of the Philippines at Los Baños, followed by an M.Sc. and Ph.D. from Cornell University. He has worked for more than thirty years in academia, industry, and government in various countries, always in the area of environmental engineering. In 1992 he joined the Department of Civil Engineering at the University of Hong Kong. After his retirement in 2009, he held visiting positions at the University of Padua, Italy, and the University of Hong Kong where he is currently an Adjunct Professor. From 2018 to 2020 he served as visiting professor at Chu Hai College of Higher Education, Hong Kong. He is a member of several professional associations, including Hong Kong Institution of Engineers (HKIE) and the International Water Association (IWA), Specialist Group on Water and Wastewater in Ancient Civilizations.

Aldo Tamburrino is a Civil Engineer with a specialization in Hydraulics from the University of Chile. He holds an M.Sc. and Ph.D. in Civil Engineering from the University of Minnesota, USA. Currently, he is an Associate Professor in the Department of Civil Engineering at the University of Chile, where he teaches both undergraduate and graduate courses. His current areas of interest mainly revolve around fundamental hydraulics, debris and granular flows, and non-Newtonian fluid dynamics. One of the professional and scientific associations to which he belongs is the International Water Association (IWA), Specialist Group on Water and Wastewater in Ancient Civilizations.

HIDRO-GRAFÍA

ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

La imagen de la HIDRO-GRAFÍA de este número corresponde a un sistema de drenaje de aguas servidas en desuso, el que quedó expuesto en una excavación realizada en la primera mitad del siglo pasado. La pregunta es dónde se encontró y la antigüedad de este sistema de alcantarillado:

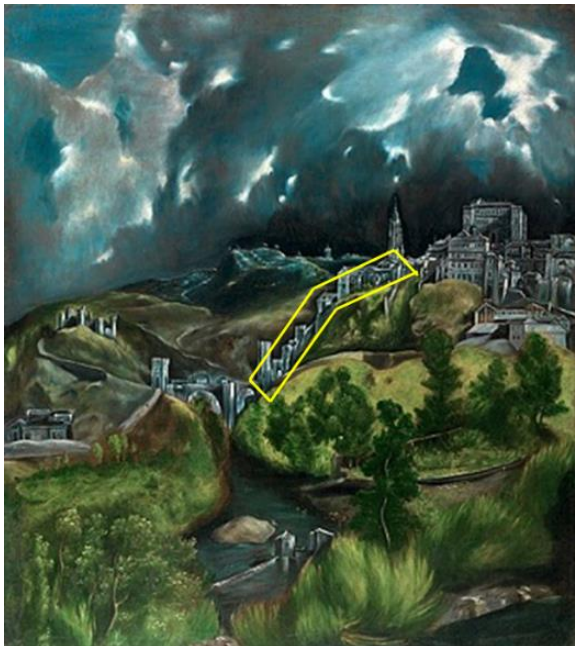
a) En la ciudad de Londres, correspondiente a un fallido sistema de alcantarillado del s. XVII y descubierto durante una ampliación de la línea del metro, realizada entre las dos guerras mundiales.

b) En la ciudad maya de Palenque. Descubierto en el área residencial de la ciudad y fechada su construcción durante el periodo clásico Maya (ca. 250–600 AD).

c) En la ciudad de Ur, antigua Mesopotamia, y corresponde a un sistema de drenaje de aguas servidas existente a comienzos del segundo milenio antes de Cristo.



NÚMERO ANTERIOR



La respuesta correcta a la HIDRO-GRAFÍA del número anterior es la alternativa b). En su “Vista de Toledo,” pintada por Domenikos Theotokopoulos (1541-1614), “El Greco” a fines del siglo XVII el que muestra en la zona enmarcada las edificaciones que cubrían el sistema de elevación de agua desde el río Tajo a la ciudad, conocido como el “Artificio de Juanelo”, el que se describe en detalle en uno de los artículos del presente número de la Revista.

INVITACION A CONTRIBUIR CON ARTÍCULOS

La Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica invita a contribuir con artículos para ser publicados en sus próximos números. Los artículos pueden ser en castellano o inglés.

Los artículos buscan difundir trabajos en el área de interés de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, especialmente aquellos relativos a la hidráulica, hidrología y mecánica de fluidos en general, así como otros aspectos relacionados con el agua, como su uso, gestión, recursos, tecnologías, historia, etc. Los artículos pueden ser de investigación teórica o aplicada, soluciones novedosas a problemas de ingeniería, difusión u otros temas de interés para la comunidad hidráulica nacional.

El formato de presentación de los trabajos puede solicitarse al Editor a la dirección electrónica atamburr@ing.uchile.cl

