Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica



ISSN 0716-3746 Volumen 40, Número 3, 2025

REVISTA DE LA SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

SOCHID

Sede Instituto de Ingenieros de Chile – San Martín 352 – Fono 2 2696 8647 – Santiago CHILE

Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica

ISS 0716-3746
Volumen 40, Número 3, 2025

DIRECTORIO SOCHID

Presidente:	*Jorge Gironás L.*
Vicepresidente:	*Javier Carvallo de S-Q.*
Tesorera:	*Damaris Orphanópoulos S.*
Directores:	*Hernán Alcayaga S.*
	Aldo Tamburrino T.
	Scarlett Vásquez P.
Secretario General:	*Vicente Zuazo E.*

DIRECTORES HONORARIOS

Francisco J. Domínguez S. (Q.E.P.D.)
Horacio Mery M. (Q.E.P.D.)
Eduardo Varas C.
Sergio Radrigán V. (Q.E.P.D.)
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@uchile.cl
San Martín 352, Santiago
Fono 2 2696 8647
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:
Visión de la Ingeniería Civil del Agua
Juan Pedro Martín Vide ……..…….. 3

El ciclo del agua Mistraliano: Conmemorando los 80 años del Premio Nobel otorgado a Gabriela Mistral
Aldo Tamburrino Tavantzis .....……... 7

Aplicación y validación preliminar de OpenFOAM en un canal abierto con macrorugosidades
Carolina Santana, Claudio Cofré, Natalia Bustamante ……..…..…..…. 19

Una aproximación hidrodinámica al café de especialidad
Iván Campos-Herrera …..……... 31

Hidro-Grafía
Aldo Tamburrino Tavantzis …… 51

EDITORIAL

Con gran satisfacción anunciamos que por cuarto año consecutivo la Revista ha logrado editar tres números al año, con aportes de autores nacionales y extranjeros, a quienes agradecemos su contribución. No es fácil sacar cada número y la invitación continúa para todos aquellos que deseen colaborar con artículos, ensayos, comentarios u opiniones en cualquier tema relacionado con agua, fluidos y flujos en general.

Este año se desarrolló el evento más importante de nuestra Sociedad: el Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. En su vigésimo séptima versión, tuvo lugar en Concepción y fue organizado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción, con un récord tanto por la cantidad de trabajos presentados como por el número de asistentes.

Entre las actividades desarrolladas en 2025 destaca la Charla "Embalse Ancoa: Crónica de una experiencia de modificación y adecuación de la obra de seguridad a pocos años de su entrada en operación", presentada por los ingenieros Juan Alberto González, exinspector fiscal de la Dirección de Obras Hidráulicas y Rodrigo Herrera, Jefe de Ingeniería y Desarrollo del Instituto Nacional de Hidráulica.

Durante el año 2025 se ha estado trabajando en la revisión y actualización de los Estatutos de la Sociedad, los que datan de su fundación y varios aspectos de ellos se encuentran obsoletos. Se espera que los nuevos estatutos comiencen a regir el 2026.

Del 19 al 23 de octubre de 2026, bajo el lema Ciencia del Agua: Tradición y Desafíos, se desarrollará XXXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, en las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar y está siendo organizado por la SOCHID, el Instituto Nacional de Hidráulica, la Universidad Técnica Federico Santa María y la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Por último, como siempre, agradeceremos la difusión de la Revista, cuyos números anteriores pueden descargarse del sitio web de la SOCHID.

Aldo Tamburrino Tavantzis
Editor

COLUMNA DE OPINIÓN

VISIÓN DE LA INGENIERÍA CIVIL DEL AGUA

El mundo contemporáneo que hemos conocido en nuestras vidas se apoya en un fundamento determinante que es la técnica. Compartimos unas creencias básicas que nos ha legado la ciencia física, química o biológica; hasta tal punto son creencias aceptadas que quedan un tanto implícitas en la conducta social. Desde la enseñanza media sabemos qué es un electrón, una molécula o un virus: con saberlo aproximadamente nos basta para dar crédito a las novedades técnicas en electrónica, en nuevos materiales o en investigación biomédica. Antes de la revolución científica no era muy diferente la creencia compartida en asuntos como la jerarquía del cosmos o la inmortalidad del alma, creados por Dios. Por eso no es tan absurdo decir que nuestra religión contemporánea es la técnica.

Una de las técnicas desprendidas del tronco de la ciencia física, una de las más importantes por cierto en el bienestar social contemporáneo, es la ingeniería de las obras públicas. Sus fundamentos científicos en Resistencia de Materiales o en Mecánica de Fluidos empezaban a ser sólidos hacia 1800, cuando la Revolución Industrial ya era un hecho en Inglaterra, de modo que el siglo XIX conoció un desarrollo extraordinario que puede simbolizarse en la Torre Eiffel de 1889 como exponente de las estructuras metálicas, ciertamente en este caso más obra simbólica que de estricta utilidad pública. El desarrollo de esta ingeniería, llamada también civil, puede verse en retrospectiva echando una mirada al estado de Francia hacia 1750 cuando algunos hombres valientes se empeñaron en publicar la Enciclopedia, que significativamente se subtitula "*des arts et des métiers*" (de las artes y oficios). En efecto, son industrias todavía manuales, casi artesanales, las que se describen con lujo de detalles en la Enciclopedia. Pero al mismo tiempo los enciclopedistas expresaron una fe inquebrantable en el progreso del hombre mediante la ciencia y la técnica, un nuevo hombre que se libraría así para siempre de los poderes arbitrarios y oscurantistas del Antiguo Régimen. La Historiografía ha llamado Ilustración a este momento de la Historia de la humanidad.

Los enciclopedistas, que promovían el progreso técnico y subvertían el orden establecido, eran hombres cultivados en las Letras: por ejemplo Denis Diderot (1713-1784) y su brillante sátira filosófica *El sobrino de Rameau*. La enseñanza media en España tradicionalmente ha obligado a elegir entre Ciencias y Letras a edad temprana. Esta bifurcación en el saber quizá se puede datar también alrededor de 1800. Johann W. Goethe (1749-1832), padre del concepto de literatura universal (*Weltliteratur*), formuló también una teoría científica de la luz. De él se dice que fue el último hombre capaz de hacer contribuciones en los dos grandes

dominios, capacidad que, según el tópico del hombre universal, había aparecido en el Renacimiento. Carl F. Gauss (1777-1855) no prestó ya atención a la teoría de Goethe pero, en cambio, todavía fue a explicar sus nuevas ideas geométricas del espacio-tiempo al anciano filósofo ilustrado Immanuel Kant (1724-1804). Los estudiantes de ingeniería estudian los teoremas de Gauss, no a Kant o a Goethe. Todavía los ingenieros del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX solían ser hombres ilustrados. Hoy, sin embargo, el contacto entre ingeniería y humanidades, si ocurre, ocurre por un azar personal. De este divorcio triste e inevitable adolece la ingeniería, al menos en España.

La idea optimista de progreso impregnó desde la Ilustración muchas técnicas pero muy especialmente las obras públicas. El aumento de producción agrícola con el regadío gracias a un servicio regular de agua, la mejora de las comunicaciones con los nuevos caminos de hierro, sus puentes y túneles, o las técnicas higienistas para combatir las enfermedades infecciosas en las ciudades, son ejemplos de las mejoras reales e indiscutibles servidas por la ingeniería civil con que el siglo XIX podía demostrar que se habían cumplido los pronósticos de progreso anunciados cien años antes. Un rasgo en común de todas estas obras públicas era el dominio de la Naturaleza, su sujeción a la voluntad del hombre hasta ser doblegada si era preciso. Este es incluso un lugar común en la retórica de la ingeniería civil en su "edad clásica": quien había conocido en 1869 el fin de la empresa del canal de Suez, por ejemplo, no podía dudar de las fuerzas superiores del hombre para amaestrar a la Naturaleza, en este caso acortando las distancias de transporte.

Desde sus primeros tiempos, la ingeniería de obras públicas ha manejado en realidad dos conceptos muy diferentes: uno se puede describir como el fomento, la producción o el aprovechamiento o mejor uso de los recursos naturales. En cuanto al agua, el abastecimiento de agua corriente a poblaciones e industrias, el regadío de tierras cultivables para aumentar la producción de alimentos y, más modernamente en el siglo XX, la producción de energía eléctrica en saltos de agua, son los mejores ejemplos de este concepto. Según la magnitud de lo que se pretende: cuántos habitantes por abastecer o hectáreas por regar, cuántos kilowatios…, lo cual constituye lo que llamamos la demanda, la ingeniería proyecta obras de una dimensión mayor o menor. Las grandes presas, que en el siglo XX han tenido también su propia "épica" literaria de dominio de la Naturaleza como en el siglo XIX los ferrocarriles, se han construido con estas finalidades productivas. La mecánica de fluidos y su rama más específica sobre el movimiento del agua en conducciones, la hidráulica, han reinado como fundamento científico en los proyectos.

Estas obras de fomento a partir del agua han gozado de un consenso social muy amplio sobre sus beneficios hasta hace unas pocas décadas. Para arrancar a los países en vías de desarrollo de su estado de precariedad muchas veces no se ha planteado sino el mismo camino. Prescindiendo de objeciones ciertamente justificadas, los aprovechamientos son en realidad apuestas seguras porque sólo hay que fijarse en que haya suficiente agua: son los volúmenes medios de agua los que aseguran el abastecimiento, el riego o la producción hidroeléctrica. El resto son oscilaciones o fluctuaciones alrededor de la media que quedan absorbidas por

los embalses de regulación. Basta por tanto con no agotar el recurso: con tener presente que *la avaricia rompe el saco*. Esta visión "productivista" está superada por supuesto en los países desarrollados, en los que cada proyecto de fomento usando agua se analiza hoy escrupulosamente para evaluar su impacto ambiental en comparación con su beneficio y se le puede objetar que valga la pena, dada la fuerza que se le hace a una Naturaleza que ahora sabemos mejor que es frágil. No obstante, no deja de ser cierto el hecho fundamental de que su viabilidad técnica sólo depende del volumen medio del agua.

El segundo de los dos conceptos que se encuentran mezclados en las finalidades de las obras públicas, muy distinto al fomento y la producción, es protegerse del suceso accidental, salir ileso de la embestida, combatir el riesgo. Sería el caso de los terremotos para todo tipo de infraestructuras de transporte y edificaciones y de las avenidas fluviales o los *tsunamis* marinos tratándose del agua, que ahora en sus manifestaciones más exacerbadas podemos llamar agua extrema. Una característica totalmente distinta de este concepto de obras públicas es que hay que prestar atención a sucesos que no se presentan cada día, ni cada mes, ni cada año, ni podemos saber cuándo se vayan a presentar, si se llegan a presentar algún día. Esto es la imprevisibilidad o la incertidumbre de los fenómenos naturales extremos, sean maremotos y *tsunamis* en el mar o sucesos meteorológicos desencadenantes de avenidas en los ríos. Saber el volumen medio de agua que circula por un río o el nivel medio de agua en el mar no tiene ningún valor para el análisis técnico de estas obras públicas, como tampoco sus fluctuaciones alrededor de la media, sino sólo los valores extremos: el caudal instantáneo máximo en un río o la altura máxima de ola.

Acabamos de usar la palabra 'máximo' aplicada al caudal de un río y a la altura de una ola. Máximo significa lo más grande, pero ¿es lo más grande de todo lo conocido o lo más grande de todo lo posible? Ninguna de las dos respuestas es satisfactoria. Como la observación científica de los extremos en la Naturaleza no viene de antiguo, ya que los registros de datos fluviales o marítimos tienen raramente más de un siglo, adoptar la primera respuesta no es verdaderamente responsable. Por su parte, la segunda respuesta no es correcta, nos dicen sin dudar las matemáticas: no hay un suceso máximo absoluto de todo lo posible porque siempre puede haber uno aún mayor aunque más improbable. La teoría de la probabilidad, en la que profundizan las carreras de ingeniería, es una rama de las matemáticas cuyos rudimentos se enseñan ya en el ciclo secundario (un puntal es C.F. Gauss). Por ello, las personas normalmente instruidas deberían entender qué es la probabilidad de un suceso como entienden el electrón, la molécula o el virus. Me quejo sin embargo del desinterés por la probabilidad. La prueba es la tozudez con que sectores muy influyentes de la sociedad como los medios de comunicación o el sistema judicial, descendientes de las Letras en el triste divorcio, siguen preguntando, sin admitir más respuesta que sí o no, por sucesos que únicamente son probables. ¿Podía suceder algo así y, si podía suceder, por qué no se protegió frente a ello? ¿Se ha acabado para siempre el peligro? He ahí la otra cara de la moneda: si la ingeniería adolece del divorcio, también adolecen de él las profesiones derivadas de Letras. Veo una esperanza en el éxito de la frase hecha "no existe el riesgo nulo". Sin embargo, se ha manoseado tanto que doy por perdida su eficacia.

La ingeniería de las obras públicas proyecta obras para prevenir y mitigar el embate del agua extrema, pero dominarla sólo puede conseguirlo dentro de un orden. La demanda en este caso es la protección; pero si no se entiende la probabilidad la demanda es en realidad infinita, lo cual es absurdo. Por otro lado, más vale irse haciendo a la idea de que son mejores las medidas paliativas, sobre todo la idea de que lo óptimo es que el mismo suceso extremo afecte a menos personas y bienes. Por bien proyectada que esté una obra, por alto que sea el grado de protección que consigue, siempre puede ocurrir un suceso peor, que exceda la previsión del proyecto. Si esto se entiende bien, puede seguir habiendo un consenso social sobre el beneficio de las obras: contener el agua extrema hasta cierto nivel de protección, pero siendo conscientes de que el riesgo no se puede suprimir. Este es un tipo de consenso responsable muy distinto al consenso confiado en el progreso al suministrar agua. Debe ir acompañado de una conciencia vigilante a fin de que la acometida del agua extrema en el futuro, cuando quiera que sea, no encuentre más personas y bienes afectados que hoy. Por desgracia, la dinámica social y los intereses económicos en la ocupación del territorio y su sanción por unas autoridades que desatienden la teoría de la probabilidad, tanto o más que los medios y la justicia, lleva muchas veces al círculo vicioso de que las obras en realidad hayan agravado los efectos del agua extrema.

Hay otra diferencia importante entre la ingeniería del agua extrema y la del agua media. A propósito de esta última hemos citado el impacto ambiental, un concepto que se ha hecho de uso corriente. Lo nuevo en cuanto al agua extrema es su capacidad de moldear y transformar el medio físico. Por ejemplo, las grandes crecidas hacen crecer los deltas de los ríos. Sucede que estos cambios suelen ir en contra de la función de las obras, como si la Naturaleza reaccionara contra el hombre. Las obras pierden parte de su capacidad y se hacen más vulnerables. Casos como el desastre en el delta del Misisipí a causa del huracán Katrina en 2005 tienen mucho que ver con esta realidad. Por este y otros casos hemos aprendido que no siempre la Naturaleza se deja dominar por el hombre, especialmente si miramos los efectos a largo plazo de obras de gran envergadura como las concebidas, con una confianza propia de la "edad clásica", contra el agua extrema. *No le podemos pedir peras al olmo* a la ingeniería tradicional. Este es quizá uno de los temas que nos espera en este siglo.

Juan P. Martín Vide
juan.pedro.martin@upc.edu
Universitat Politècnica de Catalunya

EL CICLO DEL AGUA MISTRALIANO: CONMEMORANDO LOS 80 AÑOS DEL PREMIO NOBEL OTORGADO A GABRIELA MISTRAL

ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
atamburr@uchile.cl
ORCID: 0000-0001-5406-370X

RESUMEN

A 80 años del Premio Nobel otorgado a Gabriela Mistral, el artículo muestra cómo su obra incorpora de forma persistente el motivo del agua. Se presenta el "ciclo del agua mistraliano" propuesto por Muñoz y Rabanal (2009), que reinterpreta las fases del ciclo hidrológico mediante poemas y prosas: evaporación como purificación, condensación como guía del viento y memoria, precipitación como lluvia o nieve ambivalentes, y escurrimiento como río, vertiente, sed y retorno al mar.

Palabras claves: Gabriela Mistral, Premio Nobel, ciclo hidrológico, poesía, agua.

1. INTRODUCCIÓN

El 10 de diciembre de 1945 la poetisa, diplomática, profesora y pedagoga chilena Gabriela Mistral (Lucila Godoy Alcayaga; Vicuña, 7 de abril de 1889 - Nueva York, 10 de enero de 1957) recibió el Premio Nobel de Literatura de manos del Rey Gustavo V de Suecia. Aunque el anuncio que la galardonaba con el Nobel la sorprendió en Petrópolis, Brasil, donde era cónsul y oyó por radio la decisión de la Academia Sueca el 15 de noviembre, su candidatura venía gestándose desde hacía casi una década. En 1938 comenzó su promoción la escritora ecuatoriana Adelaida Velazco Galdós, a la que rápidamente se sumaron personajes desde Argentina, México, Brasil y Centroamérica. Consciente del papel que juega la diplomacia en el premio, Velazco involucró al presidente Pedro Aguirre Cerda, pese a la renuencia de Gabriela Mistral. Entre 1939 y 1944 hubo postulaciones constantes; la decisiva fue la que hizo el sueco Hjalmar Gullberg, traductor de la obra de Mistral. Tras recibir el Nobel, la poetisa se quedó un par de meses de viaje por Europa, para luego dirigirse a Los Ángeles, Estados Unidos, como cónsul. Con la premiación aumentaron las traducciones y reconocimientos a la calidad de su obra. Pero Chile la homenajeó tardíamente, solo en 1951 se le otorgó el Premio Nacional de literatura y tres años más tarde, en 1954 se le recibió en una visita oficial a nuestro país (Siebert, 2016).

Si bien el solo hecho de ser Gabriela Mistral la primera en dar un Premio Nobel a Chile constituye mérito suficiente para celebrarlo y conmemorarlo cuando se cumplen 80 años de tan importante acontecimiento, no debe extrañar que este reconocimiento se haga en una revista de hidráulica, ya que el tema del agua está a menudo presente en su obra literaria. Hace ya casi 100 años, en diciembre de 1926, escribió en París (y publicado el 23 de enero de 1927 en El Mercurio de Santiago), como parte de Elogios de las Materias, el "Elogio del Agua" (Figura 1), en la que expresa "… El agua que se da sin romperse, única dación sin dolor, que puede ser en la altura de la de los ángeles …" o "El agua de los canales, agua de ingenierías de hombre, que corre como un paño burgués por su camino sin sorpresas, …" (Mistral, Obra Reunida, Tomo V). En el primer capítulo de la Memoria titulada *Lectura Ecocrítica de Textos Mistralianos* para optar al Título de Profesor de Educación Media en Castellano y Comunicación de Marcela Muñoz y Dámaso Rabanal los autores presentan el ciclo del agua mistraliano (Muñoz y Rabanal, 2009[1]). El primer capítulo de la Memoria dio origen al artículo "El motivo del agua en la poesía y prosa de Gabriela Mistral" (Muñoz y Rabanal, s.f.). Basado en el trabajo de Muñoz y Retamal se presenta a continuación el ciclo hidrológico mistraliano.

2. EL CICLO DEL AGUA MISTRALIANO

Según Muñoz y Rabanal, el motivo del agua aparece con tal persistencia y diversidad de estados en la obra de Gabriela Mistral que es posible hablar de un ciclo del agua mistraliano. La idea no pretende reemplazar el ciclo hidrológico que se da en la naturaleza, sino mostrar cómo la poeta y prosista reescribe sus fases mediante imágenes y relatos que activan significaciones morales y afectivas. El agua puede representar vida, esperanza, pero "también muerte y tristeza". Esta polivalencia se enuncia mediante tres citas (M y R, p. 22):

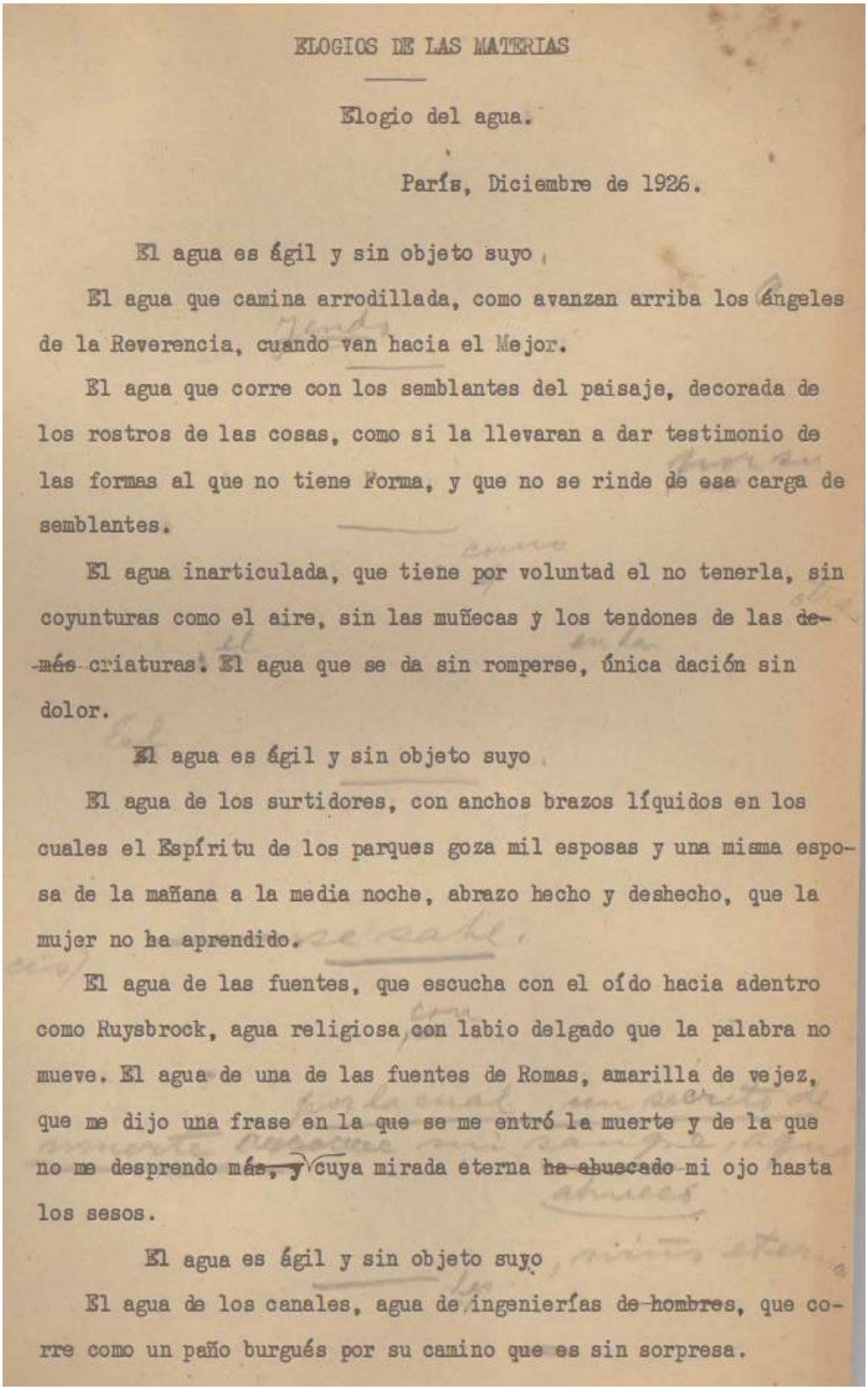
"En el fondo de la huerta
mana una vertiente viva
ciega de largos cabellos
y sin espumas herida." (Mistral 1968: 664)

"Lávame mar, sobre ti, dulcemente,
porque voy dolorida." (Mistral 1968: 112)

"¿Dormiréis mientras afuera
cae, sufriendo, ésta agua inerte,
esta agua letal, hermana
de la muerte." (Mistral 1968: 141)

De acuerdo a estos autores, cada fase del ciclo enfatiza un modo de relación: transformación/purificación (evaporación), tránsito guiado por fuerzas invisibles (condensación), caída visible y afectivamente ambigua (precipitación) y retorno que reconstituye el vínculo con la tierra y el mar (escurrimiento).

[1] En lo que sigue, la Memoria de Título de Muñoz y Rabanal se denotará como M y R



ELOGIOS DE LAS MATERIAS

Elogio del agua.

París, Diciembre de 1926.

El agua es ágil y sin objeto suyo,

El agua que camina arrodillada, como avanzan arriba los ángeles de la Reverencia, cuando van hacia el Mejor.

El agua que corre con los semblantes del paisaje, decorada de los rostros de las cosas, como si la llevaran a dar testimonio de las formas al que no tiene Forma, y que no se rinde de esa carga de semblantes.

El agua inarticulada, que tiene por voluntad el no tenerla, sin coyunturas como el aire, sin las muñecas y los tendones de las demás criaturas. El agua que se da sin romperse, única dación sin dolor.

El agua es ágil y sin objeto suyo.

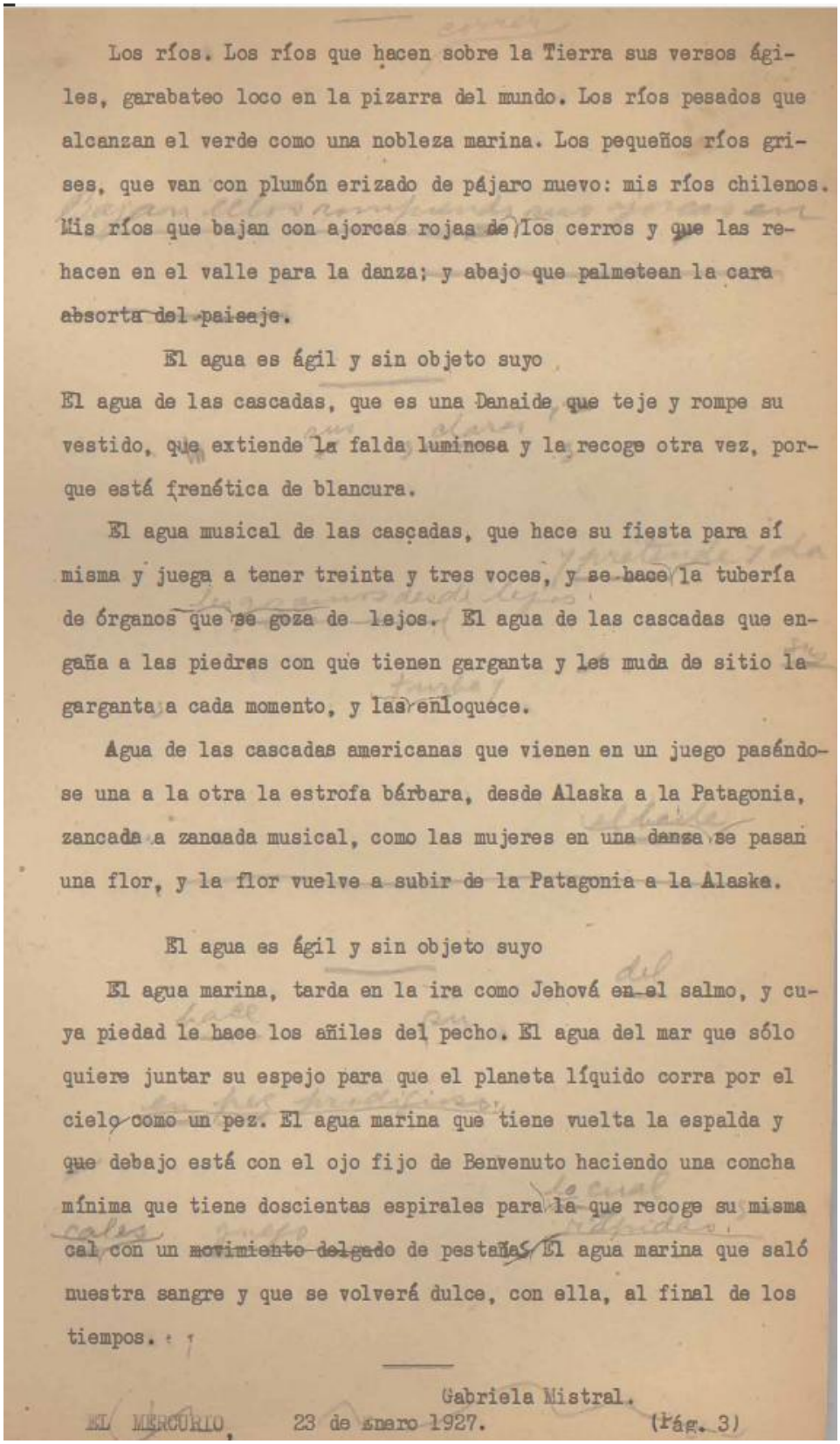
El agua de los surtidores, con anchos brazos líquidos en los cuales el Espíritu de los parques goza mil esposas y una misma esposa de la mañana a la media noche, abrazo hecho y deshecho, que la mujer no ha aprendido.

El agua de las fuentes, que escucha con el oído hacia adentro como Ruysbrock, agua religiosa con labio delgado que la palabra no mueve. El agua de una de las fuentes de Romas, amarilla de vejez, que me dijo una frase en la que se me entró la muerte y de la que no me desprendo más, y cuya mirada eterna ha abuecado mi ojo hasta los sesos.

El agua es ágil y sin objeto suyo

El agua de los canales, agua de ingenierías de hombres, que corre como un paño burgués por su camino que es sin sorpresa.

Figura 1. Borrador de "Elogio del Agua", con correcciones manuscritas de Gabriela Mistral. https://www.bibliotecanacionaldigital.gob.cl/colecciones/BND/00/AE/AE0013351.pdf



Los ríos. Los ríos que hacen sobre la Tierra sus versos ágiles, garabateo loco en la pizarra del mundo. Los ríos pesados que alcanzan el verde como una nobleza marina. Los pequeños ríos grises, que van con plumón erizado de pájaro nuevo: mis ríos chilenos. Mis ríos que bajan con ajorcas rojas de los cerros y que las rehacen en el valle para la danza; y abajo que palmetean la cara absorta del paisaje.

El agua es ágil y sin objeto suyo

El agua de las cascadas, que es una Danaide que teje y rompe su vestido, que extiende la falda luminosa y la recoge otra vez, porque está frenética de blancura.

El agua musical de las cascadas, que hace su fiesta para sí misma y juega a tener treinta y tres voces, y se hace la tubería de órganos que se goza de lejos. El agua de las cascadas que engaña a las piedras con que tienen garganta y les muda de sitio la garganta a cada momento, y las enloquece.

Agua de las cascadas americanas que vienen en un juego pasándose una a la otra la estrofa bárbara, desde Alaska a la Patagonia, zancada a zancada musical, como las mujeres en una danza se pasan una flor, y la flor vuelve a subir de la Patagonia a la Alaska.

El agua es ágil y sin objeto suyo

El agua marina, tarda en la ira como Jehová en el salmo, y cuya piedad le hace los añiles del pecho. El agua del mar que sólo quiere juntar su espejo para que el planeta líquido corra por el cielo como un pez. El agua marina que tiene vuelta la espalda y que debajo está con el ojo fijo de Benvenuto haciendo una concha mínima que tiene doscientas espirales para la que recoge su misma cal con un movimiento delgado de pestañas. El agua marina que saló nuestra sangre y que se volverá dulce, con ella, al final de los tiempos.

Gabriela Mistral.

EL MERCURIO, 23 de enero 1927. (Pág. 3)

Figura 1 (continuación). Borrador de "Elogio del Agua"

3. LAS CUATRO FASES DEL CICLO DEL AGUA MISTRALIANO

3.1 Evaporación: de la charca impura a la nube

La obra que sustenta esta fase es "La Charca", que Mistral presentó en 1922 en *Desolación*. Acá la evaporación aparece como un tránsito desde lo estancado y corrompido hacia una elevación purificadora. En "La Charca" el ciclo natural queda inicialmente suspendido por la ausencia de sol: la charca es "pútrida" y el entorno la clausura; no hay transformación porque no hay calor ni luz:

"Era una charca pequeña, toda pútrida. Cuanto cayó en ella se hizo impuro: las hojas del árbol próximo, las plumillas de un nido, hasta los vermes del fondo, más negros que los de otras pozas … El árbol vecino y unas grandes piedras la rodeaban de tal modo, que el sol no la miró nunca ni ella supo de él en su vida." (Mistral 1983:139, en M y R, p. 23).

Un giro decisivo y conceptualmente provocador es que la "llegada del progreso" (una fábrica) habilita la reapertura del ciclo al remover las piedras que bloqueaban el sol. La evaporación es narrada como un acto de "caricia cálida" que absorbe la impureza hasta hacerla desaparecer, sin destruirla: la transforma:

"Más un buen día, como levantaran una fábrica en los alrededores, vinieron obreros en busca de grandes piedras" … "Y al descender el sol vieron una cosa más insólita aún. La caricia cálida fue durante todo el día absorbiendo el agua impura insensiblemente. Con el último rayo subió la última gota. El hueco gredoso quedó abierto, como la órbita de un gran ojo vaciado." (Mistral 1983: 139, en M y R, p. 24).

La evaporación es en la Memoria de Muñoz y Rabanal (2009), una primera figura ecocrítica: si el ecosistema se interrumpe (por sombra, clausura o negligencia), el agua se vuelve muerte estancada; cuando el ciclo se reactiva, la misma materia "impura" cambia de estado y reingresa al movimiento. La imagen del "ojo vaciado" subraya la dimensión ética del vacío: el lugar donde el agua estuvo queda como testimonio de una transformación irreversible.

3.2 Condensación: las nubes, el viento y el pastoreo del cielo

Las obras que sustentan esta fase del ciclo son el poema "Nubes Blancas" publicado en 1924 en el libro *Ternura* y un manuscrito de 1919 citado por Scarpa (1977) en *La desterrada en su patria* (M y R, pp. 25 y 27).

En la fase de condensación, el agua ya elevada se organiza en nubes y adquiere un lenguaje figurativo propio: las nubes son "ovejas blancas" que "subieron del mar" y se desplazan guiadas por una fuerza externa: el viento. La metáfora pastoril sugiere una estructura de dependencia (las nubes no deciden su camino) y un modo de obediencia natural que contrasta con la soberbia humana.

"Ovejas blancas, dulces ovejas de vellones
que subieron del mar,
asomáis en mujeres los gestos preguntones

antes de remontar …
… Se diría que el cielo o el tiempo consultasteis
con ingenuo temor,
o que, para avanzar un mandato esperaseis.
¿Es que tenéis pastor?"
"- Sí que tenemos un pastor:
el viento errante es él.
Y una vez los vellones nos trata con amor,
y con furia otra vez ..." (Mistral 1968: 322, en M y R, p.26)

En el manuscrito de 1919 (Scarpa, 1977, v.2) se muestra la importancia de las nubes generadas por la condensación, y la nube blanca se vuelve analogía de la poesía (paso liviano y, a la vez, cargado de origen material):

"Como la nube blanca, la clara, la ligera nube de septiembre, pasa la poesía sobre carne de los hombres" (Scarpa 1977 v.2: 241, en M y R, p. 27)

"Sólo tú que la hiciste, sólo a ti que te subió del pecho, poeta, supiste, que la nube blanca llevaba salmuera del mar y que iba cargada de tus lágrimas." (Scarpa 1977 v.1: 242, en M y R, p. 28)

De este modo, en el poema y en el manuscrito, el ciclo del agua se vuelve simultáneamente natural y poético: la nube condensa vapor, pero también condensa memoria y afecto ("salmuera del mar", "tus lágrimas"). La condensación es, entonces, una fase donde el agua ya es relato: porta lo que trae del mar y lo que recibe del pecho humano.

3.3 Precipitación: lluvia triste y nieve ambivalente

Esta fase del ciclo hidrológico se sustenta en los poemas "La Lluvia Lenta" (*Desolación*, 1922) (Mistral 1983), "Mientras baja la Nieve" (*Ternura*, 1924) (Mistral 1968) y "Nieve" citado por Scarpa en *La desterrada en su patria* (Scarpa 1977, v.1).

La precipitación es presentada como la fase más visible y, por ello, la más susceptible de generar una reacción humana inmediata. En "La Lluvia Lenta", la lluvia cae con un carácter afectivo ("medrosa y triste") y su descenso es leído como desfallecimiento: la gota parece morir antes de tocar la tierra.

"Esta agua medrosa y triste,
como un niño que padece,
antes de tocar la tierra desfallece." (Mistral 1983: 85, en M y R, p.29)

La precipitación es una etapa de muerte y vida, de la que el hombre está poco consciente, siendo el lugar donde la desvinculación humana se exhibe sin mediaciones:

"Dentro del hogar, los hombres
no sienten esta amargura,
este envío de agua triste de la altura …
… ¿Dormiréis, mientras afuera

cae, sufriendo, esta agua inerte,
esta agua letal, hermana de la muerte?" (Mistral 1983: 85, en M y R, p.30)

La nieve, en cambio, introduce una ambivalencia: suele aparecer como un descenso "divino", un don que supera a las estrellas, una señal de amor o mensaje de Dios, pero también puede devenir figura de muerte. En "Mientras baja la Nieve" se presenta la caída de la nieve como un suceso digno de admiración:

"Ha bajado la nieve, divina criatura,
el valle a conocer.
Ha bajado la nieve, mejor que las estrellas.
¡Mirémosla caer! …
… Tal vez rompió, cayendo y cayendo, el mensaje
de Dios Nuestro Señor.
Tal vez era su manto, tal vez era su imagen,
tal vez no más su amor." (Mistral 1968: 324, en M y R, p.31)

Sin embargo, en el poema "Nieve" firmado por Mistral en enero de 1957, meses antes de su muerte, la nieve "pausada, silenciosa" se identifica con la muerte "aunque pareciera el amor":

"La nieve sigilosa como un beso,
mortal, callada, pía;
la nieve, de un cojín mortal y espeso,
cerca mi casa desde el mediodía …
… Sigilosa, silente y sosegada,
era la muerte y pareció el amor." (Scarpa 1977 v.1: 308, en M y R, p.32)

La lluvia exige conciencia (porque alimenta y fecunda), pero aparece triste y letal; la nieve fascina por su blancura, pero puede ser máscara de muerte. La fase precipitada es el punto donde el lector debe decidir cómo interpretar el descenso: como amenaza o como condición de vida.

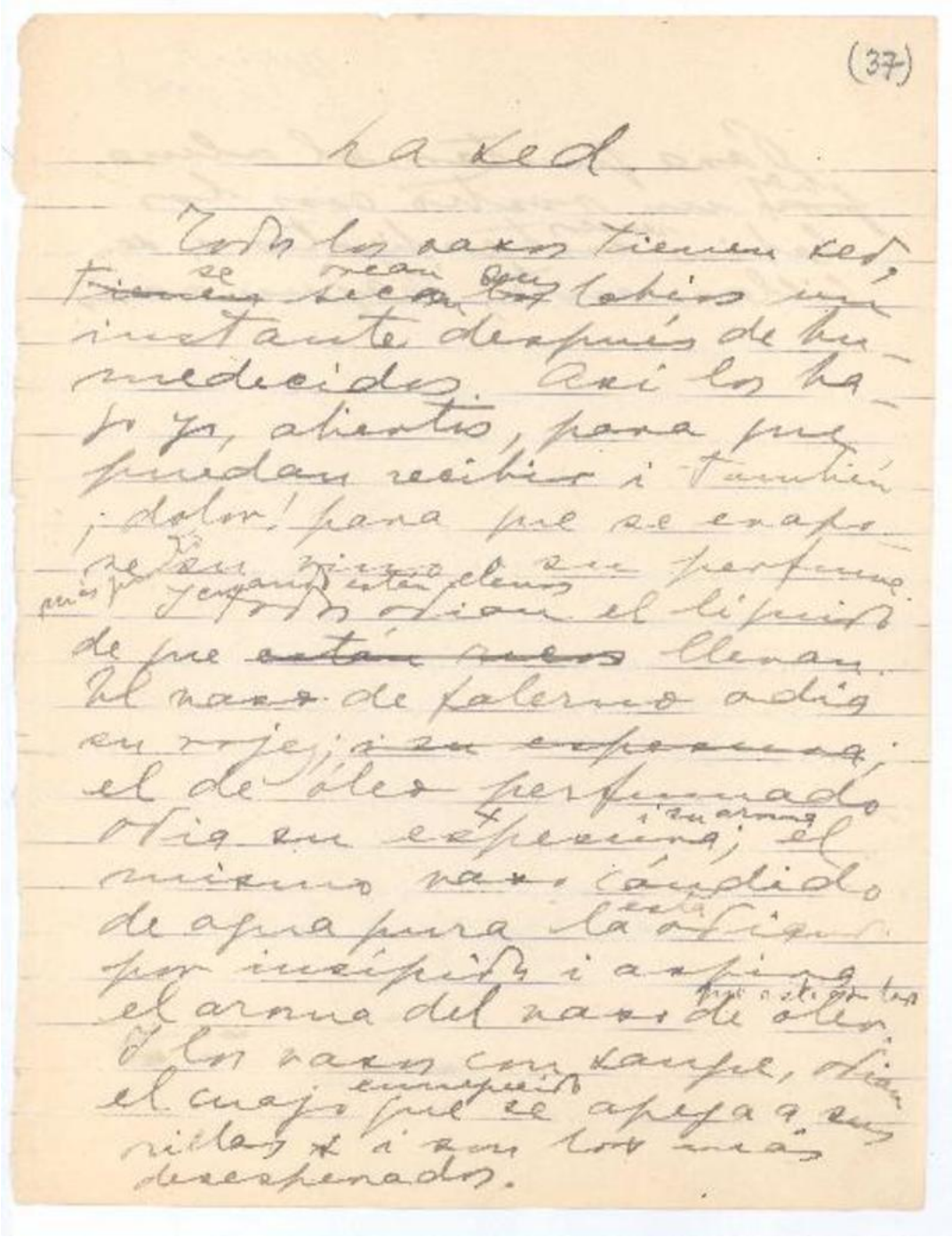
3.4 Flujo de retorno (escurrimiento): ríos, vertientes y regreso al mar

El flujo de retorno se presenta en los poemas "Salto del Laja" (*Poema de Chile*, póstumo, 1967), "El agua" (*Ternura*, 1924), "Vertiente" (*Lagar*, 1954), en los manuscritos "El sauce" (*Materias*), "La sed" (1921, Figura 2) y "El Río".

La cuarta fase del ciclo hidrológico de Mistral se organiza como desplazamiento terrestre del agua: el río, la vertiente, la cascada y el salto. Aquí el agua se vuelve testigo y memoria del habitar humano. En "Salto del Laja", el agua es "viejo tumulto" que escuchan sujetos trabajadores (talan, caminan, cavan), y el poema sitúa el flujo como una continuidad histórica: el agua cae, ve y sigue:

"Salto del Laja, viejo tumulto,
hervor de las flechas indias,
desempeño de belfos vivos,

majador de tus orillas.” (Mistral 1985: 188, en M y R, p.33)


(37)

La Sed

Todos los vasos tienen sed, se orean sus labios un instante después de humedecidos. Así los hago yo, abiertos, para que puedan recibir i también ¡dolor! para que se evapore su vino o su perfume. Y cuando están llenos todos odian el líquido de que ~~están~~ llevan. El vaso de falerno odia su rojez; ~~i su espesura~~; el de óleo perfumado odia su espesura i su aroma; el mismo vaso cándido de agua pura la odian por insípido i aspira el aroma del vaso de óleo. Y los vasos con sangre, odian el cuajo enmegecido que se apega a sus orillas i son los más desesperados.

Figura 2. Borrador de “La Sed” (1921)
https://www.bibliotecanacionaldigital.gob.cl/bnd/623/w3-article-553130.html

El flujo de retorno también se representa como compañía constante. En el manuscrito “El Río” (citado por Scarpa), el agua orilla la casa y arrulla la vida; incluso “lame” heridas y las vuelve “puras”:

“El río que va orillando mi casa, arrulla mi vida, y va haciendo dormir mi corazón.

-Yo me tiendo a su orilla y ha lamido mis heridas largamente y ya son frescas y
ya son puras como la hierba inclinada …" (Scarpa 1977 v.2: 243, en M y R, p. 34)

En *Ternura*, el agua reaparece como abundancia insistente, "amante" e inagotable, capaz de saciar múltiples sedes:

"… ¡Beben del Agua dos orillas,
bebe la Sed de sorbos grandes,
beben ganados y yuntadas,
y no se acaba el Agua Amante!" (Mistral 1968: 290, en M y R, p.34)

El retorno también se hace íntimo y doméstico: la vertiente en el "fondo de la huerta" brota oscura y fina; se bebe "de rodillas" y se lleva a ella la sed "de las pobres bestias", "de los niños" y "la mía".

"En el fondo de la huerta
mana una vertiente viva
ciega de largos cabellos
y sin espumas herida,
que de a bajada no llama
y no se crece, de fina.
De la concha de mis manos
resbala oscura y huida.
Por lo bajo que rebrota
se la bebe de rodillas,
y yo le llevo tan solo
las sedes que más inclinan:
la sed de las pobres bestias,
la de los niños, la mía." (Mistral 1961: 115, en M y R, p. 35)

En la prosa de *Materias*, el agua es "cosa viva que se desliza" y permanece: "Pasa, pasa, y está allí siempre". El sauce "busca el agua" y se "deleita" en ella, en oposición a la verticalidad del álamo o la palmera:

"Eso de que tengo una gran pesadumbre, es una ocurrencia de las gentes sentimentales. El álamo busca el cielo y yo el agua. Me gusta esa cosa viva que se desliza como un ángel sobre su vestidura larga y que en los estanques tiene el pecho tibio … La palmera goza el aire con sus brazos abiertos y dichosos; yo me deleito en el agua. Pasa, pasa, y está allí siempre." (Mistral 1978: 103, en M y R, p. 36)

Finalmente, el flujo de retorno incluye la dimensión de necesidad humana: la sed como desesperación y dependencia. En "La sed" (*Desolación*), la metáfora fija el rostro sediento como emblema del ansia; incluso el vaso es "una boca con sed":

"Para pintar el ansia de los hombres haz de ellos solamente el rostro con los labios entreabiertos de sed o haz sencillamente un vaso, que también es una boca con sed" (Mistral 1983: 114, en M y R, p. 36).

"Y los vasos con sangre viven desesperados del grumo que se cuaja en sus paredes y que no pueden ir a lavar a los arroyos." (Mistral 1983: 114, en M y R, p. 37)

En esta fase, el ciclo vuelve a su punto de partida: el agua corre hacia el mar, donde podrá "subir" nuevamente.

4. CONCLUSIÓN

A 80 años del Premio Nobel otorgado a Gabriela Mistral, la conmemoración de su figura no se agota en el hito cultural e histórico de ser la primera Nobel chilena: su obra permite, además, volver a pensar el agua como materia fundamental y como experiencia humana. Tal como lo sugieren el Elogio del Agua y la lectura que hacen de Muñoz y Rabanal, el agua en Mistral no es un simple motivo ornamental, sino una sustancia viva que articula memoria, afectos y juicio moral.

El "ciclo del agua mistraliano" propuesto por estos autores muestra con claridad esa reescritura poética de un proceso natural: evaporación como transformación y purificación; condensación como tránsito guiado por fuerzas invisibles y como condensación de lágrimas, sal y lenguaje; precipitación como descenso ambivalente (fecundo y doloroso, amoroso y mortal), y retorno como compañía persistente, cuidado doméstico y necesidad (sed) que expone la dependencia radical de la vida respecto del agua. En conjunto, estas fases del ciclo revelan que el agua, al cambiar de estado, cambia también de significado: puede ser esperanza o tristeza, don o amenaza, consuelo o recordatorio de finitud.

En este sentido, conmemorar a Mistral en la Revista de la SOCHID no es una excentricidad, sino una invitación a ampliar el marco desde el cual se piensa el recurso hídrico. Su escritura recuerda que toda "ingeniería de hombre" convive con dimensiones no cuantificables (ética, sensibilidad, vínculo con la tierra y con los otros), y que la relación con el agua se juega tanto en infraestructuras y canales como en conciencia, cuidado y responsabilidad. Leer a Mistral desde el agua, finalmente, permite reconocer que el ciclo no es solo un circuito físico: es también una forma de aprender a mirar lo que "pasa, pasa, y está allí siempre".

REFERENCIAS

Mistral, G. (2020) *Obra Reunida. Prosa*. Tomo V. Ediciones Biblioteca Nacional. Impreso por Salesianos Impresores S.A. Santiago.

Muñoz Leiva, M. A., D.A. Rabanal Gatica (2009) "Lectura Ecocrítica de Textos Mistralianos", Memoria para optar al Título de Profesor de Educación Media en

Castellano y Comunicación. Universidad del Bío-Bío, Facultad de Educación y Humanidades. Chillán.

Muñoz Leiva, M. A., D.A. Rabanal Gatica (sin fecha) "El motivo del agua en la poesía y prosa de Gabriela Mistral", http://www2.udec.cl/postliteratura/docs/artilinea/aguamistral.pdf

Siebert, F. (2016) A 71 años del Premio Nobel: La travesía de Gabriela Mistral a Suecia. https://uchile.cl/noticias/129347/a-71-anos-del-premio-nobel-la-travesia-de-gabriela-mistral-a-suecia

Obras de Gabriela Mistral citadas en el texto y tomadas de la Memoria de Muñoz y Rabanal (2009):

1961. *Lagar*. Editorial del Pacífico. Santiago.
1968. *Poesías Completas*: Desolación; Ternura; Tala; Lagar I. Editorial Aguilar. Madrid.
1978. *Materias*. Editorial Universitaria. Santiago.
1983. *Desolación.* Editorial Andrés Bello. Santiago.
1985. *Poema de Chile*. Editorial Seix Barral. Santiago.

También citado en la Memoria de Muñoz y Rabanal (2009):

Scarpa, R.E. (1977) *La desterrada en su patria.* Vols. 1 y 2. Editorial Nascimento. Santiago.

ACERCA DEL AUTOR

Aldo Tamburrino Tavantzis es Ingeniero Civil mención Hidráulica de la Universidad de Chile, M.Sc. y Ph.D. in Civil Engineering por la Universidad de Minnesota, EEUU. Es Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, donde enseña cursos de pre y postgrado en dicha universidad. Actualmente sus áreas de interés se centran fundamentalmente en hidráulica fundamental, flujos detríticos, granulares y de fluidos no-newtonianos.

APLICACIÓN Y VALIDACIÓN PRELIMINAR DE OPENFOAM EN UN CANAL ABIERTO CON MACRORUGOSIDADES

CAROLINA SANTANA[1], CLAUDIO COFRÉ[1], NATALIA BUSTAMANTE[1,2]
[1]Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.
[2]Instituto del Medio Ambiente- UFRO

c.santana03@ufromail.cl
c.cofre08@ufromail.cl
natalia.bustamante@ufrontera.cl

RESUMEN

Este trabajo reporta el trabajo realizado en dos prácticas de estudios en La Universidad de La Frontera. El trabajo consideró dos enfoques, el enfoque experimental consistió en tomar datos en un canal abierto con macrorugosidades, con una cámara Nikon Z90, y el enfoque numérico considero la modelación en OpenFOAM del canal de laboratorio con un modelo de turbulencia $k-\omega\ SST$. El objetivo fue caracterizar el régimen hidráulico y validar la capacidad de un modelo numérico para reproducirlo. La fase experimental se ejecutó en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de La Frontera, instalando obstáculos prismáticos equiespaciados que inducen rugosidad de lecho. La lámina de agua se obtuvo mediante procesamiento digital de imágenes en MATLAB, combinando detección de bordes (Sobel) y análisis espectral vía Transformada Rápida de Fourier (FFT). Se identificaron frecuencias dominantes en seis posiciones del canal, se estimó el número de Froude y se evaluó la evolución espacio–temporal de la superficie libre.

El régimen se mantuvo subcrítico en todas las posiciones, con predominio de ondas largas y estables ($f \approx 0.1-0.2\,Hz$). En las proximidades de los obstáculos aparecieron frecuencias mayores ($f \approx 1-1.5\,Hz$), asociadas a ondas cortas y turbulencia localizada, que se disiparon aguas abajo. Se detectaron picos aislados de alta frecuencia atribuidos a ruido experimental, mitigados mediante filtrado y suavizado. En paralelo, se implementó un modelo interFoam con $k-\omega\ SST$ en OpenFOAM v.13. La comparación con los resultados experimentales arrojó una diferencia promedio menor al 14 %), validando la capacidad del modelo para reproducir la lámina de agua y velocidades medias. El trabajo demuestra la utilidad de integrar experimentación física, procesamiento de imágenes y simulación CFD como herramientas complementarias para el análisis de flujos en canales con macrorugosidad.

Palabras clave: OpenFOAM, procesamiento de imágenes, lechos macrorugosos.

1. INTRODUCCIÓN

La rugosidad en canales abiertos afecta de manera importante la resistencia al escurrimiento, la distribución de velocidades y la formación de estructuras turbulentas (Pradhan, 2025). La incorporación de obstáculos o elementos rugosos pueden modificar el régimen, además puede

promover transiciones subcrítico–supercrítico y altera la dinámica de la capa límite (Martínez et al., 2024). Comprender estos efectos resulta clave para un diseño eficiente de obras hidráulicas.

Zhou et al. (2024) y Cantero et al. (2024) han abordado la rugosidad mediante enfoques experimentales y numéricos —incluyendo modelos estadísticos y de regresión— y mediante canales físicos con distintas geometrías de obstáculo para medir laminas de agua y velocidades, a menudo apoyados en procesamiento imágenes. Por otra parte, el parámetro adimensional, ξ, definido como la razón de aspecto entre la separación (e) y su altura o diámetro de los obstáculos (D), es relevante para el análisis de regímenes macrorrugosos. Chow (1988), Oke (1987) y Abt & Ruff (1969) reportaron que $\xi > 10$ indica régimen de rugosidad aislada, en el que la estela aguas abajo se desarrolla antes de alcanzar el siguiente obstáculo.

Desde un enfoque experimental, Farías (2023) estudió flujos subcríticos, turbulentos y permanentes sobre un canal rectangular con trenes obstáculos semicilindricos transversales, midiendo eje hidráulico, deformación de superficie libre y parámetros de resistencia (Chezy, Manning). Se reportaron relaciones entre el factor de fricción, la rugosidad relativa, la separación relativa y los números de Reynolds y Froude.

Por otra parte, la dinámica de fluidos computacional (CFD) permite reproducir condiciones difíciles de lograr en laboratorio y contrastar con resultados experimentales (Hindasi, 2023). Este artículo integra ambos enfoques para analizar un canal con rugosidad inducida por bloques prismáticos rectangulares separados a distancia fija. A partir de procesamiento de imágenes en MATLAB se analizarán profundidades del flujo y características ondulatorias de la lámina de agua; y mediante OpenFOAM (k–ω SST) se simula el mismo sistema para obtener velocidades medias, perfiles de velocidad.

2. METODOLOGÍA

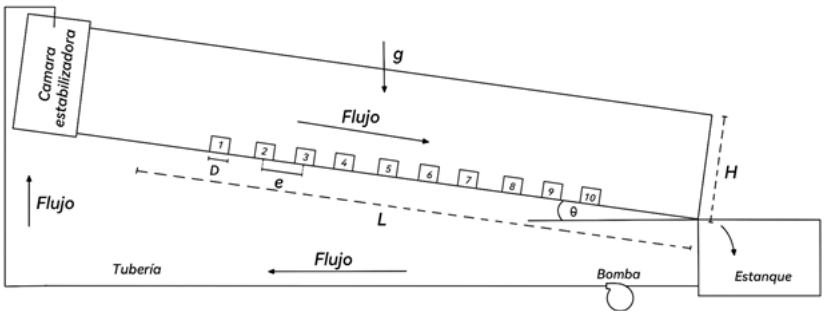
2.1 Ensayo experimental

Los experimentos se realizaron en el canal abierto del Departamento de Ingeniería en Obras Civiles de la Universidad de La Frontera. El canal tiene sección tranversal rectangular, de ancho B, altura útil, H; longitud efectiva, L y pendiente del lecho, i. El flujo es transita por el sistema mediante un sistema considera un recirculación agua, desde una sentina hasta un estanque de aquietamiento mediante una bomba centrífuga Reggio, operando en el rango de caudales entre 0.00083–0.00583 m³/s. La Tabla 1 presenta las dimensiones del canal y el caudal con el cual se realizó el trabajo experimental.

La macrorugosidad de lecho se generó instalando transversalmente diez obstáculos prismáticos de madera de sección cuadrada y de altura D ($D = 0.03\ m$). Los obstáculos se localizaron de manera equiespaciada a una distancia e de 0.35 m centro–centro (Figura 1). Esta configuración indica que ξ es 11.67, por lo que acorde a Chow (1988), Oke (1987) y Abt & Ruff (1969) la rugosidad es aislada y las estelas se desarrollan completamente entre obstáculos.

Tabla 1 Características geométricas del canal y caudal experimental

$B\ [m]$	$H\ [m]$	$L\ [m]$	$i\ [°]$	$Q\ [m3/s]$
0.4	0.4	5.32	0.642	0.0031



a.) Esquema experimental del canal.

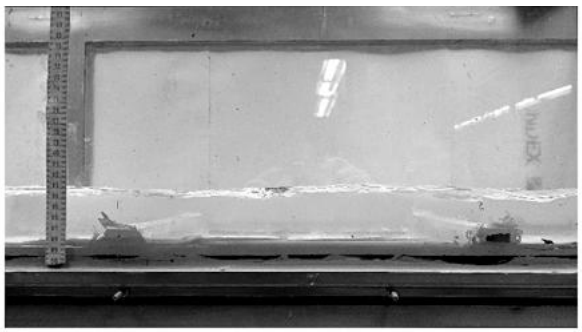


b.) Lecho del canal con obstáculos instalados.

Figura 1. Configuración experimental del canal abierto.

2.2 Procesamiento digital de imágenes

La adquisición se realizó con cámara Nikon Z50 cuya resolución es de 1920×1080 px y la tasa de adquisión es de 120 fps. El procesamiento digital imágenes se realizó en MATLAB, consideró detección de lámina de agua mediante el filtro Sobel, y sustracción de imágenes consecutivas para reducir ruido y mejorar el contorno agua–aire (Desa & Salih, 2004). La Figura 2a muestra una imagen en escala de grises y Figura 2b muestra la superficie del agua posterior a la extracción del fondo obtenido mediante sustracción de imágenes.



a) Imagen en escala de grises



b) Imagen obtenida después de la sustracción del fondo

Figura 2. Comparación entre el resultado de la diferencia absoluta (b) con la imagen de referencia (a).

Adicionalmente, se realizó la conversión píxeles→metros (px→m) mediante una escala de calibración. Las mediciones de la profundidad de la lámina de agua, obtenidas mediante

procesamiento imágenes, se efectuaron en seis posiciones a lo largo del canal: 3 cm aguas arriba y 3 cm aguas abajo de las gradas 7 y 8, además de puntos ubicados en el eje del canal sobre las gradas. Con estos datos se construyeron perfiles instantáneos de la lámina de agua, como se muestra en la Figura 3.

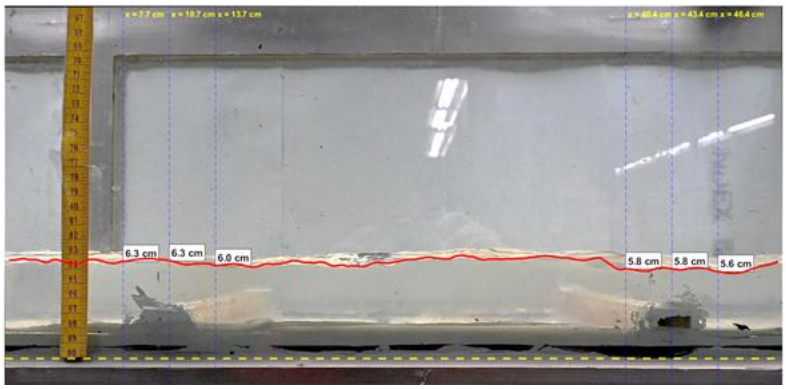


Figura 3. Eje de la lámina de agua con puntos de medición y conversión de píxeles a centímetros.

2.3 Análisis espectral

Dado que la instrumentación disponible en el canal no incluye equipos para medir velocidad —como un Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) o cámaras de alta velocidad—, se realizó un análisis espectral de las series de profundidad de la lámina de agua para identificar la frecuencia dominante (f) en cada uno de los seis puntos de muestreo y adicionalmente se analiza esta variación espacial para cada fotograma (frame).

2.4 Modelo numérico

Se utilizó interFoam (OpenFoam13, flujo bifásico incompresible) con k–ω SST como cierre turbulento. La geometría y el mallado se generaron en SALOME. Se construyó una malla hexaédrica estructurada de aproximadamente 1.297.240 elementos (ver $Figura$ 4)**,** con aspect ratio menor 3.13 para favorecer la estabilidad numérica (CFD Support, 2022). Se optó por una malla estructurada porque, de acuerdo con Biswas & Strawn (1998) y Keyes et al. (2000), este tipo de mallas suele ofrecer mayor precisión que las no estructuradas y mejorar la localidad de memoria y la estabilidad.

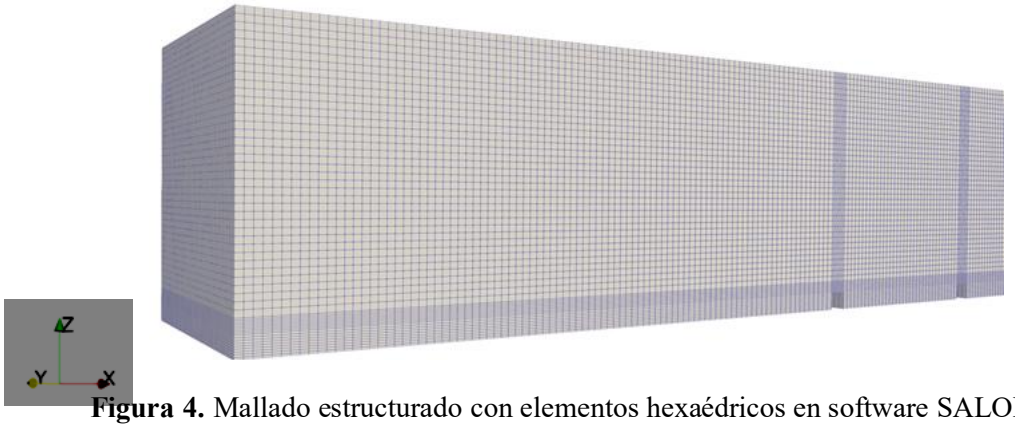


Figura 4. Mallado estructurado con elementos hexaédricos en software SALOME.
(Fuente: Elaboración propia).

Se definieron las condiciones iniciales y de contorno: caudal/velocidad de entrada, no deslizamiento en paredes, salida libre, gravedad proyectada según la pendiente del canal, propiedades del agua y del aire, y el modelo de turbulencia $k-\omega\ SST$ (Menter, 1993; Esch & Menter, 2001; Menter et al., 2003). La simulación se ejecutó en paralelo con 6 núcleos en un equipo de escritorio con Intel Core i7 de 12ª generación y 32 GB de RAM. Se realizaron pruebas previas para evaluar el rendimiento de cálculo con distintos grados de paralelización, determinándose que la configuración óptima para estas modelaciones es de 6 núcleos.

La simulación se ejecutó para 100 s con paso de tiempo adaptativo controlado por Courant ($Co_{max} = 0.75$) para mantener estabilidad (Neural Concept, 2023). El flujo se consideró plenamente desarrollado a partir de $t = 60\ s$. Por lo tanto, los análisis del flujo se realizaron en $t > 60\ s$.

Por otra parte, siguiendo Menter (1993), el cierre turbulento se basa en un modelo de dos ecuaciones $k-\omega$. En el marco RANS para flujo incompresible, el campo se describe mediante las ecuaciones de conservación de masa (continuidad) y de cantidad de movimiento (Navier–Stokes promediadas de Reynolds). El cierre se completa con dos ecuaciones de transporte adicionales para la energía cinética turbulenta (k) y la frecuencia específica de disipación (ω), a partir de las cuales se estima la viscosidad turbulenta del flujo. Este conjunto de ecuaciones permite a OpenFOAM resolver de manera más precisa flujos complejos con separación y condiciones de contorno variadas, lo que lo hace adecuado para el análisis numérico de estructuras turbulentas.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización hidráulica de flujo en el canal abierto

La **Tabla 2** presenta los parámetros hidráulicos: profundidad de la lámina de agua aguas arriba de los obstáculos, h_0; profundidad normal, h_n; profundidad crítica, h_c; número de Froude, Fr; número de Reynolds, Re. Los valores obtenidos reportan un régimen turbulento ($Re > 500$) y escurrimiento subcrítico ($Fr < 1$), coherente con el perfil de la lámina de agua mostrado en la **Figura 3**, donde se observa un desfase entre la deformación de la superficie libre y la ubicación de las macrorugosidades.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos del flujo obtenidos experimentalmente.

$U\ [m/s]$	$H0\ [m]$	$hn\ [m]$	$hc\ [m]$	Fr	Re
0.1535	0.050	0.0205	0.018	0.22	7.7×10^3

3.2 Resultados experimentales

La Figura 3 resume los parámetros del flujo para la caracterización hidráulica y del análisis temporal en seis posiciones a lo largo del canal. En todos los puntos evaluados, el escurrimiento es subcrítico (Fr < 1), en concordancia con las observaciones de laboratorio, donde no se identificaron resaltos hidráulicos en ningún sector del canal.

Tabla 3. Resultados de la caracterización hidráulica en seis puntos de observación.

Posición (m)	$\boldsymbol{h}\ [\boldsymbol{m}]$	$\boldsymbol{U}\ [\boldsymbol{m/s}]$	$\boldsymbol{Fr}$
0.077	0.063	0.144	0.184
0.107	0.064	0.142	0.180
0.137	0.060	0.151	0.197
0.404	0.057	0.159	0.212
0.434	0.058	0.156	0.206
0.464	0.056	0.161	0.216

En la **Figura 5** se presentan los espectros de amplitud obtenidos mediante la aplicación de la FFT en seis posiciones distribuidas en torno a las gradas 7 y 8 respectivamente. Los tres gráficos superiores corresponden al análisis realizado en la zona de la séptima grada, mientras que los tres inferiores muestran el comportamiento en torno a la octava grada.

En la séptima grada, se aprecia que aguas arriba de la grada 1 ($x = 0.082\ m$) la frecuencia dominante es baja ($f \approx 0.12\ Hz$), lo que refleja oscilaciones largas y estables. Sobre la grada ($x = 0.107\ m$) la frecuencia dominante aumenta a $f \approx 1.20\ Hz$, evidenciando la generación de ondas más cortas y perturbaciones inducidas por la rugosidad. Posteriormente, aguas abajo de la primera grada ($x = 0.132\ m$) el flujo mantiene una frecuencia dominante intermedia ($f \approx 0.12\ Hz$), lo que indica una tendencia hacia la recuperación del régimen. En la octava grada se identificó inicialmente un pick de frecuencia dominante en torno a 17.9 Hz ($x = 0.409\ m$). Sin embargo, este valor fue considerado como ruido experimental, ya que se presentó únicamente en un punto aislado, sin reproducirse en posiciones adyacentes, y excede ampliamente el rango de frecuencias características de oscilaciones superficiales en régimen subcrítico. Sobre la grada ($x = 0.434\ m$) la frecuencia dominante se reduce a $f \approx 0.48\ Hz$, mientras que aguas abajo ($x = 0.459\ m$) se estabiliza nuevamente en $f \approx 0.12\ Hz$. Esto podría sugerir que el efecto de la rugosidad induce oscilaciones de mayor frecuencia en su entorno inmediato, pero que éstas se atenúan rápidamente en el tramo de recuperación.

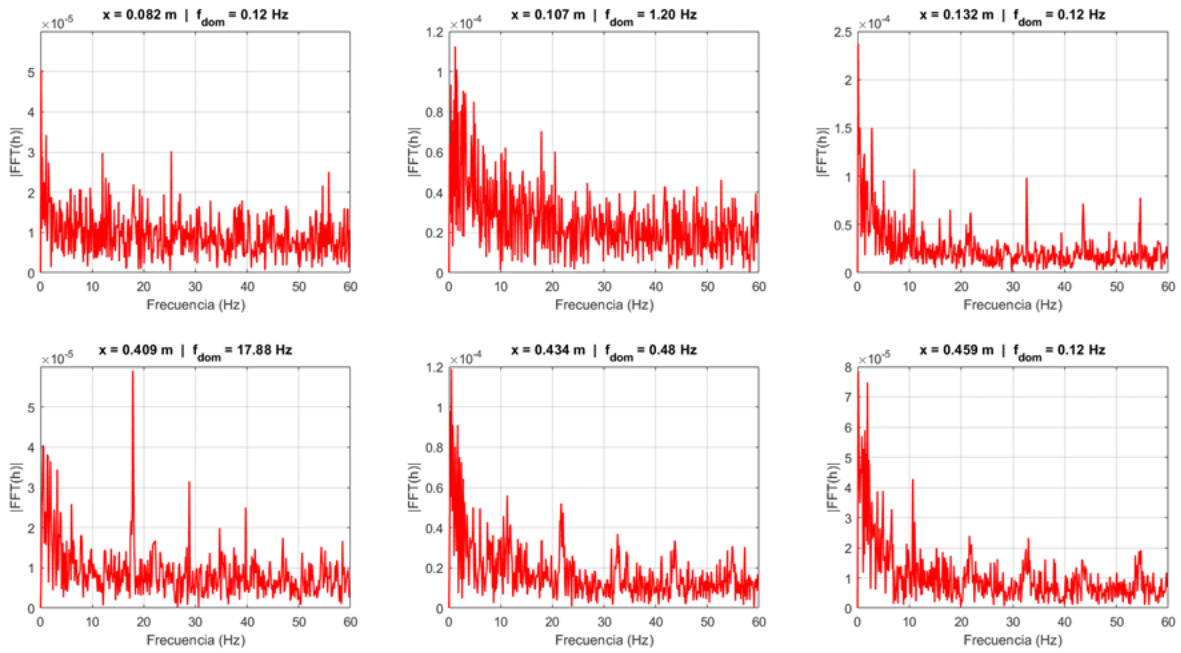


Figura 5. Espectros de amplitud obtenidos mediante FFT temporal en seis puntos fijos del canal, indicando posición x y frecuencia dominante.

Por otra parte, la Figura 6 muestra una la estabilidad del patrón ondulatorio en el tiempo (fotograma o frame), coherente con un régimen subcrítico y con la interacción periódica del flujo sobre los obstáculos. Se evidencia una mayor estabilidad del patrón de ondas aguas arriba y aguas abajo de la grada 8, respecto a la grada 7, lo cual podría estar asociado a irregularidades en la geometría del canal.

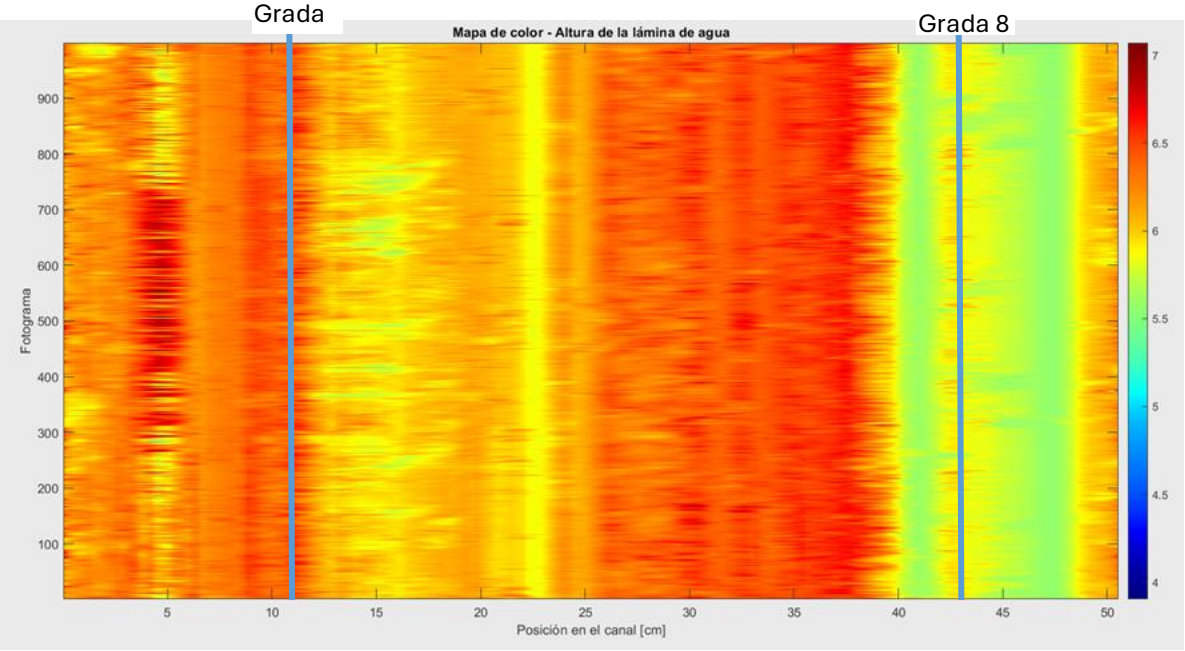
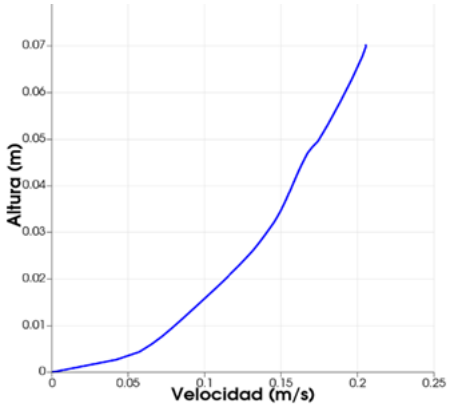


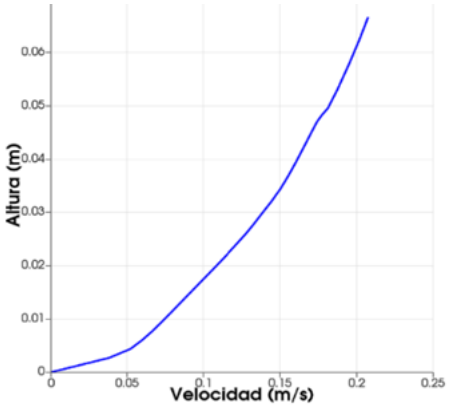
Figura 6. Mapa de calor espacio–temporal de la altura de la lámina de agua a lo largo del canal.

3.3 Resultados modelación numérica

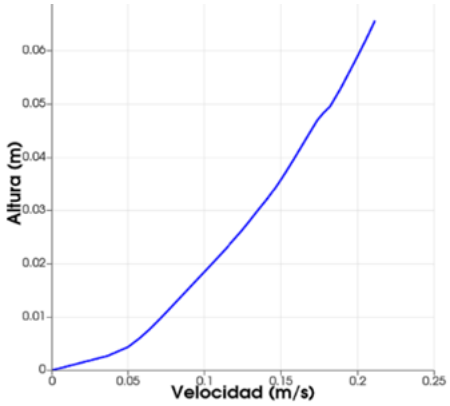
Al no disponer de equipamiento para la medición del campo de velocidad, la evaluación de los resultados numéricos se analizaron con perfiles teóricos de velocidad ($U(z)$). Se analizaron perfiles aguas debajo de la grada 7 en cuatro instantes: $t = 64, 74.55, 85.45\ y\ 96\ s$, elegidos como múltiplos del tiempo característico $t_c = H/U \approx 0.32\ s$. Los perfiles muestran la ley logarítmica cerca de la pared y un crecimiento monótono hacia la superficie (Figura 7). Se estimó mediante el perfil de velocidades, una velocidad media $\overline{U}_{num} \approx 0.146\ m/s$, el cual se aproxima al valor obtenido experimentalmente, el cual es fue $\overline{U}_{exp} = 0.1535$ m/s, es deicr, error relativo < 5 %.



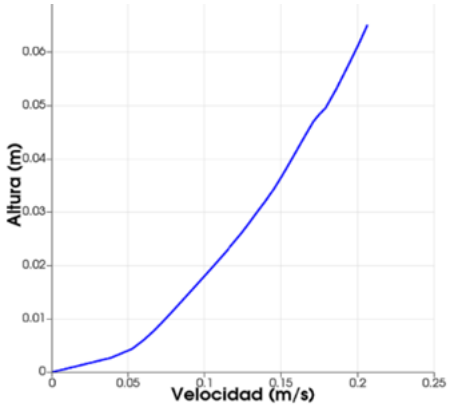
a.) Perfil de velocidad para un tiempo t = 64 s



b.) Perfil de velocidad para un tiempo t = 74.55 s



c.) Perfil de velocidad para un tiempo t = 85.45 s



d.) Perfil de velocidad para un tiempo t = 96 s

Figura 7. Perfiles de velocidad correspondientes a un flujo desarrollado, obtenidos para los tiempos de simulación 64, 74.55, 85.45 y 96 segundos. (Fuente: Elaboración propia).

3.4 Comparación experimento–modelo

La Tabla 4 compara las láminas de agua obtenidas mediante procesamiento de imágenes (h_p), modelación numérica (h_{num}) y medición manual (h_{exp}) en seis posiciones a lo largo del canal. El error del procesamiento de imágenes (E_p) se define como el error relativo entre h_p y h_{exp}, mientras que el error del modelo numérico (E_{num}) corresponde al error relativo entre h_{num} y h_{exp}. Se obtuvo un E_p máximo de 13.63% y un E_{num} máximo de 6.66%; estos valores se consideran

aceptables para los fines de este estudio, dada la limitada instrumentación disponible en el canal de laboratorio.

Tabla 4. Comparativa entre procesamiento de imágenes, modelo numérico y valores experimentales.

Posición [m]	h_p [m]	h_{num} [m]	h_{exp} [m]	E_p [%]	E_{num} [%]
0.077	0.063	0.067	0.066	4.54	1.52
0.107	0.064	0.064	0.06	6.66	6.66
0.137	0.060	0.061	0.059	1.69	3.39
0.404	0.057	0.065	0.066	13.63	1.52
0.434	0.058	0.062	0.06	3.33	3.33
0.464	0.056	0.057	0.058	3.45	1.73

4. CONCLUSIONES

El enfoque experimental permitió estimar la lámina de agua mediante procesamiento de imágenes y caracterizar los patrones ondulatorios del flujo. El error relativo del método de imágenes (E_p), donde $E_p = \frac{|h_p - h_{exp}|}{h_{exp}} * 100\%$, fue < 14 %**.** Se observó mayor estabilidad en los patrones de onda en la posición asociada a la grada 8**,** mientras que en las cercanías de la grada 7 se registraron fluctuaciones de mayor amplitud de la lámina de agua. A partir de las series experimentales se estimó la velocidad media $U_{exp} = 0.154$ m/s. Sin embargo, por limitaciones instrumentales**,** no fue posible obtener el perfil de velocidades**,** por lo que la validación se restringe a variables integradas.

El análisis espectral de la superficie libre evidenció una frecuencia dominante de $f \approx 0.12\ Hz$f, indicativa de oscilaciones estables en el montaje. Con base en los parámetros hidráulicos estimados, el flujo fue turbulento y el escurrimiento se mantuvo en régimen subcrítico ($Fr < 1$). Se observó un desfase espacial entre la posición del obstáculo y la máxima profundidad de la lámina de agua, coherente con la respuesta hidráulica de escurrimientos subcríticos sobre topografía rugosa.

El enfoque numérico (OpenFOAM v13, interFoam, turbulencia $k - \omega k\ SST$) permitió estimar la lámina de agua, la velocidad media y el perfil de velocidades. La velocidad media numérica fue $\overline{U}_{num} = 0.146\ m/s$. En comparación con la medición experimental $\overline{U}_{exp} = 0.154\ m/s$, el error relativo de la velocidad, E_u

$$E_u = \frac{\overline{U}_{num} - \overline{U}_{exp}}{\overline{U}_{exp}} * 100\%$$

fue 4.9 %. Las diferencias pueden atribuirse a la incertidumbre del aforo de caudal**,** a la calibración px→m empleada en el procesamiento de imágenes y a la falta de medición del perfil de velocidades (p. ej., ADV/PIV), lo que restringe la validación a variables integradas (lámina de agua y velocidad media $\overline{U}$) y limita la comparación detallada con el resultado numérico.

Como trabajo futuro, se propone ampliar el rango de caudales para cuantificar el efecto sobre los patrones de onda de la superficie libre y su frecuencia dominante. Además, se propone medir perfiles de velocidad con PIV (o, de ser posible, con un velocímetro) a fin de validar campos de velocidad y esfuerzos cercanos a pared, fortaleciendo la comparación con el modelo numérico. También se propone evaluar numéricamente distintitos tamaños de mallas en la zona cercana a la pared.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de La Frontera y la colaboración de estudiantes en las campañas experimentales.

REFERENCIAS

Abt, S. R., & Ruff, J. F. (1969). Design of roughness elements for energy dissipation in highway drainage chutes (Highway Research Record No. 261, pp. 25–37). Highway Research Board. https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1969/261/261-003.pdf

Biswas, S., & Strawn, R. (1998). Structured vs. unstructured mesh: A comparative study of accuracy and efficiency. Journal of Computational Physics, 145(2), 348–367. https://doi.org/10.1006/jcph.1998.6158

CFD Support. (2022). snappyHexMesh: User guide for OpenFOAM. https://www.cfdsupport.com

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill.

Desa, S., & Salih, Q. (2004). Sustracción de imágenes para la extracción de objetos en movimiento en tiempo real. CGIV 2004, 41–45. https://doi.org/10.1109/CGIV.2004.1323958

Esch, T., & Menter, F. R. (2001). Elements of industrial heat transfer predictions. International Journal of Heat and Mass Transfer, 44(20), 4059–4066. https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00110-7

Farías, J. (2023). Medición de campos de velocidad mediante velocimetría por imágenes de partículas en canal de laboratorio. Revista de la Facultad de Ingeniería. PUCV.

Hindasi, H., & Abushandi, E. (2023). Quantifying flow and velocity distributions in open channels with varied roughness and slopes: A modelling approach. Water Science, 37, 269–275. https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2244783

Keyes, D., Gropp, W., & Smith, B. (2000). Structured and unstructured mesh-based computations. Computing in Science & Engineering, 2(4), 24–32. https://doi.org/10.1109/5992.881217

MATLAB. (2024). MathWorks (R2024a) [Software]. MathWorks, Inc.

Menter, F. R. (1993). Zonal two-equation k–ω turbulence models for aerodynamic flows (AIAA Paper 93-2906). https://doi.org/10.2514/6.1993-2906

Menter, F. R., Kuntz, M., & Langtry, R. (2003). Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 (pp. 625–632).

Neural Concept. (2023). Understanding the Courant number and its role in numerical stability. https://neuralconcept.com/blog/courant-number-numerical-stability

Oke, T. R. (1987). Boundary layer climates (2nd ed.). Routledge.

Pradhan, S., Pradhan, B., & Khatua, K. K. (2025). Experimental investigations and modelling of composite roughness for compound channels. Journal of Hydrology, 651, 132554. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132554

Zhou, L., Zhang, X., & Yu, Y. (2024). Experimental and numerical studies on the wall-roughness effect to particle dynamics in various gas-particle flows. Experimental and Computational Multiphase Flow. https://doi.org/10.1007/s42757-023-0168-8

UNA APROXIMACIÓN HIDRODINÁMICA AL CAFÉ DE ESPECIALIDAD

IVÁN CAMPOS-HERRERA

Programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería,
mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile
ivancampos@ug.uchile.cl
ORCID: 0009-0002-3255-5150

RESUMEN

El café es una de las bebidas más consumidas en el mundo, con una profunda relevancia cultural, social y económica. Su producción y consumo se relacionan con prácticas sostenibles y con el movimiento de comercio justo, mientras que numerosos estudios han documentado los beneficios de un consumo moderado para la salud. Esta versatilidad ha impulsado un amplio interés científico que abarca desde los aspectos sensoriales y de calidad hasta los fundamentos físicos de su preparación.

En este artículo se compila y analiza bibliografía proveniente de dos áreas complementarias: la industria del café de especialidad y la hidrodinámica de percolación en la preparación de espresso. El objetivo es vincular ambos enfoques, promoviendo una comprensión integrada entre la experiencia sensorial del café y los procesos físicos que determinan su extracción. Finalmente, se describen los principales mecanismos hidrodinámicos involucrados en la preparación de un espresso y se presenta un modelo unidimensional (1D) que representa los procesos dominantes durante la extracción.

Palabras claves: Hidrodinámica, café de especialidad, percolación, lavado de sólidos, transporte de masa.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El café es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial. Su consumo moderado no solo es parte de rituales sociales y culturales en diversos países, sino que también se ha asociado a múltiples beneficios para la salud (Ellero, 2019), como una mayor capacidad de concentración y posible reducción del riesgo de enfermedades degenerativas (Gamarra et al, 2022) debido a que el contenido de cafeína tiene el efecto de mejorar el rendimiento físico (Grosso, 2017).

Convivimos diariamente con él y pocas veces nos sentamos a pensar de donde viene, como se produce, como se prepara, aplicando inconscientemente ciertas metodologías y expresiones aprendidas en el aula.

Este documento tiene la función de unir dos mundos que invisiblemente están muy conectados: la industria del café y la hidrodinámica. Este enfoque es muy interesante, pues permite darle una mayor apreciación científica respecto a un producto de consumo rutinario, donde los factores que influyen en la calidad de una taza de café están determinados por fenómenos físicos y químicos (Rao, 2008). Desde el cultivo del grano, donde influyen variables como la temperatura, humedad, altitud y radiación solar, hasta el momento de la extracción de la bebida, donde intervienen procesos como el flujo en medios porosos, la transferencia de masa, la ley de Darcy o la composición química del agua, involucrando a la hidráulica con cada etapa del proceso.

El objetivo de este trabajo es entregar conceptos prácticos sobre el entorno del café y dar una primera aproximación hidrodinámica sobre los principios físicos detrás de la elaboración de un espresso, sobre las investigaciones realizadas respecto a los procesos de percolación y extracción considerando el café como medio poroso.

La estructura de este artículo está organizada para guiar al lector desde los aspectos generales hasta los más técnicos del café y su preparación. Primero se aborda el origen del café, las especies y varietales, destacando cómo factores como clima y altitud afectan la calidad del grano. Luego se examina la importancia del agua, su composición química, dureza, alcalinidad y temperatura, que influyen directamente en la extracción. A continuación, se presentan las notas sensoriales y la apreciación del sabor. Posteriormente se introduce el espresso y los principios físicos de su preparación, incluyendo flujo y transferencia de masa. Finalmente, se discuten los procesos de percolación y extracción, así como un modelo matemático 1D de transporte de masa que permite relacionar la teoría con la práctica de la elaboración de la bebida.

2. EL CAFÉ

2.1 El origen

Como en gran cantidad de temas importantes en la historia de la humanidad, no existe una precisión exacta sobre cuál es el origen del café. El común denominador de todos los estudios concuerda en el continente africano, cercano al siglo X en la provincia de Kaffa, Abisinia, en el sudoeste de lo que hoy conocemos como Etiopía (Artusi, 2019).

Con el pasar de los años, y causado por el movimiento de la civilización humana, el árbol de café comenzó a propagarse y crecer en zonas montañosas bajas, con suelos aptos para su crecimiento sobre un clima templado, fresco y lluvioso. Esta zona queda delimitada entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, zonas donde los climas montañosos albergan temperaturas relativamente constantes en los 20 °C durante todo el año, lluviosos y con luz solar moderada (Artusi, 2019).



Figura 1. Cinturón del café. Fuente: Manual del café (Artusi, 2019)

2.2 El cafeto

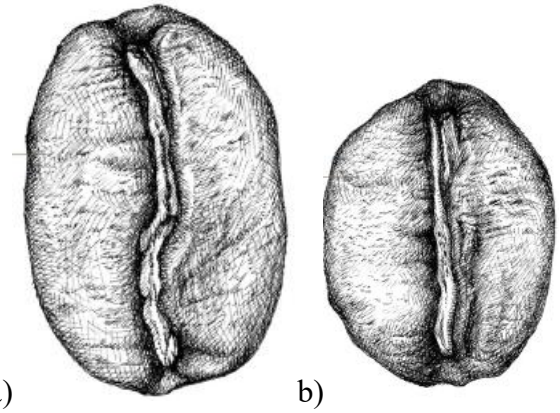
Se le conoce a la planta productora de café. Los granos de cafeto están contenidos en el fruto del arbusto, las cuales toman un color rojizo en estado de madurez. A este último se le conoce como cereza (Sánchez, 2005).

El cafeto se adapta al entorno, lo que genera que tome características particulares de la zona, influenciado por la altitud donde se encuentra plantado, la humedad, la temperatura y la exposición solar. Algunos ejemplos de países productores son: en África y Medio Oriente, Kenia y Tanzania; en Asía, India e Indonesia; en Sudamérica y Caribe, Colombia, Brasil, Perú, El Salvador; entre muchos otros ubicados en el interior de los trópicos.

2.3 Especies del café

Existen dos especies que son las más importantes, llevándose casi la totalidad del consumo de café mundial: la especie arábica y la especie robusta.

Alrededor del 80 % del consumo mundial procede de la arábica, la cual es de mayor calidad: sabores y aromas elegantes, mejor desarrollo de tonalidades ácidas. Por su parte, la especie robusta toma un rol importante en la producción debido a que presenta una mayor resistencia a las plagas en periodo de cultivo, puede ser cosechada a menor altura y presenta en promedio mayor cantidad de cafeína. Esto es muy apreciado en producción de alto volumen, como es el mercado del café soluble, más conocido como instantáneo. Ambos grupos conviven cumpliendo y abarcando mercados diferentes (Artusi, 2018).



a) b)

Figura 2. Granos de café. a) Especie arábica, b) especie robusta. Fuente: Manual del café (Artusi, 2019).

Los varietales de café Arabica se dividen en dos grupos: los tradicionales, originados por selección natural, y los desarrollados, obtenidos mediante cruzamientos o mejoramiento genético. Entre los primeros destacan Typica, Bourbon, Heirloom y Geisha, conocidos por su complejidad y calidad en taza. Los segundos incluyen Caturra, Catuai y Garnica, valorados por su adaptabilidad, productividad y buen perfil sensorial (World Coffee Research, 2017).

3. EL AGUA

Después de la semilla, el agua es el componente más importante en la elaboración de la bebida de café. El agua natural es una solución compleja que contiene una amplia variedad de iones disueltos que determinan su comportamiento químico. Entre los parámetros más importantes para cuantificar la calidad química se encuentra la dureza y la alcalinidad.

La dureza se refiere a la concentración de cationes, principalmente (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) equivalente a la dureza total, expresado en unidades de [mg/L de $CaCO_3$] o ppm. Por otra parte, la alcalinidad es una medida de la capacidad del agua para neutralizar un ácido fuerte, es decir, la capacidad que para resistir cambios de pH. En aguas naturales se atribuye principalmente a aniones de bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) e hidróxido (OH^-), expresado en unidades de [mg/L de $CaCO_3$] o ppm.

En el consumo común, no mantenemos un equipo de laboratorio para medir la calidad de agua cada vez que nos disponemos a consumir. Es por esto que, a partir de un estudio realizado en por el departamento de Geología de la Universidad de Chile, se estudia la composición química del agua utilizada para consumo en Chile, clasificando según la dureza y pH (Bonatici, 2017).

Tabla 1. Resultados de pH y Dureza. Fuente: (Bonatici, 2017; Tablas 4.2 y 4.4)

Muestra	pH	Dureza [ppm $CaCO_3$]
Andes Mountain	7,438	11,0
Cachantun	7,713	335,7
Jahuel	8,298	285,5
Jumbo	7,270	277,7
Porvenir	7,472	151,8
Puyehue	7,365	11,3
Tottus	9,306	3,5
Vital	8,052	62,8
Benedictino	8,147	0,6
Nestlé	5,718	88,2

El estándar de la SCA considera que el agua óptima para la preparación de café debe considerar las siguientes características: fresca a 17 ± 3°C, sin olor, libre de cloro, con una dureza cálcica entre 50-175 [ppm de $CaCO_3$], alcalinidad entre 40 y 70 [ppm de $CaCO_3$] y un pH entre 6-8. (SCA, 2022)

Sobre la temperatura, el agua no debe llegar al punto de la ebullición. A altas temperaturas, el agua disuelve los solubles sólidos presentes en el café molido y extrae los componentes que brindan todos sus sabores y aromas. Pero si el agua hierve, quema el café y adultera su composición química. Por lo general, las distintas preparaciones consideran una temperatura ideal entre los 91 y 96 °C. Si se sobrepasa la temperatura, realza tonos amargos; si está por debajo, no alcanza a extraer todos los sabores (Artusa, 2019).

4. CAFÉ DE ESPECIALIDAD

Es aquel café en el cual quien consume logra reconocer características muy particulares propias del cuidadoso proceso de elaboración. Es café de alta calidad distinguido por su selecta metodología de recolección, tueste y preparación. Según la Specialty Coffee Association (SCA), para ser considerado café de especialidad, el grano debe tener una puntuación superior a 80 sobre 100 según un sistema de calificación elaborado, el cual considera variables como aroma, sabor, acidez, cuerpo y pureza de defectos (Castro et al., 2004).

4.1 Las Notas

El café de especialidad adquiere valor debido a que en él podemos encontrar sabores y aromas distintivos según el cuidado del origen. Con este fin, se realizó una metodología que permite a los productores y catadores interpretar estas variables mediante análisis sensoriales, logrando etiquetar la esencia del grano: la evaluación descriptiva. Este perfil descriptivo permite determinar si el café se ajusta al perfil requerido según la producción y descubrir atributos propios de la cosecha para así mostrar las notas de un café a los consumidores.

La evaluación sensorial utilizada en el SCA combina calificaciones de intensidad y descripciones check-all-that- apply (CATA, por sus siglas en inglés), que permite seleccionar las características que correspondan según la escala de sabores para catadores de café. En lugar de cuantificar atributos sensoriales específicos (como chocolate o afrutado), se califica la intensidad total de cada sección de cata, es decir, la intensidad total de la fragancia, resultando en las notas que vemos en las etiquetas del café consumido (SCA, 2024; ver Anexo 1).

Una etiqueta típica de café de especialidad corresponde a la Tabla 2, donde es posible apreciar el nivel de tueste, varietal, notas, proceso de fermentación y fecha de tueste.

Tabla 2. Esquematización tipo de una etiqueta de café de especialidad.

CAFÉ TOSTADO			
Molido		Grano	X
Tueste Medio	X	Tueste Oscuro	
Arábica		**Proceso**	
Variedad: Caturra		Lavado	X
Perfil: Ciruela - Manzana Chocolate		Honey	
		Natural	
Fecha de tueste:			

5. EL ESPRESSO

El espresso, nacido en Italia a fines del siglo XIX, para los más puristas es la forma definitiva del consumo de café. Se presenta como una bebida con carácter, cuerpo, textura y crema impregnada de aceites. Se desarrolla sobre una molienda fina: 180-380 micrones o 0.18-0.38 [mm] de tamiz.

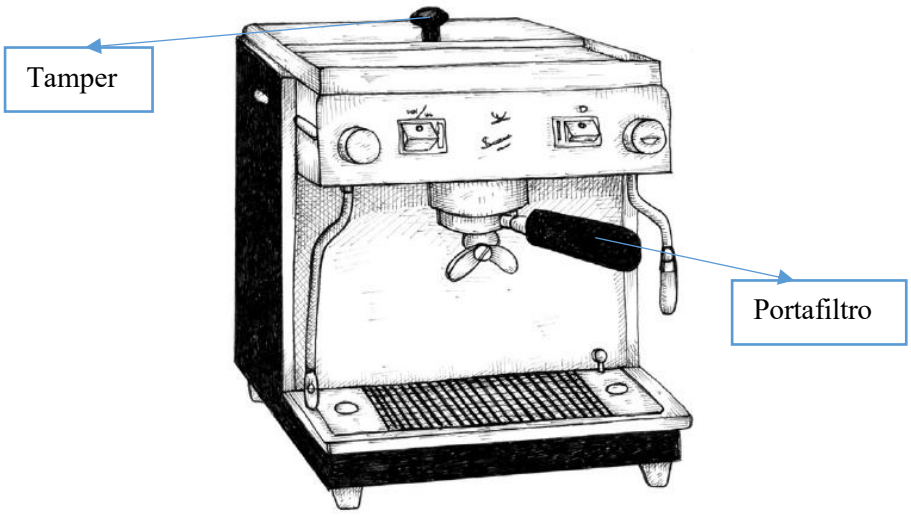


Figura 3. Máquina de espresso. Fuente: Manual del café (Artusi, 2019)

La máquina de espresso, la más elegante para preparar la bebida, requiere de una inversión mayor en equipamiento para un correcto resultado: un portafiltro para la disposición del grano molido, un tamper (pistón) para compactarlo (Figura 3) y una ejecución sobre los 9 bares de presión (estandarizado) para la descarga de agua.

El ratio base para la preparación suele ser 1:2 (1 gramo de café, 2 de producto), en un tiempo de preparación desde que comienza la extracción entre 20-30 segundos. El tamaño de molienda se ajusta para la obtención de la bebida cumpliendo estas dos condiciones (Artusi, 2019).

6. PERCOLACIÓN Y EXTRACCIÓN

Los modelos desarrollados para describir la percolación del espresso no son exhaustivos, pero han demostrado su validez al predecir con éxito los resultados de experimentos (Rao, 2008). Los procesos de percolación y extracción pueden presentarse en las siguientes 3 fases.

Fase 1: humectación. El agua llena el espacio superior de la cámara de extracción, expulsando los gases y humedeciendo el contenido. Los sólidos absorben agua provocando la expansión de las partículas y la disminución de la porosidad de la cama de café. A medida que el agua fluye por el lecho, erosiona los sólidos, los transporta y deposita en la parte inferior. (Fond, 1995; Petracco, 2005)

El lecho de café es extremadamente vulnerable a la formación de canales durante la fase de humectación. La falta de cohesión de las partículas secas, la reorganización del lecho de café debido a la migración de finos, el hinchamiento de las partículas, las altas tasas de eliminación de sólidos y, en algunas máquinas, un aumento brusco de la presión durante esta fase, aumentan la probabilidad de formación de canales (Rao, 2008).

Fase 2: aumento de presión. Comienza luego de la inyección de agua proveniente de la máquina a una presión dada (comúnmente 9 bares). Un gradiente de presión hace que el agua fluya desde la zona de alta presión sobre el lecho de café hasta la zona de baja presión en la salida del filtro.

Según la Ley de Darcy, a medida que aumenta la presión de descarga aplicada, aumenta el flujo de agua a través del lecho de café. Sin embargo, la evidencia empírica (Petracco, 1993) aparentemente contradice la Ley de Darcy de dos maneras:

- A medida que aumentaba la presión durante la extracción, el caudal aumentaba inicialmente, luego alcanzaba un máximo y luego disminuía, estabilizándose asintóticamente hasta alcanzar un caudal casi constante (Figura 4).

- En una muestra de varios cafés extraídos con distintas presiones aplicadas, los cafés extraídos con mayor presión presentaban caudales mayores, pero solo hasta cierta presión (entre 9 y 12 [bar]).

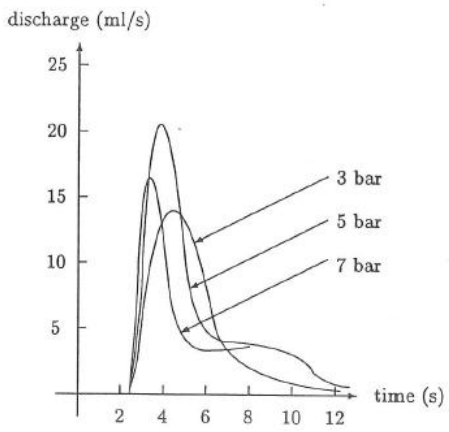


Figura 4. Evolución del caudal durante la percolación del espresso para distintas presiones. Fuente: The espresso coffee problem (Fasano, 2000)

Entre las razones que justifican este comportamiento está la hinchazón de las partículas durante esta fase debido a la humectación del café seco restante, disminuyendo la porosidad del lecho y aumentando la resistencia hidráulica. Además, el aumento de la presión provoca que el café se compacte y favorece el desplazamiento de las partículas del lecho de café, generando una compactación gradual del lecho de café. (Fond, 1995; Rao, 2008)

Fase 3: extracción. Existen investigaciones dispares respecto a los fenómenos detrás de la etapa de extracción sobre la dominancia física entre el lavado de finos y la difusión de partículas. (Zanoni et al., 1992) concluyó que el mecanismo principal es el lavado de sólidos de las superficies externas de la partícula de café. Otro trabajo sobre los mismos determinó que entre el 85%-95% de la extracción ocurrida en el primer minuto se debe a difusión interna (Spiro, 1993). Para que esto ocurra, las partículas de café se deben encontrar saturadas y libre de CO_2.

A pesar de esto, el tiempo de extracción de un espresso rodea los 20-30 [s], lo cual es un tiempo corto para que se cumplan las condiciones de escala de difusión, con varios órdenes de magnitud separados de la escala de turbulencia/lavado (Rao, 2008).

La esquematización de los procesos descritos se presenta en la Figura 5.

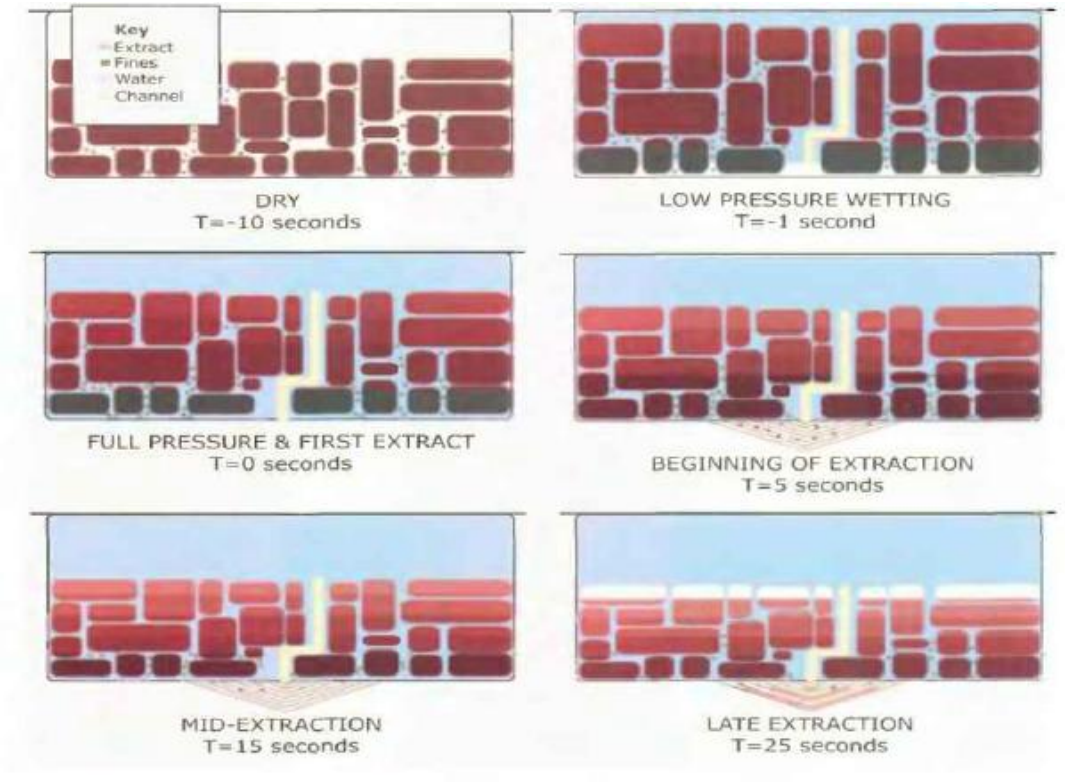


Figura 5. Dinámica de percolación y extracción de un espresso. Fuente: (Rao, 2008)

7. ASPECTOS HIDRODRINÁMICOS EN LA PREPARACIÓN DE UN ESPRESSO

La modelación matemática asociada a la preparación de un espresso es compleja ya que debe representar un proceso de flujo reactivo en un medio poroso deformable. La fase líquida, agua caliente a presión atraviesa el lecho o medio poroso (fase sólida) formado por las partículas de café, el que tiene una porosidad e y permeabilidad K, las que varían en el espacio y en el tiempo debido a la compactación, hinchamiento o migración de finos (Fadai et al., 2019; Fasano, 2000; Giacomini et al., 2020; Oliveros et al., 2017). Complica el análisis la incorporación en el modelo de compuestos solubles (ácidos, azúcares, lípidos emulsionados, aromáticos) que se disuelven y son transportados por la fase líquida (Beverly et al., 2019; Ellero y Navarini, 2019; Giacomini et al., 2020), así como si se incluye la distribución de temperatura debido al agua caliente, el intercambio térmico con el café, con el portafiltro y cabezal de la máquina (Fadai et al., 2019; Giacomini et al., 2020; Oliveros et al., 2017).

Dependiendo del nivel de detalle, la modelación puede hacerse básicamente a tres escalas:

- Escala macroscópica, en la que el problema se aborda como un flujo en un medio poroso (Fasano, 2000; Giacomini et al., 2020; Oliveros et al., 2017)
- Escala de grano/partícula, en la que se considera la difusión interna de masa y calor y la liberación de solutos y aromas dentro del grano (Beverly et al., 2019; Fadai et al., 2019)
- Escala mesoscópica (escala de poros), en la que se resuelve el flujo y procesos de transferencia entre partículas (Ellero y Navarini, 2019)

7.1 Ecuaciones generales que rigen el fenómeno

El proceso de preparación de un café espresso está gobernado por las ecuaciones de conservación y transporte clásicas de la mecánica de fluidos. En general, y sin entrar en mayores detalles, ellas son:

7.1.1 Ecuación de continuidad de la fase líquida

Ecuación de continuidad de la masa de agua en un medio poroso:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon S_w \rho_w) + \nabla \cdot \left(\rho_w \vec{V}_w\right) = 0 \qquad (1)$$

donde ε es la porosidad y S_w la saturación de agua ($0 \leq S_w \leq 1$), en general ambos función de la posición $\vec{x}$ y el tiempo t; ρ_w es la densidad del agua, usualmente considerada como constante, aunque es función de la presión y la temperatura. $\vec{V}_w$ es el vector velocidad del agua.

7.1.2 Ecuación del movimiento de la fase líquida

Para el flujo en medio poroso, la ecuación de momentum más simple es considerar régimen laminar y válida la ley de Darcy:

$$\vec{V}_w = -\frac{K}{\mu_w}(\nabla p_w - \rho_w \vec{g}) \qquad (2)$$

donde K es la permeabilidad, en general función de $\vec{x}$ y t, μ_w la viscosidad del agua, dependiente de la temperatura, p_w la presión local del agua y $\vec{g}$ el vector aceleración de gravedad. Si la matriz no está saturada se utiliza la ecuación de Richards, que en términos de la presión se escribe como

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla p_w) + \nabla \cdot (k \rho_w g \nabla z) \qquad (3)$$

siendo k la conductividad hidráulica no saturada, dependiente de la presión, y z la coordenada vertical (positiva hacia arriba).

Los supuestos habituales que se hacen para simplificar la modelación son considerar flujo laminar ya que los números de Reynolds típicamente son bajos a escala de poros, medio granular inicialmente compacto con porosidad uniforme (igual a un valor constante ε_0) o estratificado. La porosidad cambia en el tiempo por migración o depositación de finos (Fasano y Talamucci, 2000) o por hinchamiento o colapso de la matriz sólida (Fadai et al., 2019; Oliveros et al., 2017). Además, se considera que la densidad del agua es constante y que la temperatura no varía demasiado en intervalos pequeños. Respecto a la viscosidad, algunos modelos la consideran constante o dependiente de la temperatura si se acopla a la ecuación de la energía.

7.1.3 Transporte de solutos: conservación de masa de las especies

La concentración c_i en la fase líquida de la especie i en el medio poroso está dado por la ecuación de conservación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon S_w c_i) + \nabla \cdot (\rho_w c_i) - \nabla \cdot (\varepsilon S_w \mathbb{D}_i^* \nabla c_i) = R_i^{diss} + R_i^{int} \tag{4}$$

donde $\mathbb{D}_i^*$ es el tensor de dispersión hidrodinámica efectiva del soluto i, que combina difusión molecular y dispersión por el flujo, R_i^{diss} es un término fuente debido a la disolución desde la fase sólida (superficie y/o interior del grano) y R_i^{int} corresponde a otros términos de reacción o transformación tales como oxidación, degradación térmica, etc., los que usualmente son despreciados en modelos primarios de espresso.

Según Beverly et al. (2019), el término fuente R_i^{diss} puede modelarse como

$$R_i^{diss} = k_{m,i} a_s \left(c_{i,sat} - c_i\right) \tag{5}$$

siendo $k_{m,i}$ el coeficiente de transferencia de masa, a_s el área de la superficie específica de los sólidos en contacto con el fluido, función de la posición $\vec{x}$ y el tiempo t, $c_{i,sat}$ es la concentración de saturación del soluto en el líquido, la que es función de la temperatura y la presión.

La concentración de soluto disuelto dentro de una partícula de café C_i^{int} obedece la ecuación de difusión de Fick.

$$\frac{\partial C_i^{int}}{\partial t} = \nabla \cdot \left(D_{i,eff} \nabla C_i^{int}\right) - R_i^{reac} \tag{6}$$

donde $D_{i,eff}$ es la difusividad efectiva (que puede ser función de la temperatura) y R_i^{reac} es el consumo interno por reacción química, usualmente despreciable para los tiempos de extracción de espresso.

Usualmente se considera las partículas de café como esferas o cilindros equivalentes, que las propiedades internas del grano de café son homogéneas y que el equilibrio entre la fase sólida y líquida en el interior sucede muy rápidamente.

Considerando una coordenada radial r, la condición de borde para la ecuación anterior es

$$-D_{i,eff}\left.\frac{\partial C_i^{int}}{\partial t}\right|_{r=R_p} = k_{m,i}\left(C_i^{int}\big|_{r=R_p} - c_i\right) \tag{7}$$

donde R_p es el radio de la partícula de café.

En el modelo mesoscópico de Elero y Navarini (2019) la fase líquida se describe mediante la ecuación de Navier-Stokes y los solutos se tratan como una fase dispersa continua la que se modela por una ecuación de advección-difusión:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \vec{V}\cdot\nabla c_i = \nabla\cdot(D_i\nabla c_i) + S_i \tag{8}$$

siendo $\vec{V}$ la velocidad local del fluido, D_i la difusividad molecular o turbulenta efectiva S_i un término fuente por liberación del soluto desde la superficie del café (análogo a R_i^{diss}).

7.1.4 Ecuación de conservación de la energía (transferencia de calor)

En la modelación a nivel macroscópico, la energía se modela considerando una temperatura efectiva T (que varía con $\vec{x}$ y t) para el medio granular. Si se desea una mejor modelación, se debe considerar temperaturas distintas para las fases sólidas y líquidas. A nivel macroscópico la ecuación de energía para un medio poroso saturado está dado por:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\varepsilon S_w\rho_w c_{p,w}T + (1-\varepsilon)\rho_s c_{p,s}T\right) + \nabla\cdot\left(\rho_w c_{p,w}\vec{V}_w T\right) - \nabla\cdot\left(\mathbb{L}_{eff}\nabla T\right) = Q_{reac} + Q_{ext} \tag{9}$$

donde $c_{p,w}$ es el calor específico del agua, ρ_s y $c_{p,s}$ son la densidad y calor específico del café, respectivamente. $\mathbb{L}_{eff}$ es el tensor de conductividad térmica efectiva. Q_{reac} es un término fuente por procesos exotérmicos o endotérmicos (este término es importante en tueste de café y menos importante en el proceso de extracción). Q_{ext} es el término que considera el intercambio de calor con las paredes metálicas del portafiltro, del ambiente, etc.

En el modelo macroscópico, la ecuación de energía anterior usualmente se acopla con la ecuación de Darcy.

En muchos modelos de espresso, se fija una temperatura de entrada casi constante y se considera que la variación de ella dentro del medio poroso es moderada, permitiendo de esta manera un desacople parcial de las ecuaciones. En la modelación del tueste del café, la ecuación de energía debe resolverse con mayor precisión porque las reacciones son fuertemente endotérmicas y el campo de temperatura condiciona el perfil del tueste (Fadai et al., 2019; Oliveros et al., 2017).

En la modelación a nivel mesoscópico se debe resolver las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes, incluyendo las fuerzas de interacción del agua con partículas sólidas y finas, $\vec{f}_{int}$:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{10}$$

$$\rho_w \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\nabla p + \mu_w \nabla^2 \vec{V} + \rho_w \vec{g} + \vec{f}_{int} \tag{11}$$

7.1.5 Evolución de la microestructura: porosidad, finos y deformación

La evolución de la microestructura requiere incorporar una relación para la tasa de deformación de la porosidad la que, en general, es del tipo

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = f_\varepsilon \left(\vec{x}, t; c_i, T, S_w, \vec{V}_w \right) \tag{12}$$

La función f_ε es tal que toma en cuenta la depositación de las partículas finas en zonas de bajo flujo, desprendimiento de material sólido por erosión, hinchamiento y contracción de la matriz granular por variaciones de temperatura y humedad, etc.

La relación entre permeabilidad y porosidad se cierra mediante correlaciones tipo Kozeny-Carman:

$$K = \frac{\varepsilon^3}{B(1-\varepsilon)^2} d_p^2 \tag{13}$$

Siendo B una constante y d_p el diámetro de la partícula de café.

7.2 Modelo simplificado 1D

A continuación, se presentará un modelo unidimensional con algunas simplificaciones adicionales que facilitan entender (y modelar) el proceso de preparación de un espresso. Para ellos se hace las siguientes consideraciones:

- Flujo axisimétrico vertical en una matriz porosa de altura H. El domino de flujo está dado por $0 \leq z \leq H$, siendo $z = 0$ la entrada del flujo y $z = H$ la salida.
- Matriz de café porosa saturada ($S_w = 1$) y porosidad ε constante
- Fluido incompresible
- Flujo laminar
- Caudal superficial de Darcy constante (impuesto por la máquina), lo que define una velocidad V_0.
- Solo una especie soluble $c(z, t)$
- Propiedades físicas constantes

Bajo los supuestos anteriores, las ecuaciones que resuelven el problema se reducen a:

- *Ecuación de continuidad*

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_w V_w) = 0 \;\; \rightarrow \;\; V_w = V_0 \tag{14}$$

- *Ecuación del flujo (Darcy)*

$$V_0 = -\frac{K}{\mu_w}\frac{\partial p}{\partial z} \tag{15}$$

de donde resulta

$$p(0,t) - p(H,t) = \frac{\mu_w}{K} V_0 H \tag{15}$$

- *Transporte 1D de soluto*

Considerando la porosidad y la difusividad efectiva constantes, la ecuación para el balance de masa del soluto queda:

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} + V_0 \frac{\partial c}{\partial z} - \varepsilon D_{eff} \frac{\partial^2}{\partial z^2} = R^{diss} \tag{16}$$

El término asociado a la disolución se determina como

$$R^{diss} = k_a \left(c_{eq} - c\right) \tag{17}$$

donde c_{eq} es la concentración de equilibrio y k_a es el coeficiente global de transferencia, el que incluye la masa interfacial y la difusión interna.

- *Ecuación 1D de energía*

$$\left(\rho c_p\right)\Big|_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w c_{p,w} V_0 \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t}\left(L_{eff} \frac{\partial T}{\partial t}\right) = 0 \tag{18}$$

Evidentemente, si el modelo se simplifica considerando una temperatura constante en la matriz granular, la ecuación de la energía no es necesaria.

- *Condiciones de borde e inicial*

Condición de entrada ($z = 0, \forall t$):

$$c(0,t) = 0 \; ; \; T(0,t) = T_{ent} \tag{19}$$

Condición de salida ($z = H, \forall t$):

$$\frac{\partial c}{\partial z}\Big|_{z=H} = 0 \;\; ; \;\; \frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=H} = 0 \tag{20}$$

Condición inicial ($t = 0\ , 0 \leq z \leq H$):

$$c(z,0) = 0\ ;\ T(z,0) = T_0 \tag{21}$$

7.3 Esquema numérico para la solución del modelo simplificado 1D

7.3.1 Malla espacio-tiempo

El dominio espacial $[0, H]$ se divide en N intervalos de largo $\Delta z = H/N$ de tal manera que las ubicaciones espaciales de los puntos de la malla están definidas por:

$$z_j = j\Delta z\ ,\quad j = 0, 1, \ldots, N$$

Considerando un intervalo temporal Δt, los tiempos para los que se realiza el cálculo son:

$$t^n = n\Delta t$$

La concentración en la posición z_j en el tiempo t^n se denota como c_j^n

- *Esquema para la ecuación de transporte de masa*

Para la estabilidad de la solución numérica, se considera un esquema implícito para la difusión y la fuente. Para la advección se considera un esquema *upwind* explícito ya que es simple y robusto. De este modo, la ecuación en diferencias finitas para el transporte de soluto está dada por:

$$\varepsilon\frac{c_j^{n+1} - c_j^n}{\Delta t} + V_0\frac{c_j^n - c_{j-1}^n}{\Delta z} - \varepsilon D_{eff}\frac{c_{j+1}^{n+1} - 2c_j^{n+1} + c_{j-1}^{n+1}}{(\Delta z)^2} = k_a\left(c_{eq} - c_j^{n+1}\right) \tag{22}$$

Reordenando para c_j^{n+1}

$$\left(\varepsilon\frac{1}{\Delta t} + 2\varepsilon\frac{D_{eff}}{(\Delta z)^2} + k_a\right)c_j^{n+1} - \varepsilon\frac{D_{eff}}{(\Delta z)^2}c_{j+1}^{n+1} - \varepsilon\frac{D_{eff}}{(\Delta z)^2}c_{j-1}^{n+1} = \varepsilon\frac{c_j^n}{\Delta t} - V_0\frac{c_j^n - c_{j-1}^n}{\Delta z} + k_a c_{eq} \tag{23}$$

La ecuación anterior da origen a un sistema tridiagonal en $\left\{c_j^{n+1}\right\}$ para cada paso de tiempo.

- *Tratamiento de las condiciones de borde*

En la entrada ($z = 0$) se impone $c_0^{n+1} = 0$ para todo n (condición tipo Dirichlet)

En la salida (z = H) la condición tipo Neumann debe expresarse en términos de diferencias finitas, quedando:

$$\frac{c_N^{n+1} - c_{N-1}^{n+1}}{\Delta z} = 0 \quad \rightarrow \quad c_N^{n+1} = c_{N-1}^{n+1}$$

7.3.2 Bosquejo de la implementación del método

Una idea para proceder en el cálculo se presenta a continuación. Para cada paso $n \to n+1$

i) Fijar las condiciones de borde:

$$c_0^{n+1} = 0 \tag{24}$$

$$c_N^{n+1} = c_{N-1}^{n+1} \tag{25}$$

ii) Resolver para $j = 1, \dots, N-1$ la ecuación de difusión reordenada.

Definiendo:

$$\alpha = \varepsilon \frac{D_{eff}}{(\Delta z)^2} \quad , \quad \beta = \varepsilon \frac{1}{\Delta t} + 2\varepsilon \frac{D_{eff}}{(\Delta z)^2} + k_a \quad ,$$
$$RHS_j^n = \varepsilon \frac{c_j^n}{\Delta t} - V_0 \frac{c_j^n - c_{j-1}^n}{\Delta z} + k_a c_{eq} \tag{26}$$

debe resolverse el siguiente sistema lineal tridiagonal de $N-1$ ecuaciones con $N-1$ incógnitas:

$$\begin{pmatrix} \beta & -\alpha & 0 & \cdots & 0 \\ -\alpha & \beta & -\alpha & \cdots & 0 \\ 0 & -\alpha & \beta & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -\alpha & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1^{n+1} \\ c_2^{n+1} \\ c_3^{n+1} \\ \vdots \\ c_{N-1}^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RHS_1^n \\ RHS_2^n \\ RHS_3^n \\ \vdots \\ RHS_{N-1}^n \end{pmatrix} \tag{27}$$

Como la matriz es tridiagonal, puede resolverse muy eficientemente mediante el algoritmo de Thomas.

- *Ecuación de energía*

Si se incluye la ecuación de energía, la discretización es idéntica a la de transporte de masa, sin término fuente, sustituyendo c por T y haciendo los siguientes cambios:

$$\varepsilon \to (\rho c_p)\big|_{eff} \quad , \quad V_0 \to \rho_w c_{p,w} V_0 \quad , \quad D_{eff} \to \frac{L_{eff}}{(\rho c_p)\big|_{eff}} \tag{28}$$

con las condiciones de borde $T(0,t) = T_{ent}$ y $\partial T/\partial z|_{z=H} = 0$, además de la condición inicial $T(z,0) = T_0$. La implementación numérica es exactamente análoga a la anterior.

- *Estabilidad y elección de* Δt

Aunque el esquema es implícito en difusión y fuente, hay un término advectivo explícito. Para evitar oscilaciones numéricas fuertes, se debe cumplir la condición de Courant-Friedrichs-Lewy, la que impone un requisito para Δt:

$$\frac{V_0 \Delta t}{\varepsilon \Delta z} \lesssim 1 \tag{29}$$

de donde

$$\Delta t \lesssim \frac{\varepsilon \Delta z}{V_0} \tag{30}$$

Usualmente $\Delta t \lesssim 0{,}5\, \varepsilon \Delta z / V_0$ da buenos resultados.

8. CONCLUSIONES

A partir de los tópicos desarrollados, es posible establecer las siguientes conclusiones.

La preparación del café está directamente vinculada con los parámetros fisicoquímicos del agua y con los fenómenos de percolación y difusión que determinan la extracción de compuestos hacia la bebida final.

En conjunto, los apartados iniciales permiten acercar al lector a los principales conceptos de la industria del café, comprendiendo su origen, las características del cafeto y la diversidad de especies y varietales. Asimismo, facilitan una visión general sobre la relevancia del agua y las particularidades del café de especialidad, estableciendo una base conceptual que permite transitar desde los aspectos sensoriales y productivos hacia una comprensión más técnica de los procesos de extracción y modelación.

La revisión bibliográfica permitió describir los principales mecanismos de percolación presentes durante la elaboración de un espresso, los cuales fueron representados mediante un modelo matemático que simula el transporte de finos hacia la zona de compactación del lecho. Los parámetros considerados en dicho modelo requieren ser calibrados y ajustados experimentalmente. Estas etapas implican un proceso iterativo que demanda el diseño de metodologías adecuadas, la selección de instrumentos de medición apropiados y la validación de resultados en condiciones controladas de extracción.

En relación con los aspectos hidrodinámicos, este trabajo muestra que la preparación de un espresso puede entenderse como un flujo en medio poroso deformable y reactivo, donde el agua caliente a presión atraviesa un lecho granular cuya porosidad y permeabilidad no son necesariamente constantes, sino que pueden variar espacial y temporalmente por compactación, hinchamiento y migración/depositación de finos. Bajo esta mirada, la extracción resulta del acoplamiento entre (i) la ecuación de continuidad y el cierre hidrodinámico (ley de Darcy en régimen laminar, o Richards si existiera no saturación), (ii) el transporte de solutos por advección–dispersión con fuentes de disolución (controladas por transferencia interfacial y difusión interna), y (iii) la transferencia de energía cuando se considera la variación térmica del sistema y el intercambio con el portafiltro y el entorno. Además, se evidencia que parte de la “no idealidad” observada en caudal y presión puede interpretarse como una respuesta hidromecánica del lecho (cambios de porosidad y permeabilidad), lo que justifica incluir relaciones de cierre como Kozeny–Carman y leyes

evolutivas para la microestructura. Finalmente, la formulación 1D presentada permite capturar los mecanismos dominantes de forma simple y computacionalmente eficiente, pues conduce a sistemas lineales tridiagonales resolubles con el algoritmo de Thomas, dejando como proyección natural la extensión a los casos en los que la porosidad y permeabilidad son dependen tanto de la posición espacial como del tiempo, múltiples especies y un acoplamiento térmico más completo para mejorar la capacidad predictiva y la calibración experimental del modelo.

Finalmente, este trabajo busca abrir el interés hacia una línea de investigación emergente que combina la ingeniería hidráulica con la ciencia del café, ofreciendo un punto de encuentro entre el análisis técnico y la apreciación sensorial del espresso.

9. COMENTARIO FINAL

No existe una única forma correcta de preparar café ni un método universalmente superior, así como tampoco una evaluación definitiva. La calidad y preferencia por una bebida están influenciadas por el contexto, la experiencia personal y el significado cultural del acto de preparar y compartir café. Cada taza refleja una cadena de trabajo, dedicación y conocimiento, que merece ser valorada. Este artículo busca fomentar una actitud curiosa y consciente hacia un consumo cotidiano que, muchas veces, damos por sentado.

REFERENCIAS

Artusi, N. (2018). *Manual del café.* Planeta. ISBN (ePub): 978-950-49-6593-0.

Beverly, D., P.J. Fryer, S. Bakalis, E. Lopez-Quiroga, R. Farr (2019) "Mathematical modelling of the steam stripping of aroma from roast and ground coffee", Energy Procedia, 161: 157-164. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.075

Bonatici, G. (2017). *El agua que bebemos.* Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Castro, P., Contreras, Y., Laca, D., & Nakamatsu, K. (2004). *Café de especialidad: Alternativa para el sector cafetalero peruano. ESAN*, (17).

Ellero, M., & Navarini, L. (2019). Mesoscopic modelling and simulation of espresso coffee extraction. Journal of Food Engineering, 263, 181–194. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.038

Fadai, N.T, C.P. Please, R.A. van Gorder (2019) "Modelling structural deformations in a roasting coffee bean", International Journal of Non-Linear Mechanics, 110:123–130. https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2018.12.006

Fasano, A., Talamucci, F., & Petracco, M. (2000). The espresso coffee problem. En A. Fasano (Ed.), *Complex flows in industrial processes* (pp. 241–280). Birkhäuser Boston. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1348-2_8

Fond, O. (1995). Effect of water and coffee acidity on extraction: Dynamics of coffee bed compaction in espresso type extraction. *16th ASIC Colloquium.*

Gamarra, H., Vera, A., & Gómez, W. (2022). Efectos del consumo de café como bebida estimulante. Revista científica, *1*(1), 6–13. eISSN 2590-759X.

Giacomini, J., Khamitova, G., Maponi, P., Vitorri, S., & Fioretti, L. (2020). Water flow and transport in porous media for in-silico espresso coffee. International Journal of Multiphase Flow, *130*, 103252. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103252

Grosso, G., et al. (2017). Coffee, caffeine, and health outcomes: An umbrella review. Annual Review of Nutrition, *37*, 131–156. https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-071816-064941

Oliveros, N.O., J.A. Hernández, F.Z. Sierra-Espinosa, R. Guardián-Tapia, R. Pliego-Solórzano (2017) "Experimental study of dynamic porosity and its effects on simulation of the coffee beans roasting", Journal of Food Engineering, 199:100-112. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.12.012

Petracco, M., & Liverani, S. (1993). Espresso coffee brewing dynamics: Development of mathematical and computational models. *15th ASIC Colloquium.*

Petracco, M. (2005). Selected chapters. En A. Illy & R. Viani (Eds.), *Espresso coffee: The science of quality.* Elsevier Applied Science.

Rao, S. (2008). *The professional barista's handbook: An expert's guide to preparing espresso, coffee, and tea.* Scott Rao Publications. ISBN 978-1-60530-098-6.

Sánchez Reyes, C. (2003). Cultivo, producción y comercialización del café: Morfología y taxonomía del café. Granja y Negocios.

Spiro, M. (1993). Modelling the aqueous extraction of soluble substances from ground roasted coffee. Journal of the Science of Food and Agriculture, *61*, 371–373.

Specialty Coffee Association (SCA). (2022). *SCA Standard 310-2021: Home Coffee Brewers – Specifications and test methods.* https://sca.coffee/research/coffee-standards

Specialty Coffee Association (SCA). (2024). *SCA Standard 103-2024: Coffee value assessment – Descriptive assessment.*

World Coffee Research (WCR). (2017). *Coffee varieties catalog.* College Station, TX: World Coffee Research. https://varieties.worldcoffeeresearch.org

Zanoni, B., Pagharini, E., & Peri, C. (1992). Modelling the aqueous extraction of soluble substances from ground roasted coffee. Journal of the Science of Food and Agriculture, *58*, 275–279.

ACERCA DEL AUTOR

Iván Campos es Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, con 4 años de experiencia en consultoría y docencia. Pasante de investigación en modelos numéricos bidimensionales en el Instituto Flumen, Universitat Politécnica de Catalunya, Barcelona. Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile (c). Experiencia en estudios de mecánica fluvial, análisis de inundaciones, modelación numérica en 1 y 2 dimensiones.

ANEXO



Anexo 1. Rueda de sabores de cata de café. Léxico sensorial. Fuente: SCA Standar 103-2024.

HIDRO-GRAFÍA

ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

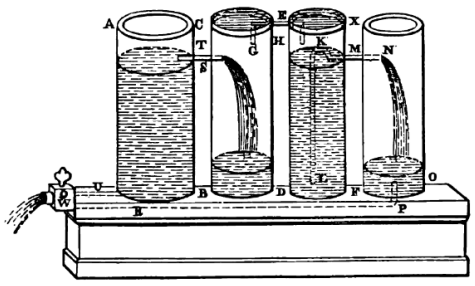


La imagen de la Hidro-Grafía de este número fue tomada de un libro impreso en 1550 y corresponde a:

a) Un sistema de distribución de agua potable de una ciudad alemana
b) Un sistema de distribución y transporte de salmuera en una ciudad alemana
c) El primer sistema de distribución de agua a grifos para combatir incendios, ubicados estratégicamente en la ciudad
d) Un primitivo "ascensor" accionado por el contrapeso del agua (en el barril en el lado izquierdo de la imagen) para ingresar al pique vertical de una mina en Alemania

NÚMERO ANTERIOR

La respuesta correcta de la Hidro-Grafía del número anterior es la d) Un artilugio diseñado para mezclar vino y agua en proporciones constantes[1]. Este artificio lo presenta el ingeniero y matemático griego Herón de Alejandría en su *Neumática* escrita aproximadamente entre el 50 y 70 d.C. La imagen fue tomada de la traducción del griego al inglés hecha en 1851 por Bennet Woodcroft, Profesor de Máquinas en el University College de Londres.



El dispositivo de Herón utiliza el desplazamiento de aire y vasos con áreas equivalentes para dosificar dos líquidos. Un recipiente abierto AB recibe agua. AB está conectado cerca de su base a un recipiente sellado CD mediante el tubo ST. Dado que el área de la base de CD se elige para fijar la proporción deseada (por ejemplo, la mitad del área de AB para una relación agua:vino de 2:1), una fracción fija del agua vertida fluye hacia CD, mientras que el resto permanece en AB. El agua que entra en CD comprime y expulsa un volumen igual de aire atrapado a través del tubo GHK hacia un segundo recipiente sellado EF, que no tiene salida de aire salvo hacia el recipiente del vino. El aire entrante fuerza entonces un volumen equivalente de vino desde EF a través de un sifón curvado LMN hasta un recipiente de entrega OX. Cuando se abre la llave exterior del tubo QW, el agua de AB (a través de U) y el vino de OX (a través de PR) se descargan conjuntamente mezclados en la proporción de las bases de los recipientes.

[1] En la antigua Grecia se acostumbraba a diluir el vino en los banquetes. La idea al beber era animarse y no embriagarse.

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@uchile.cl