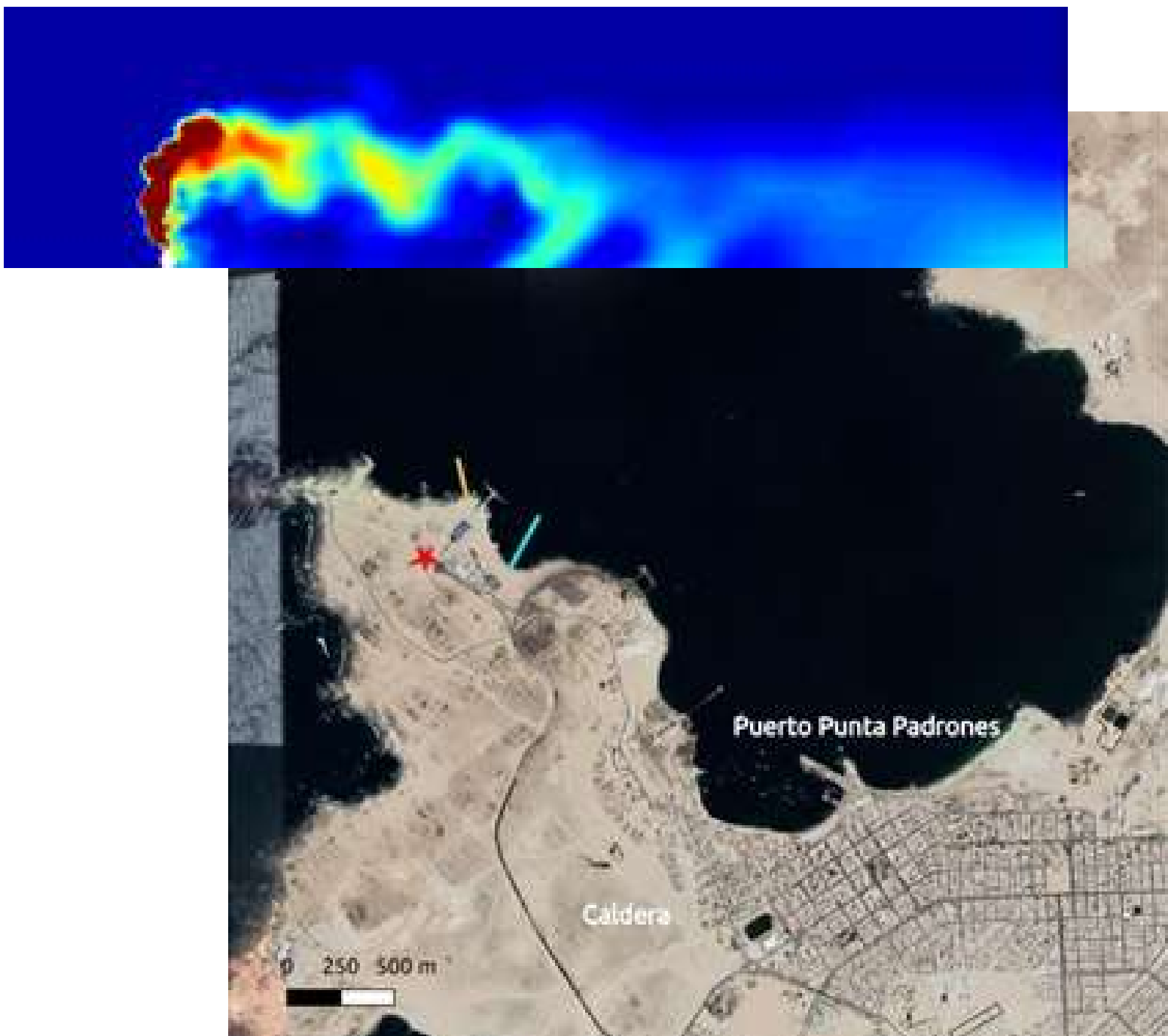




Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica



REVISTA DE LA
SOCIEDAD CHILENA DE
INGENIERÍA HIDRÁULICA

SOCHID

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

Revista de la
Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica

ISS 0716-3746

Volumen 36, Número 2, Diciembre 2021

DIRECTORIO SOCHID

Presidenta: Scarlett Vásquez P.
Vicepresidente: Raúl Demangel C.
Tesorero: Cristián Núñez R.
Directores: Hernán Alcayaga S.
Cristián Escauriaza M.
Aldo Tamburrino T.
Secretario General: Francisco Romero B.

DIRECTORES HONORARIOS

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

EDITOR DE LA REVISTA

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

Imagen portada: Fragmento de figuras del artículo de Muñoz et al. presentado en este número.

REVISTA DE LA SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

ÍNDICE

Editorial	1
Conmemorando los setecientos años de la muerte de Dante Alighieri: Su solución al problema del agua y la tierra	
Aldo Tamburrino Tavantzis	3
Modelación numérica de corrientes salinas inducidas por salmuera de desalinización en la zona costera de una planta desalinizadora en la región de Atacama, Chile	
Daniela Muñoz, Aldo Muñoz, Luis Zamorano, Yarko Niño	15
Avances en la aplicación de modelos aluvionales y principales desafíos	
Alex Garcés, Santiago Montserrat	33
El desastre del glaciar de Gíetro de 1818: Reconstrucción hidráulica de la crecida	
Christophe Ancey, Éric Bardou, Tomás Trehwela	49
Hidro-Grafía	
Aldo Tamburrino Tavantzis	73

EDITORIAL

Sin lugar a duda, para nuestra Sociedad el evento más importante que tuvo lugar el segundo semestre de 2021 fue el XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, el que debido a las restricciones sanitarias impuestas por la pandemia de COVID-19 se realizó en modalidad *online*. Bajo el lema “Medio siglo enseñando que sin agua no hay futuro” el Congreso se desarrolló los días 13, 14 y 15 de octubre. Con él se conmemoraron 50 años de estos eventos bi- anuales que han sido de especial importancia para el desarrollo en el país de la hidráulica y temas afines. La SOCHID se formó el 12 de noviembre de 1970 y una de sus primeras actividades fue la organización del primer Coloquio Nacional de Ingeniería Hidráulica entre el 30 de junio y el 2 de julio de 1971. A partir de 1981 estos Coloquios devinieron en Congresos, denominándose Congreso Nacional de Hidráulica hasta 1989 y desde 1991 Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

En el marco del XXV Congreso se entregaron los premios Francisco Javier Domínguez 2021 y SOCHID 2021. El primero, otorgado como reconocimiento al aporte realizado por un ingeniero o ingeniera en las áreas de interés de la nuestra Sociedad, recayó en el profesor emérito de la Pontificia Universidad Católica de Chile, ingeniero civil Sr. Eduardo Varas, con 50 años de labor en docencia, investigación y profesional. El Premio SOCHID 2021, que se otorga al mejor egresado o egresada en la especialidad de ingeniería hidráulica o afín lo recibió la ingeniera civil y magíster en ciencias de la ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Francisca Aguirre.

Como hidráulicos es importante destacar otro aniversario: Hace 150 años Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant publicó un artículo en *Comptes Rendus Hebdomadaires de l'Académie des Sciences*, en el que presenta las ecuaciones del flujo unidimensional en canales con superficie libre que hoy conocemos como las ecuaciones de Saint-Venant (*Comptes Rendus*, Vol 73, pp. 147-154).

Por último, no podemos dejar de conmemorar los 700 años de la muerte de Dante Alighieri. Quizás para muchos parezca extraño hacerlo en una revista dedicada a la hidráulica, pero como se presenta en uno de los artículos de este número, el autor de la Divina Comedia no solo en los versos de su obra magna se refiere al ciclo hidrológico y la formación de torrentes que desembocan en grandes ríos. También escribió una pequeña obra en la que discute por qué la tierra, siendo más pesada que el agua, no es una esfera concéntrica rodeada por una esfera de agua.

Aldo Tamburrino Tavantzis
Editor

CONMEMORANDO LOS SETECIENTOS AÑOS DE LA MUERTE DE DANTE ALIGHIERI: SU SOLUCIÓN AL PROBLEMA DEL AGUA Y LA TIERRA

ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

Departamento de Ingeniería Civil y Advanced Mining Technology Center
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile
atamburr@ing.uchile.cl

RESUMEN

Como una forma de conmemorar los setecientos años de la muerte del poeta italiano Dante Alighieri, se presenta el único trabajo que él escribió que puede considerarse científico. Considerando los fundamentos de la concepción aristotélica-ptolemaica del universo, Dante abordó la solución de un problema que permanecía abierto en su época: ¿Es la esfera del agua más alta que la de la tierra? Si es así, ¿por qué existe tierra por sobre el agua? Aunque su respuesta es correcta si se considera la lógica aristotélica, tiene una falla fundamental: el modelo físico-cosmológico en la que se basa es falso.

Palabras claves: Dante. Questio de aqua et terra. Esferas celestes.

1. INTRODUCCIÓN

Este año se conmemoran los setecientos años de la muerte del poeta florentino Dante Alighieri (Florencia, 1265 – Rávena, 1321), lo que ha suscitado eventos celebrando su obra en todo el mundo, incluyendo Chile, a través de charlas, conferencias y exposiciones. Sin lugar a duda la mayor atención ha estado dirigida al impacto de su obra máxima, *La Divina Comedia*, una de las obras cumbre de la literatura universal. Escrita en el dialecto florentino de la Toscana italiana, inicialmente la obra se denominó simplemente *La Commedia*, siendo el editor Gabriele Giolito de' Ferrari quien le agregó el calificativo *Divina* en la edición de 1555 (Barceló, 2021, p. 53). Aunque el Papa Francisco emitió la carta apostólica *Candor lucis aeternae* en la que se suma “al numeroso coro de los que quieren honrar su memoria en el VII Centenario de su muerte”, y hace un resumen de las cartas apostólicas escritas por sus predecesores del último siglo para los aniversarios del nacimiento o muerte de Dante (Francisco, 2021), la relación del poeta con la Iglesia no fue fácil, tanto en vida como después de su muerte, como lo atestigua la propuesta del Cardenal Bertrand du Pouget que en 1329 “pretendió quemar los huesos de Dante y esparcir sus cenizas para que no quedara recuerdo del hereje” (Alarcón Benito, 2016, p. 10). Ciertamente, que sea el poeta pagano Virgilio quien guíe al florentino en su viaje por el infierno y purgatorio y su amada Beatriz sea su guía en el paraíso, en lugar de algún santo y la Virgen María (en un acto herético convirtió a

Beatriz en la Virgen María, Barceló, 2021, p. 13) debe haber causado malestar entre algunos miembros de la Iglesia. Sin embargo, la enemistad con ciertos sujetos del clero es anterior a la redacción de *La Commedia* y surgió de su crítica a algunos papas y de su posición política frente a la injerencia de la Iglesia en asuntos públicos, especialmente después de la bula *Unan sanctam* del Papa Bonifacio VIII, en la que indicaba que los gobernantes seculares estaban bajo la autoridad del papado. Dante marcó su posición cuando escribió *De Monarchia* (en latín, entre 1312 y 1313; Borzi, 2017, p. 15), obra que fue condenada a la hoguera en 1329 por el papa Juan XXII (Barceló, 2021, p. 395), fue prohibida por los Dominicos en 1335 y estuvo en el índice de libros prohibidos por la Iglesia entre 1554 y 1881. De este modo, aunque hay partes de *La Commedia* que caían dentro de consideraciones de herejía por los teólogos de comienzos del siglo XIII (como la existencia del limbo, donde permanecen los paganos virtuosos e incluso algunos musulmanes; Grzybowski, 2015, p. 114), la obra era mal vista por algunos religiosos, más por su asociación a otras creaciones de Dante que por ella en sí misma. Una buena síntesis de la actitud de la Iglesia Romana del último siglo y su identificación con La Divina Comedia queda de manifiesto en la carta apostólica de Francisco.



Figura 1. Infierno: El río Aqueronte, Caronte en su barca y la multitud de gente que será pasada “a las tinieblas del calor y el hielo” (Infierno, Canto III, 87). Imagen tomada de la edición ilustrada de 1544 *La Comedia di Dante Alighieri con la nova espositione di Alessandro Vellutello*.

La presencia del agua está presente a través de toda La Divina Comedia, mencionándose también ríos, torrentes, lagos, etc. Entre los cuerpos de agua míticos que se presentan se encuentra el río Aqueronte, de aguas negras y profundas, en el que Caronte en su barca cruza las almas de una ribera a otra en el infierno (Figura 1); el río Flegeton, también en el infierno, por el que fluía sangre hirviendo; la laguna Estigia, donde están inmersos los condenados por la ira y finalmente las aguas del infierno terminan en la laguna Cocito, congelada por el batir de las alas de Lucifer, en la que yacen los traidores. En el purgatorio se encuentran los ríos Eunoé y Leteo, de los que debe beberse sus aguas para poder ascender al paraíso. Sin embargo, probablemente los versos que más atraen a alguien dedicado a la hidráulica son los del Canto V del Purgatorio, en los que Dante describe la condensación del vapor

de agua de la atmósfera para formar una lluvia que dará origen a un flujo que terminará en un poderoso torrente. Los versos se presentan a continuación en el dialecto florentino en que fueron escritos, italiano y castellano (la numeración indica el número del verso en el Canto)

DIALECTO FLORENTINO*	ITALIANO MODERNO*	CASTELLANO
109 Ben sai come ne l'aere si raccoglie 110 quell'umido vapor che in acqua riede, 111 tosto che sale dove 'l freddo il coglie. : :	109 Tu sai bene come si raccoglie nell'aria 110 quel vapore acqueo che si converte in acqua, 111 appena sale nella parte fredda dell'atmosfera. : :	109 Tú sabes bien cómo se acumula en el aire 110 ese vapor acuoso que se convierte en agua, 111 tan pronto como se eleva en la parte fría de la atmósfera. : :
118 sì che 'l pregno aere in acqua si converse;	118 cosicché l'aria satura di vapore si trasformò in acqua;	118 de modo que el aire saturado de vapor se transformó en agua;
119 la pioggia cadde, e a' fossati venne 120 di lei ciò che la terra non sofferse; 121 e come ai rivi grandi si convenne, 122 ver' lo fiume real tanto veloce	119 cadde la pioggia, e conflui nei fossati 120 quella che la terra non poteva assorbire; 121 e quando essa conflui nei torrenti, 122 verso il fiume maggiore si precipitò, tanto velocemente	119 cayó la lluvia, y fluyó en las zanjas 120 lo que la tierra no pudo absorber; 121 y cuando fluía en los arroyos, 122 hacia el río principal se precipitó, tan rápido
123 si ruinò, che nulla la ritenne.	123 che nulla fu in grado di trattenerla.	123 que nada pudo detenerla

*Obtenido de <https://library.weschool.com/lezione/purgatorio-canto-5-testo-parafrasi-pia-de-tolomei-divina-commedia-dante-alighieri-11317.html>

De todas las obras que escribió Dante, hay una que se acerca más a lo que actualmente se califica como científica, pero que sin lugar a duda cae dentro de lo que se entendía por ciencia en la edad media. Básicamente, es la aplicación de la lógica aristotélica en la que, partiendo de algunas premisas se llega a una conclusión. De este modo, la ciencia consistía en la presentación demostrable y sistemática de por qué las cosas se comportan de la manera que ellas lo hacen, y no buscaba descubrir las causas que sustentaban las demostraciones (Demeter et al., 2015). Es así como la teología cae dentro de esta concepción de ciencia, ya que era un conocimiento demostrable, partiendo de los principios o postulados presentados en la Biblia o por los Padres de la Iglesia. Con esta base para el análisis, Dante busca responder un problema clásico de su tiempo: ¿por qué, siendo la tierra más pesada que el agua, ellas no forman dos esferas concéntricas, sino que en algunos puntos la tierra es más alta que la superficie líquida? La respuesta la presenta en su escrito *Quaestio de aqua et terra*, que leyó el 20 de enero de 1320 en la iglesia de Santa Elena en Verona (Borzi, 2017, p. 16), y que se presenta a continuación.

2. LAS BASES DE LA DISCUSIÓN: CONCEPCIÓN ARISTOTÉLICA – PTOLEMAICA DEL UNIVERSO

Antes de presentar la respuesta de Dante al problema, parece necesario establecer algunas ideas de la concepción del mundo vigentes en la época. Antes que nada, y para decepción de los terraplanistas, que la Tierra era esférica era algo sabido y aceptado desde la antigüedad, al menos en los círculos educados, (Eratóstenes ya en el siglo III a.C. había determinado su diámetro).

El redescubrimiento en occidente de la obra de Aristóteles, principalmente a través de escritos de eruditos árabes quienes ya habían traducido prácticamente toda su obra por el año 1000, reformó las ideas científicas de las universidades medievales (Grzybowski, 2015). De este modo, la concepción aristotélica del universo era la aceptada y a partir de ella se entendía el mundo. Dante, como la mayoría de los estudiosos medievales, complementaba la física de Aristóteles con la de Ptolomeo (quien agregó los movimientos de epiciclos y deferentes al movimiento de los planetas), la que incluía la existencia de distintas esferas celestes. Anaximandro (aprox. 610 – 546 a.C.) fue el primero en postular que la tierra estaba en el centro del universo, inmóvil, sin ningún tipo de soporte y todos sus puntos equidistantes a la esfera celeste. Usando el lenguaje actual, al estar la Tierra en el centro del universo y la simetría esférica existente, hay un equilibrio y no domina ninguna fuerza, manteniéndose inmóvil. Según Aristóteles este universo con la Tierra en su centro tenía un límite externo dado por la esfera de las estrellas fijas (estrellas que no tienen un cambio relativo de sus posiciones en la esfera). El espacio entre la Tierra y las estrellas fijas era dividido por la esfera de la Luna en un mundo sublunar y otro supralunar. Los cuerpos que componen el mundo sublunar están hechos a partir de los cuatro elementos (tierra, agua, aire, y fuego), mientras que el supralunar es el que está bajo la acción divina. El movimiento en este universo es inmutable y su fuente última es el primer “Motor Inmóvil” (aquello que se mueve sin ser movido). A su impulso inmediato sólo está afectada la esfera exterior de estrellas fijas –el llamado “primer cielo”–, siendo también la fuerza impulsora del movimiento (*primum movens*) de las demás esferas, mientras que su propio movimiento proviene directamente de Dios (Grzybowski, 2015, p. 38). Entre la Tierra y la esfera de las estrellas fijas otras siete esferas componían el universo aristotélico. Partiendo desde la Tierra, ellas eran: de la Luna, de Mercurio, de Venus, del Sol, de Marte, de Júpiter y de Saturno. Dentro de cada una de las esferas anteriores, Ptolomeo agregó otras esferas para tomar en cuenta los movimientos de epiciclos y deferentes los planetas. A la concepción cosmológica aristotélica-ptolemaica, Dante agregó otras esferas: la novena es invisible a los sentidos y corresponde al cielo cristalino o primer móvil, completamente transparente. Dante justifica la existencia del noveno cielo sobre bases filosóficas, mientras que Ptolomeo lo hace mediante argumentos matemáticos para demostrar la necesidad de la existencia y movimiento de esta esfera. Dante establece que la novena esfera es movida por el amor de Dios y el resto lo hace por reacción a este movimiento divino. El décimo cielo es el Empíreo, donde reside Dios con los santos. A diferencia de las otras esferas, este cielo es fijo, tranquilo y apacible, que encierra a todo y más allá del cual no hay nada más (Grzybowski, 2015, pp. 42-43). La concepción de un universo conformado por esferas, rodeadas por el Empíreo siguió vigente hasta entrado el

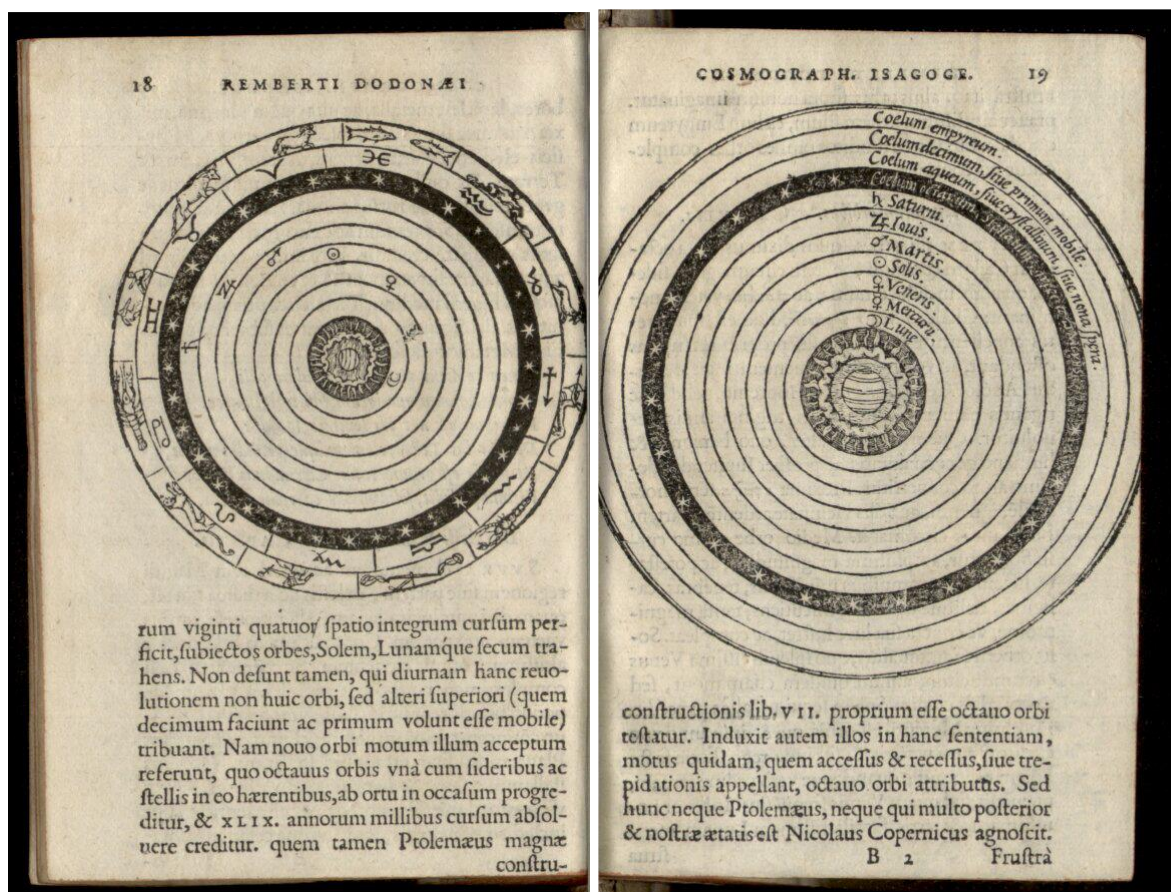


Figura 2. Páginas de *De Spaehera* ... de Rembert Dodoens (1584) presentando las esferas de del mundo. Concepción aristotélica (izquierda) y concepción dantesca (derecha).

siglo XVI, como se observa en la Figura 2, en la que se presentan dos páginas de un libro de astronomía y geografía de 1584, *De Sphaera sive de astronomiae et geographiae principiis cosmographica* (La esfera o principios cosmográficos de la astronomía y la geografía), de Rembert Dodoens. La representación de la izquierda de la Figura 2 corresponde a las esferas del universo aristotélico y la de la derecha a una modificación del universo dantesco, encontrándose separado el cielo cristalino (identificado en la figura como *Coelum aqueum, siue crystallinum, siue nona sphaera*) del primer móvil (*Coelum decimum, siue primum mobile*).

3. QUESTIO DE AQUA ET TERRA: EL PROBLEMA DEL AGUA Y LA TIERRA

Questio de aqua et terra forma parte de las obras menores de Dante. La escribió en latín y la presentó en 1320, pero permaneció olvidada hasta 1508, cuando el fraile agustino Giovanni Benedetto Moncetti da Castiglione Aretino la publicó en Venecia en la imprenta de Manfredo de Monteferrato (En la Figura 3 se presentan la primera y última página del impreso). En 1908 la edición príncipe de 1508 fue reproducida en facsímil bajo la dirección de G. Boffito

y se publicó con traducciones al italiano, francés, castellano, inglés y alemán. Es esta edición la que se utiliza en este artículo (Boffito, 1908). El texto en latín de la edición de 1508 correspondiente a la argumentación de Dante consta de trece páginas y media, presentada en un solo párrafo (Figura 4). La edición traducida de Boffito separa el texto en 24 párrafos, facilitando así la lectura y la comprensión del razonamiento seguido por Dante.

¶ Epigramma Magistri Ioannis Benedicti de Castilione Arretino ordinis Eremitarum ad librum.

I liber/o/foelix uuln's amplexu pudicis
Hippolytus uarcs oscula multa dabit
Ille colit phoebum.musas.sacrâq; pirenem
Castaliae matres gênea ferra ferent

Questio florulenta ac perutilis de duobus elementis aquae
& terrae tractâs/nuper reperta que olim Mantuae au
spicata. Verôae uero dispurata & decia ac manu
propria scripta/a/Dante Florentino poeta
clarissimo/q; diligêter & accurate corâ
recta fuit per reuerendû Magistru
Ioannē Benedictum Monce
rû de Castilione Arretino
Regē Parauinî ordi
nis Eremitarum diui
Augustini sacraeq;
Theologiae do
ctorem excel
lentissimû.
✠

¶ Tetralthicos eiusdem Magistri Ioannis Benedicti de Castilione Arretino ad Dantem Florentinum poetam clarissimum.

Naturam/logicam/cognouit Iura. Tonantē
Sydereos cursus/pieridelq; deas
Carmine phoebeae matres/per litora nostra
Italiae doctae.dicit apollo deus.

A

Semper doctiloquis limina uestra parentis
Inde pudica dabit Lucretia mollia uultu
Oscula sydereos:regia tecta uidēs
Colligit illa rosas:& nectet laurea ferra
Mixta simul uiolis/dulcia uerba canet
Non diomedis enim crudelis recta subibis
Dices phoebeas/pieridumq; domos
Ne nimeas gerras mendacis saepe popelli
Iam lacerat doctos lingua superba uiros

¶ Ad lectorem.

¶ Habes candide lector questionem per pulchram Dantis
Poetae Florētini/de duobus elementis.uidelicet.aquae &
terrae diferentis.castigatam/limatam elucubratâ à Reue
rendo patre magistro benedicto de Castilione Arretino
artium liberalium excellentissimo:ex hoc opusculo mirifi
cam doctrinâ carpes.que (ut autumo)mentem tuâ oble
ctabit/nocte,& diu hoc opusculum perlege.non fronte
caperata sed uultu sereno diligêter hoc opusculum euol
ue/quo perlecto aiūs tuus uariis rebus saturabitur/quē
admodum principes non uno ferculo.sed plurimis edu
liis opiperatis satiantur/ea pp Dantes poeta florētinus &
philosophus diuini laudibus est extollendus,qui nō so
lum lingua uermacula sed etiam litteratura monumenta
scitu digna posteritati teligrideo Grāmatici/Poetae/Ora
tores/celeberrimiq; philosophi Dantem Poetam Clarissi
mum.atq; philosophū excellentissimū elloquio pierio de
berent extollere/qui Tonantis.Purgatorii.Plutonis ter
re & aquae sedes ingenio diuino exarauit.

FINIS.

¶ Impressum fuit Veneris.per Manfredum de
Monteferraro,sub Indyto principe Leo
nardo Lauretano.Anno dñi.M.D.
VIII.sexto.Calē Nouembris.

Figura 3. Primera y última página de la edición príncipe de 1508 de *Questio de aqua et terra*. Notar que el título de la edición de fra Giovanni es el tercer párrafo: *Questio florulenta ac perutilis de duobus elementis aquae & terrae ...*

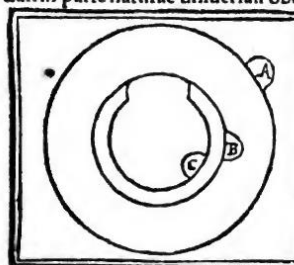
La estructura del trabajo de Dante es la siguiente: i) plantea el problema, ii) presenta los argumentos propuestos por otros, iii) objeta las soluciones, iv) propone y demuestra su solución. Debe tenerse siempre presente que su análisis es uno de lógica aristotélica, es decir partiendo de ciertos principios respecto a la estructura del universo hace un análisis lógico para demostrar lo erróneo de las soluciones previas al problema y concluir con la suya como la única factible. En su análisis frecuentemente cita a Aristóteles, a quien se refiere también como el Filósofo.

Antes de seguir con el detalle de la presentación de Dante, debe considerarse los siguientes principios o resultados que surgen de la obra aristotélica:

- i) El centro de la Tierra es el centro del universo
- ii) La tierra es un elemento más grave que el agua o, en nuestro lenguaje, el elemento tierra tiene un mayor peso específico que el agua.
- iii) Al cuerpo más noble le corresponde el lugar más noble, y el lugar es más noble cuanto más alto está, ya que está más cerca del primer cielo.
- iv) Los cuerpos graves se mueven en línea recta hacia abajo, hacia el centro de su circunferencia (esfera).
- v) Los cuerpos ligeros se mueven hacia arriba, en línea recta.
- vi) Para examinar la gravedad de los cuerpos no debe examinarse su cantidad como cantidad sino el peso. En nuestro lenguaje, la gravedad de un cuerpo no depende de su volumen, sino de su peso específico.
- vii) Hay cuerpos homogéneos (por ej., el oro puro) y cuerpos simples (es decir los cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego). Ambos tienen calidades uniformes en cada una de sus partes (en nuestro lenguaje, ambos tipos de cuerpos tienen propiedades homogéneas).
- viii) Los cuerpos pueden estar sujetos a la acción de su naturaleza particular como de la naturaleza universal.
- ix) La naturaleza universal no puede frustrar su fin, por lo que domina sobre la naturaleza particular.

corporibus. si possimè petat centrum. quod erat scdō de clarandum. sic igitur apparet esse impossibile. quod aqua sit concentrica terrae. quod est contra determinatā: Sed ista ratio non uidetur demonstrare quia propositio maioris principalis. similiter non uidetur habere necessitatē. Dicebatur enim grauiissimum corpus equaliter undiq; ac potissime petat centrū. quod non uidetur esse necessarium. quia licet terra sit grauiissimū corpus cōparatum ad alia corpora/ comparatū tamen in se. sed suas partes potest esse grauiissimū/ & non grauiissimū. quia possit esse grauior terra. Ex una parte quā ex altera nā quā adequatio corporis grauis nō fiat per quantitātē in quantum quantitatis. sed per pōdus potest ibi esse adequatio ponderis/ quod non sit ibi adequatio quantitatis. & sic illa demonstratio est apparet & nō existens. Sed talis instantia nulla est/ proce dit enim ex ignorantia naturae/ Omogeneitatis & simplicii/ corpora enim omogenea/ & simplicia sunt. Omogenea ut aurum depuratū & corpora simplicia ut ignis & terra/ regulariter in suis partibus qualificantur omni naturali passione. unde cum terra sit corpus simplex/ regulariter in suis partibus qualificatur naturaliter: & per se loquendo: quare cū grauitas insit naturaliter terrae. & terra sit corpus simplex: necesse est ipsam in omnibus partibus suis regularem habere grauitatē: sed proportionē quantitatis & sic adhuc ratio instantiae principalis. Vnde respondendum est/ quod ratio instantiae sophistica est quia fallit/ secundū quid/ & simpliciter/ propter quod. Sciendum est quod natura uniuersali nō frustratur suo fine: unde licet natura particularis aliquando propter inobedientiam materie ab intentione sine frustratur/ natura tamen uniuersalis nullo modo potest/ a sua intentione deficere. cū natura uniuersali equaliter actus & potentia terū. que possunt esse & non esse subiacent: Sed intentio naturae uniuersalis est ut omnes formae que sunt impotentia materiae primae reducantur in actū. & secundum rationem speciei sint in actu/ ut materia prima. secundum suā totalitatem. sit sub omni forma materiali. licet seculū partem sit sub omni priuatur opposita preter unam/ nam cum omnes formae. que sunt impotentia materiae ideae licet sint in actu in motore coeli. ut dicitur comētrāt inde sub

stantia orbis. Si omnes istae formae nō essent semp in actu/ motor coeli deficeret ab integritate diffusionis suae bonitatis. quod nō est dicendum. & quum omnes formae materiales generabilium & corruptibilium: preter formas elementorum requirant materiam & subiectum mixtum. & complexionatum. ad quod tamquā ad finem ordinatae sunt elementa in quantum elementa: & mixtio esse non possit ubi miscibilia: simul esse possunt/ ut de se patet: necesse est esse partem in uniuerso ubi omnia miscibilia. sicut elementa conuenire possint. Hec autē esse non possit nisi terra in aliqua parte emergetur ut patet intuitu. Vnde cum intentioni naturae uniuersalis. omnis natura obediat necesse fuit etiam simplicem naturam terrae. que est esse deorsum in esse aliam naturam per quam obediret intentioni uniuersalis naturae/ ut scilicet pareretur eleuari in parte a uirtute coeli tamquā obediens a precipiente sicut uidemus de concupiscibili & irascibili in homine. que licet secundum proprium impetum ferantur/ secundum sensitiuam affectionem. sed tamen q; rationi obediunt/ quando q; a proprio impetu retrahuntur. ut patet ex primo. Ethicorum: & ideo licet terra secundum simplicem eius naturam. equaliter petat centrum ut in ratione instantiae dicebatur. sed tamen naturam quandam patitur eleuari in parte naturae uniuersali obediens. ut mixtio sit possibilis & secundum hec saluatur concentricitas terrae & aquae & nihil sequitur impossibile. apud recte philosophantes. ut patet i ista figura: ut sit coelū circulus i quo. a. aqua circulus in quo. b. terra circulus in quo. c. nec refert quātum ad propositum uerum aqua



parum uel multum a terra distare uideatur: & sciendum q; ista est uera/ quia est qualis est forma. & situs duorum elementorum. aliae quae superiores falsae & positrae sunt non quia

Figura 4. Dos páginas consecutivas de la edición de 1508 de *Questio de aqua et terra*. Todo el texto es un solo párrafo, que comprende más de trece páginas y media.

Cuando Dante expresa “hacia arriba” quiere decir en dirección hacia el primer cielo y “hacia abajo” corresponde en dirección hacia el centro de la tierra.

El problema que se plantea en *Questio de aqua et terra* es determinar si el agua en su esfera es en algún punto más alta que la tierra que emerge de las aguas. Cinco argumentos principales se daban para responder este problema, los que son presentadas por Dante y se sintetizan a continuación:

- 1) Si dos circunferencias (se refiere a dos superficies esféricas) están a una distancia desigual, es imposible que tengan el mismo centro.
- 2) El agua es un cuerpo más noble que la tierra, y mientras más noble es el cuerpo, más se acerca al primer cielo, por lo que resulta que el lugar que ocupa el agua tiene que ser más alto que el que ocupa la tierra.
- 3) Toda opinión que se halla en contradicción con los sentidos es una mala opinión. Opinar que el agua no está más arriba que la tierra es contradecir los sentidos, luego es una mala opinión.
- 4) Si la tierra no estuviera abajo del agua, toda la tierra estaría sin aguas, al menos en la parte que emerge, y así no habría fuentes, ni ríos, ni lagos. Como naturalmente el agua va de arriba abajo, el agua está más arriba de la tierra.
- 5) El agua parece que sigue el movimiento de la Luna, como se ve en el flujo y reflujo del mar. Siendo excéntrica la órbita de la Luna, parece racional que en su esfera el agua imite la excentricidad de la órbita lunar y por consiguiente sea excéntrica, lo que no podría suceder si el agua no está por sobre la tierra.

A partir de los principios y argumentos anteriores, Dante descarta las siguientes respuestas al problema:

- a) Que la tierra emerja de las aguas debido a que sus esferas son excéntricas.

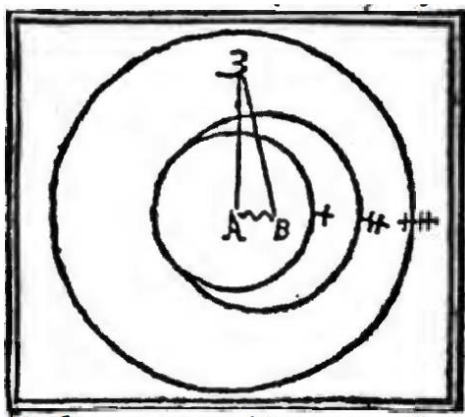


Figura 5. Esquema usado para demostrar que es imposible que la superficie del agua no tenga el mismo centro que la superficie de la tierra.

Para ello considera el esquema de la Figura 5 (tomada de la obra de 1508). El cielo corresponde a la circunferencia marcada con tres cruces, la del agua con dos y la de la tierra con una cruz. Debido a la excentricidad, la superficie de la tierra emerge en un sector de la superficie del agua. En esta configuración, el agua podría moverse hacia arriba y hacia abajo. Si se tiene una porción de tierra y de agua en z (denotada por 3 en la figura), la porción de tierra se moverá de manera natural en línea recta hacia el centro de su esfera (A) y la del agua, también en línea recta hacia el centro de la suya (B). Pero como el concepto de arriba y abajo es respecto al centro de la tierra (que es el centro del universo), la porción de agua en su movimiento de z (3) a B, lo hará subiendo (su movimiento la acerca al primer

cielo), lo que no puede ser ya que el agua es un cuerpo grave y debe bajar. De este modo, Dante descarta esta solución.

Otra respuesta al problema que descarta Dante es que la tierra tenga una protuberancia (“gibosidad”) que la haga sobresalir por sobre la superficie del agua, como se muestra en la Figura 6. En ese diagrama, la esfera del cielo está indicada con cuatro cruces, el agua con tres y la tierra con dos. El cielo, el agua y la tierra son concéntricos, con centro en D. Para que el agua y la tierra sean concéntricas, la primera debe tener también una gibosidad, cuyo

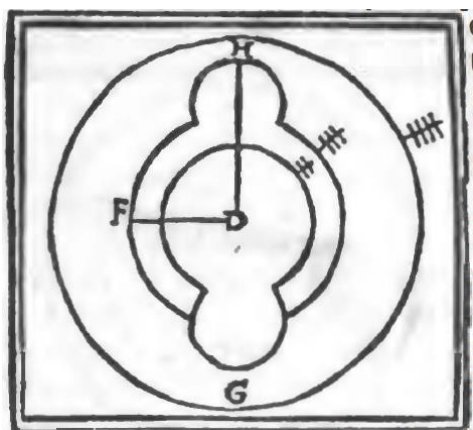


Figura 6. Esquema usado para demostrar que es imposible que exista una protuberancia de la tierra que la haga sobresalir por sobre la superficie del agua.

punto más alto se denota con H en la Figura 6. Fuera de la gibosidad, la superficie de agua es esférica y un punto de ella se denota con F. Considerando que la distancia al centro del universo de la gibosidad (trazo H-D) es mayor que la de la superficie esférica (trazo F-D), el agua de la gibosidad se derramará hasta que genere una superficie regular centrada en D: *“Ergo no hay gibosidad en el agua, porque Dios y la naturaleza hacen y quieren siempre hacer lo que es mejor, como lo demuestra el Filósofo en el De coelo et mundo y en el segundo libro del De generatione animalium”* Como el agua no puede tener una gibosidad, es imposible que en alguna parte de su circunferencia sea más alta que la superficie de la tierra habitable.

Como es imposible que el agua sea excéntrica y que tenga alguna gibosidad, necesariamente es concéntrica y su circunferencia está a igual distancia del centro del mundo.

Sigue Dante con sus argumentos, ahora para demostrar que las playas están más arriba que toda la mar y las playas son las partes más bajas de la tierra, ya que los ríos desembocan en ellas. Así, con mayor razón otras partes de la tierra están más altas que las playas. Pero la tierra, al ser grave tiende al centro de la tierra, y todas sus partes lo hacen con la misma fuerza, por lo que debería formar una esfera y, si el agua fuera concéntrica, como lo demostró antes, toda la tierra debería estar cubierta de agua.

La conclusión a la que llega Dante, muy fácil de demostrar en la actualidad considerando las leyes de Newton, dos materias homogéneas de distinta densidad y cálculo diferencial, lo hace siguiendo un análisis lógico, basado en los principios establecidos por Aristóteles. Pero su conclusión no se ajusta a la realidad observada y no basta un análisis basado en la gravedad de los cuerpos. Salva la situación al considerar la naturaleza particular y la naturaleza universal de la materia. De este modo, argumenta que todas las formas que están en potencia en la materia están en acción en el motor del cielo (ya que, si no están en acción, el motor del cielo tendría un defecto de integridad de la difusión de su bondad). De este modo, hay que buscar la respuesta al problema en la intención de la naturaleza universal, o sea, la tierra se alza en parte por la virtud del cielo. En otras palabras, la tierra “según su naturaleza simple

se encamina igualmente (i.e. uniformemente) al centro”, y según su naturaleza universal algunas de sus partes muestran una elevación. También argumenta que existe una mezcla de elementos. Considerando ahora la Figura 7, en la que el círculo del cielo está en A, el del

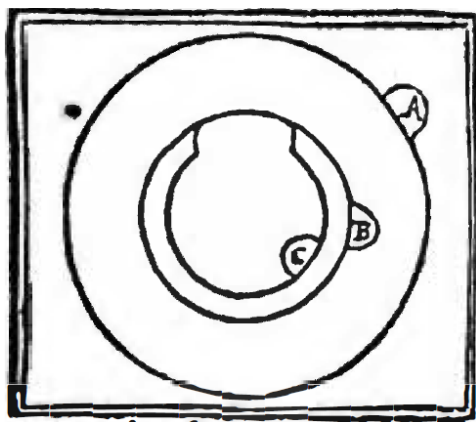


Figura 7. La tierra emergente debe tener la forma de medialuna.

agua en B y la tierra en C, demuestra que la tierra emergente debe tener la forma de medialuna y se extiende desde la longitud de Cádiz en occidente hasta el río Ganges en oriente (en concordancia con Aristóteles, la tierra emerge solo en el hemisferio norte).

Por último, Dante busca “la causa final y eficiente” de la elevación de la tierra. La causa eficiente no puede ser la misma tierra, porque la elevación requiere ir de abajo hacia arriba, lo que es en contra de la naturaleza de la tierra. Tampoco pueden serlo los otros elementos (i.e., el agua, el aire y el fuego), por lo que no hay otra posibilidad que la causa se

encuentre en el cielo. Pero ¿cuál de todos los cielos? Dante procede a descartar el cielo de la Luna y los que le siguen, hasta llegar a la octava esfera celeste, el cielo de las estrellas ya que aunque tiene “unidad en su sustancia, tiene también la multiplicidad”. Esta diversidad se aprecia en el tamaño y luminosidad de las estrellas y de las figuras e imágenes de las constelaciones. Citando a Ptolomeo (las figuras inferiores se parecen a las superiores), “es manifiesto que la virtud de la elevación (de la tierra) se halla en esas estrellas”. Ahora bien, si esa región del cielo se mueve circularmente, ¿por qué no fue circular la elevación de la tierra? La respuesta de Dante es “porque no había materia suficiente para tanta elevación”. Y ante la pregunta ¿por qué la elevación fue en el hemisferio norte (“por qué esa elevación hemisférica fue de esta parte, más bien que de aquella”)?, responde citando el segundo libro de *De coelo* de Aristóteles: respuestas a tales preguntas “están arriba de nuestra inteligencia”. Termina Dante su argumentación diciendo “Dios el distribuidor glorioso ... lo hizo todo así porque fue mejor que hacerlo de otra manera. Cuando dijo: que se junten las aguas, y que aparezca la tierra, - entonces recibió el cielo la virtud activa, y la tierra la potencia pasiva”

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Si bien considerar que la orografía terrestre es el resultado del influjo de las estrellas nos puede inducir a risas (aunque aún existe una buena cantidad de gente que cree en horóscopos), es una idea que probablemente llegó con los árabes a Europa en el siglo XII, por lo que no era una noción extraña en la época de Dante. No hay que olvidar que dos siglos después de la muerte del poeta, aún se consideraba la influencia del cielo en la formación de los minerales, la que era amplificada por el movimiento del firmamento y el de los siete planetas (Hoover y Hoover, 1950, p. 44). La idea que las estrellas pueden elevar la tierra se presenta aún tan tarde como en 1525, año en que se reimprimió la obra de Paulo Veneto (1369-1429) *De compositione mundi*, que ya había ido previamente impresa en 1498 y 1514.

Más aún, en el siglo XVII todavía había quienes pensaban que, si bien no las estrellas, los cuerpos celestes tenían una influencia en la producción natural de minerales (Duncan, 1954).

La explicación de Dante al problema de por qué, siendo la tierra más grave (mayor peso específico) que el agua, emerge por sobre la superficie de esta última, y no forman ambos elementos esferas concéntricas, con el agua cubriendo la tierra es perfecta desde el punto de vista de cómo se entendía la ciencia medieval, basada en la cosmología aristotélica-ptolemaica, y en concordancia con el modelo cristiano del universo propugnado por la Iglesia de Roma. Sin embargo, tiene una falla fundamental: el modelo físico-cosmológico en la que se basa es falso. El problema que abordó Dante es uno de los más complicados que surgen del modelo aristotélico y se mantuvo sin una respuesta efectiva hasta que se abandonó el modelo de esferas celestes.

REFERENCIAS

- Alarcón Benito, J. (Traductor, 2016) Dante Alighieri, *La Divina Comedia*. Edimat Libros S.A., Madrid.
- Barceló, J. (2021) *Para leer la Divina Comedia*. Ediciones Tácitas Ltda., Santiago.
- Boffito, G. (1908) *La “Quaestio de aqua et terra” di Dante Alighieri. Introduzione storica e trascrizione del testo latino*. Leo S. Olschi, Editore. Firenze.
- Borzi, I. (2017) Dante Alighieri, *Divina Commedia*. 16° edición. Newton Compton Editori, Roma.
- Crespo, A. (Traductor, 1982) Dante Alighieri, *La Divina Comedia*. Tres tomos. Segunda edición. Seix Barral, Barcelona.
- de la Pezuela, J., Conde de Cheste (Traductor, 1879) Dante Alighieri, *La Divina Comedia*. Tres tomos. Tipografía de D, Antonio Pérez Dubrull, Madrid.
- Dante Alighieri, Alessandro Vellutello (1544) *La Comedia di Dante Aligieri con la nova espositione di Alessandro Vellutello*. Imp. Francesco Marcolini. Venecia.
- Demeter, T., B. Láng, D. Schmal (2015) Scientia, en *Encyclopedia of Renaissance Philosophy*, M. Sgarbi (Ed.), Springer International Publishing. Switzerland.
- Dodoens, R. (1584) *De Sphaera sive de astronomiae et geographiae principiis cosmographica isagoge*. Impresor Christophore Plantinum, Amberes.
- Duncan, E.H. (1954) “The Natural History of Metals and Minerals in the Universe of Milton's Paradise Lost”. *Osiris*, Vol. 11, pp. 386-421
- Francisco (2021) Carta apostólica *Candor Lucis Aeternae*.
https://www.vatican.va/content/francesco/es/apost_letters/documents/papa-francesco-lettera-ap_20210325_centenario-dante.html
- Grzybowski, J. (2015) *Cosmological and Philosophical World of Dante Alighieri*. Peter Lang Edition. Frankfurt am Main.
- Hoover, H.C. and Hoover, L.H. (Translators, 1950) *Georgius Agricola. De Re Metallica. Translated from the First Latin Edition of 1556*. Dover Pub., Inc. New York, USA.
- Mitre, B. (Traductor, 1894). Dante Alighieri, *La Divina Comedia*. Editor: Jacobo Peuser, Buenos Aires.

ACERCA DEL AUTOR

Aldo Tamburrino es Ingeniero Civil mención Hidráulica de la Universidad de Chile, M.Sc y Ph.D. in Civil Engineering de 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 de dicha universidad. Actualmente sus áreas de interés se centran fundamentalmente en hidráulica fundamental, flujos detríticos, granulares y de fluidos no-newtonianos.

MODELACIÓN NUMÉRICA DE CORRIENTES SALINAS INDUCIDAS POR SALMUERA DE DESALINIZACIÓN EN LA ZONA COSTERA DE UNA PLANTA DESALINIZADORA EN LA REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

DANIELA MUÑOZ¹, ALDO MUÑOZ², LUIS ZAMORANO³, YARKO NIÑO⁴

¹Departamento de Ingeniería Civil y Advanced Mining Technology Center,
Universidad de Chile

daniela.munoz.a@ug.uchile.cl

²Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile

aldo.munoz@amtc.uchile.cl

³Instituto Nacional de Hidráulica, Ministerio de Obras Públicas

luizsamorano@inh.cl

⁴Departamento de Ingeniería Civil y Advanced Mining Technology Center,
Universidad de Chile

ynino@ing.uchile.cl

RESUMEN

La actual escasez del recurso hídrico en nuestro país se manifiesta en el crecimiento exponencial de plantas desalinizadoras y su capacidad, que busca satisfacer de agua dulce a comunidades e industrias, aumentando con ello sus flujos de rechazo. En general, dichos flujos son devueltos al mar alterando la dinámica costera y condiciones naturales de desarrollo de vida marina. En este contexto, el presente estudio evalúa la dilución de chorros de salmuera eyectados a través de un sistema difusor multipuerto, utilizando un modelo tridimensional construido en el software OpenFOAM. La zona de estudio corresponde al entorno de las descargas de salmuera de la planta desalinizadora Minera Candelaria. Las simulaciones utilizan las ecuaciones promediadas de Reynolds e incluyen variabilidad en la magnitud de corrientes de mar. Los resultados fueron comparados con los modelos comerciales VISJET y CORMIX. En escenarios donde el lecho marino restringe la pluma, la distribución predicha por modelos comerciales dista apreciablemente de lo predicho con el modelo tridimensional. Se observa que en ausencia de corriente marina, la corriente salina tiende a desplazarse en la dirección de la pendiente de fondo. El modelo numérico demostró nuevas perspectivas de análisis respecto de los softwares comerciales tradicionales, dentro de las que se incluyen la dilución salina en el fondo marino, el efecto de la pendiente de fondo en el arrastre de la corriente densa y la capa estratificada producida por la constante inyección de salmuera al ambiente.

Palabras claves: Modelación numérica, desalinización, salmuera, chorros densos, dilución.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Actualmente, los efectos de la escasez hídrica son evidentes en el norte de Chile, impactando en usos de agua del tipo sanitario, minero y agrícola. El abastecimiento de estas actividades utiliza como principal fuente el agua dulce continental, proveniente de la cordillera y de almacenamientos de acuíferos. La desalinización de aguas costeras pretende subsanar el agotamiento de estas fuentes convencionales, necesidades básicas de la población y el uso de agua dulce en diversas actividades de producción.

Acorde a Panagopoulos (2019), una planta desaladora genera dos productos de relevancia, el primero corresponde al agua permeada (que luego de otros procesos se convierte en potable), y el segundo a un caudal de rechazo, denominado salmuera. Este último suele ser devuelto al mar mediante emisarios submarinos, aplicando en algunos casos, un sistema de difusores. El flujo anómalo de alta densidad evacuado se diluye y propaga en el entorno de descarga debido al arrastre de aguas ambientales menos densas. Dicho lo anterior, este estudio pretende analizar las corrientes de densidad originadas por vertido de salmuera, con enfoque en la planta desalinizadora Minera Candelaria, ubicada en la comuna de Caldera, región de Atacama, la cual genera descargas a través de un sistema de difusores multipuerto.

Los métodos tradicionales para determinar el diseño del difusor y evaluar el cumplimiento normativo aplican, ampliamente, argumentos de escala semiempíricos o modelos de momentum integral (Baum et al., 2020). Así mismo, los modelos de momentum integral utilizan herramientas comerciales como VISJET, CORMIX y herramientas gratuitas como Visual Plumes para modelar la dilución del chorro salino en un campo cercano de descarga (Palomar et al., 2012).

Dentro de las limitaciones más relevantes de estos softwares destaca la nula interacción de los chorros con el fondo marino y los chorros adyacentes, según menciona Palomar (2012), otra limitación es la interacción del chorro con la superficie libre cuando el punto de descarga tiene poca profundidad. Dado lo anterior, se utiliza el software de dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) de código abierto OpenFOAM, para modelar numéricamente el fenómeno advectivo-difusivo turbulento. Con esta herramienta se busca subsanar tales deficiencias y describir de forma más rigurosa el comportamiento del chorro en el espacio y tiempo.

Una alteración de los niveles naturales de salinidad marina impacta directamente en la dinámica del agua costera y la vida acuática del entorno de descarga. Diversos estudios e investigaciones (Kress et al., 2019; Lattemann et al., 2008) han demostrado que una constante exposición a salinidades por sobre los niveles naturales podría perjudicar la integridad de organismos marinos, incluidos vertebrados, invertebrados, pastos marinos y poliquetas, correspondiente a gusanos que habitan en el océano, especialmente si el efluente es descargado en cuerpos receptores sensibles. Chile carece de normativa que establezca los

límites de salinidad menos nocivos para el ecosistema acuático, por lo que las regulaciones utilizadas son de origen extranjero.

La proyección en el aumento exponencial de plantas desaladoras y su capacidad genera el interés de modelar y analizar el comportamiento de la salmuera de rechazo, que tiene como principal destino el mar, siendo el medio ambiente acuático y la vida que aloja, los principales perjudicados de un proceso que se vuelve una necesidad en el planeta.

2. CASO DE ESTUDIO

2.1 Planta desalinizadora Minera Candelaria

La planta desalinizadora Minera Candelaria se ubica en una zona aledaña al Puerto Punta Padrones, a 3 km de la ciudad de Caldera, provincia de Copiapó, región de Atacama, específicamente en $70^{\circ}51'$ de latitud sur y $27^{\circ}4'$ de longitud Oeste. La Figura 1 muestra un mapa con la ubicación de la planta, la zona de captación de agua de mar y la zona de descarga de concentrado de salmuera.



Figura 1. Ubicación geográfica de Planta desalinizadora Minera Candelaria y zonas de captación y descarga de aguas.

De acuerdo a lo establecido en los informes de impacto ambiental, recuperados del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), la planta opera con un sistema de ósmosis inversa y descarga la salmuera de rechazo a través de un difusor multipuerto, cuya cota inicial se ubica a -20 m NRS con una pendiente del 12% en el sentido del difusor. El sistema lo

componen una tubería de largo $L = 18$ m y diámetro $D = 650$ mm, con $n = 10$ portas (cinco en cada brazo del difusor) de diámetro $d = 150$ mm cada una, distanciadas por $L_p = 2$ m. La Figura 2 esquematiza el difusor multipuerto de la planta.

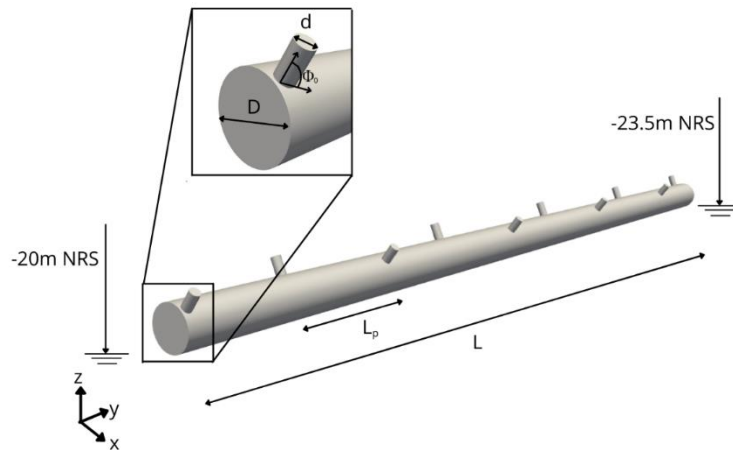


Figura 2. Geometría del difusor multipuerto.

2.2 Propiedades ambientales

Las corrientes marinas corresponden a una de las forzantes con mayor implicancia en el comportamiento del modelo en el campo lejano. Según su origen, pueden clasificarse en: corrientes de densidad causadas por diferencia de densidad y temperatura; corrientes de arrastre, forzadas por el viento; corrientes de marea, ocasionadas por la variación en el nivel de mar; y corrientes generadas por olas. En condiciones naturales se considera que no existe presencia de corrientes de densidad. Además, dada la ubicación del sistema difusor, los efectos por marea y olas se desprecian, ya que el sistema en la zona es micromareal, y la zona de descarga se encuentra protegida del swell del sur-oeste, y a una profundidad significativa de modo que el efecto hidrodinámico del oleaje se puede despreciar.

Las principales propiedades ambientales para considerar se obtienen del estudio de dilución realizado por la empresa consultora PRDW en 2010. En dicho documento no existe información relacionada a mediciones de viento, sin embargo, se dispone de mediciones realizadas con un correntómetro multicapas de tipo ADCP. Las probabilidades de ocurrencia y de no excedencia de magnitud de corrientes muestran que:

- Para corrientes marinas en capas profundas (5 m de altura desde el fondo marino.) predomina la dirección perpendicular al sistema de difusión.

- La máxima corriente registrada en dirección perpendicular al emisario alcanza los 0.24 m/s, a una altura de 5 m medida desde el fondo marino..

Para este estudio se utilizan las mismas consideraciones de velocidad de corriente ambiental que la empresa consultora PRDW.

La empresa también cuenta con perfiles de densidad en una columna de agua de aproximadamente 20 m de altura, para los meses de septiembre y diciembre. Las mediciones fueron realizadas con un dispositivo CTD en el sector de Punta Padrones. En este trabajo sólo se estudian las condiciones asociadas al mes de septiembre, que corresponde al escenario con una mayor salinidad ambiental. En consecuencia, se considera que inicialmente la columna de agua presenta un perfil de densidad constante, equivalente a $\rho_a = 1026.1 \text{ kg/m}^3$, con una salinidad correspondiente a 34.55 psu.

En estudios de chorros densos inclinados, Baum y Gibbes (2020) y Zhang (2017) emplean un número turbulento de Schmidt de 0.7, una difusividad de $1.4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, y una viscosidad cinemática de $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Aquí, se debe notar que los aportes por difusividad en el campo cercano son menores en comparación a procesos dominantes como la advección, la flotabilidad y la dinámica de la corriente.

2.3 Propiedades de descarga

Las propiedades de descarga utilizadas en las simulaciones se ajustan a una operación del 100% de la planta. En este sentido, el caudal total de salida corresponde a $Q_T = 0.655 \text{ m}^3/\text{s}$. Considerando que el flujo se distribuye uniformemente en las 10 portas del difusor, se tiene $Q_0 = 0.0655 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el mes de septiembre el concentrado de salmuera presenta una densidad ρ_d equivalente a 1046 kg/m^3 , correspondiente a una salinidad de 60.95 psu.

El análisis de cumplimiento de normativa contempla lo tipificado en la Southern California Coastal Water Research Project (SCCWRP) (2012), la cual resume algunas regulaciones ambientales asociadas a la dispersión de la descarga. Para la examinación de resultados se seleccionan tres restricciones, las cuales indican que, para una determinada distancia, los incrementos salinos respecto al cuerpo receptor no deben exceder el 10%, 5% y 1 psu (para las condiciones salinas de este estudio, corresponde al 3% de exceso). Para este último caso, el más restrictivo, la salinidad admisible en el ambiente es de 35.55 psu.

2.4 Configuración del modelo y condiciones de borde

Las entradas al modelo corresponden al flujo causado por la corriente marina, proveniente de la dirección transversal del sistema de difusores, y el efluente de salmuera, evacuado en cada una de las portas. Puesto que el chorro de salmuera no alcanza la superficie libre, ésta se considera como una tapa rígida. El fondo marino se modela como un plano inclinado que

impone velocidades nulas, de modo que, las caras restantes del modelo representan las salidas de flujo en el sistema. La Figura 3 esquematiza lo mencionado anteriormente.

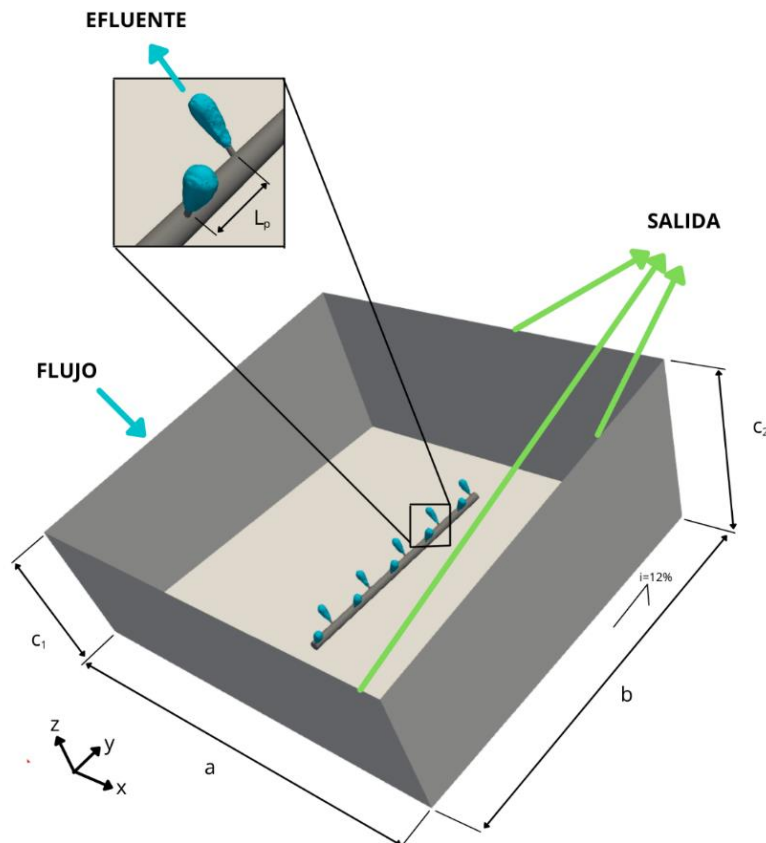


Figura 3. Modelo conceptual y dimensiones del modelo. Las flechas en color celeste denotan la entrada de flujo en el sistema, mientras que las flechas en color verde corresponden a la salida de flujo. Las variables a , b , c_1 y c_2 varían según el caso de modelación.

En la columna de agua actúa la presión hidrostática y, como fue señalado anteriormente, se considera que no existe una estratificación de densidad inicial.

En relación con Baum y Gibbes (2020), las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en la turbulencia para fluidos incompresibles permiten describir el comportamiento del modelo.

Se utiliza el modelo $k - \epsilon$ como modelo de cierre de turbulencia para la metodología RANS. Este modelo lo componen dos ecuaciones, donde k corresponde a la energía cinética turbulenta y ϵ a la tasa de disipación de energía cinética turbulenta.

El término del modelo $k - \epsilon$ asociado a la boyancia no se considera en este estudio. Sus implicancias en los resultados se discuten en la sección 4.

Para este trabajo se utiliza la versión v2006 de OpenFOAM. Dentro del software existe un amplio espectro de solucionadores (solvers) que resuelven ecuaciones gobernantes de distintos fenómenos. El solver utilizado corresponde a *twoLiquidMixingFoam*, que resuelve flujos multifase y transitorios para la mezcla de dos fluidos incompresibles. El flujo generado por este solucionador reside en la diferencia de densidad impuesta en un inicio. El detalle de la configuración del modelo numérico puede revisarse en el trabajo de Muñoz (2021).

Las simulaciones pretenden analizar el comportamiento de distribución salina para variaciones en la magnitud de velocidad de corriente U_a . Para ello se seleccionan tres casos de estudio: (1) $U_a = 0$ m/s, (2) $U_a = 0.35$ m/s y (3) $U_a = 0.5$ m/s.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados generales

El comportamiento general de cada caso estudiado queda expuesto en la Figura 4, correspondiente a una vista en corte x-z, con z en sentido contrario a la gravedad. Las imágenes muestran la distribución salina para chorros eyectados desde la porta del difusor más distante de la costa. Debido a que la dirección principal del chorro presentado se opone a la corriente de mar, éste se denomina contraflujo. Para portas ubicadas en dirección contraria, el flujo se denomina como chorro de coflujo.

La escala de salinidad (representada por la barra de colores) tiene como límite inferior 34.5 psu, correspondiente a la salinidad ambiental, y como límite superior 36.3 psu, cuyo valor indica incrementos salinos del 5%, establecido por las regulaciones ambientales citadas.

3.2 Comparación con modelos comerciales

Para esta sección se compara la trayectoria del chorro obtenida del modelo numérico en OpenFOAM con los modelos comerciales VISJET y CORMIX.

Se establecen dos escenarios de comparación asociados al cumplimiento de normativa ambiental. Primero, un caso que indica dónde se alcanza el 10% de exceso salino respecto a la salinidad ambiental, y un segundo caso que indica el cumplimiento de un 5% de exceso salino. La disponibilidad de datos del modelo CORMIX queda restringida al estudio realizado por PRDW en 2010, del cual solo se tienen datos de entrada para los casos con velocidad de corriente ambiental $U_a = 0.35$ m/s y $U_a = 0.5$ m/s, y en escenarios donde el modelo logra un 10% de exceso salino.

La Figura 5 contrasta los resultados de los modelos comerciales VISJET y CORMIX, y el modelo numérico de OpenFOAM cuando éste alcanza una condición permanente. Para el análisis se selecciona la porta más lejana a la costa del sistema difusor, suponiendo que aquí ocurren las condiciones más desfavorables de dilución.

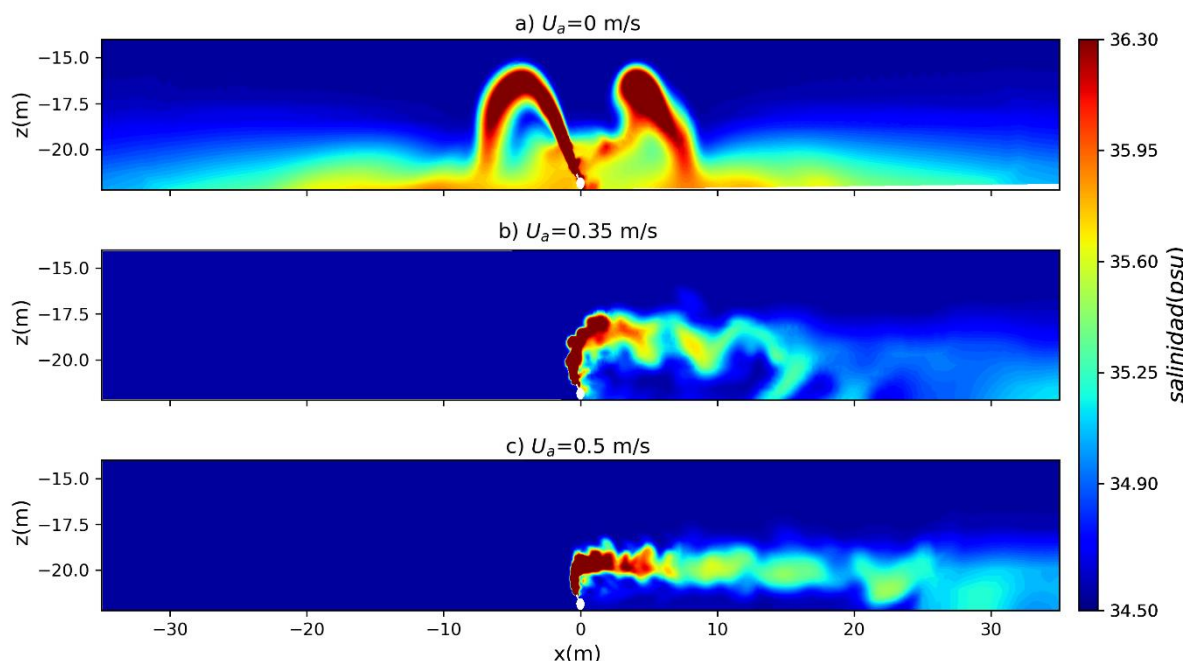


Figura 4. Vista en corte de la dilución del chorro de la última porta del difusor, bajo un estado permanente. La última porta actúa como un chorro contraflujo. El mínimo valor de la escala de salinidad indica la salinidad ambiental, por otro lado, el máximo corresponde al 5% de exceso salino respecto a la salinidad ambiental.

3.3 Formación de corrientes de densidad

La Figura 6 muestra la transitividad en el transporte de salmuera para el caso $U_a = 0$ en un corte y-z, donde el eje y indica la dirección del emisario submarino. El último panel de la Figura 6 representa un estado permanente de dilución para un tiempo $t = 1500$ s, que a su vez corresponde al tiempo simulado. Al igual que la sección previa, la escala de salinidad tiene como cota superior una salinidad que denota incrementos del 5% respecto a la salinidad ambiental.

3.4 Distribución salina en el fondo marino

La Figura 7 muestra una vista en planta de la distribución de concentraciones para el caso de U_a nulo. La curva en color negro corresponde al límite donde se cumple 1 psu de exceso, correspondiente a la normativa más restrictiva, según lo estudiado.

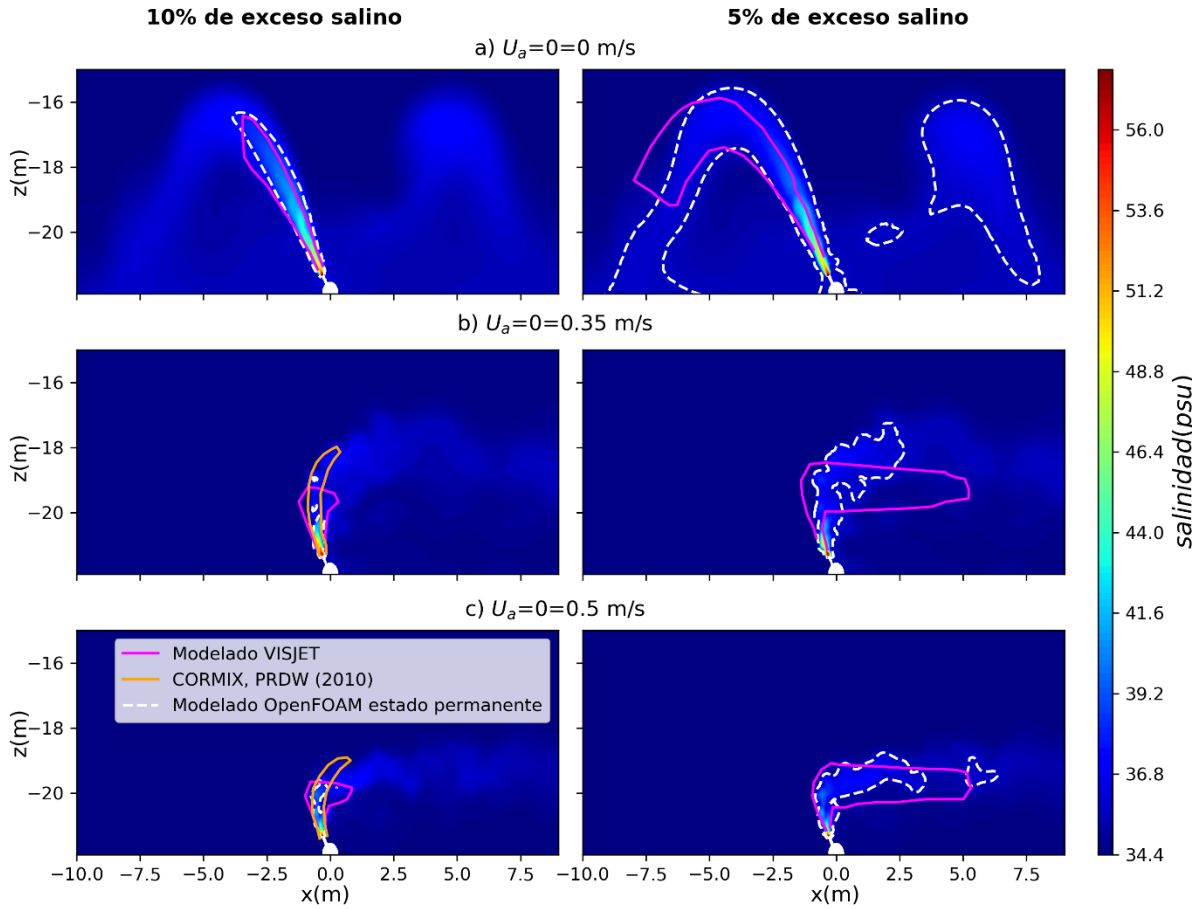


Figura 5. Comparación del modelo en OpenFOAM y modelos comerciales VISJET y CORMIX para un 10% y 5% de exceso salino. Escenario permanente en modelo numérico en OpenFOAM. Los datos del modelo CORMIX solo están disponibles para los casos $U_a=0.35$ m/s y $U_a=0.5$ m/s y en escenarios donde ocurre un 10% de exceso salino.

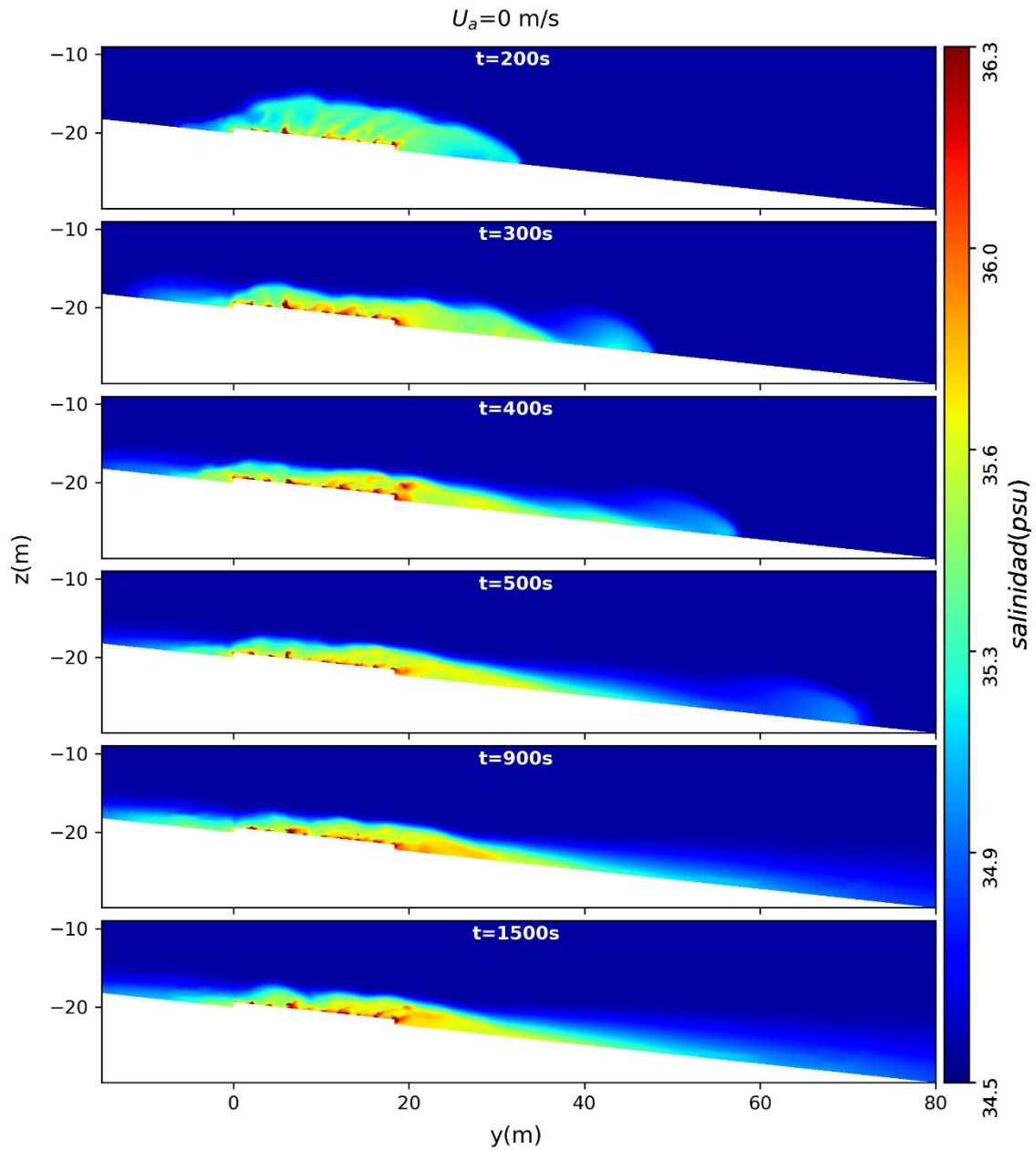


Figura 6. Corrientes de densidad en el tiempo para una velocidad ambiental U_a nula. Vista en corte z-y.

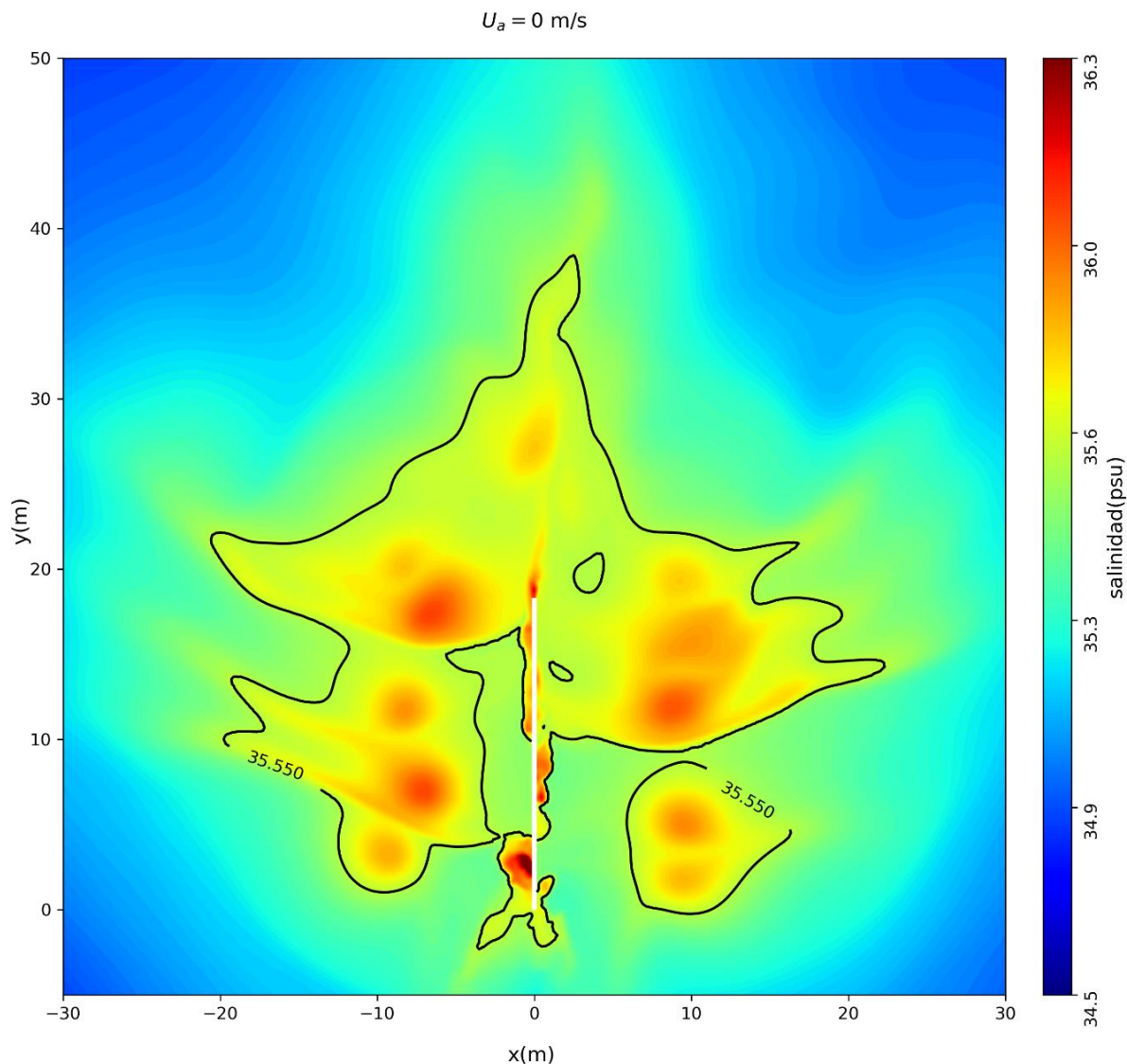


Figura 7. Salinidad en el fondo marino para una velocidad ambiental U_a nula, cuando el modelo alcanza la permanencia. Vista en planta.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados generales

Acorde a los resultados y a la literatura revisada, en el comportamiento de los chorros dominan procesos de transporte del tipo advectivos y difusivos. Las fuerzas advectivas predominan desde el instante que los chorros eyectan de cada porta, hasta lograr su altura máxima. Luego, los chorros descienden bajo la acción de fuerzas boyantes y comienzan a fusionarse, dando lugar a gradientes de concentración irregulares. A esta región, limitada por el impacto de la salmuera con el fondo marino, se le denomina campo cercano de dilución (Palomar et al., 2011; Baum et al., 2020). Posteriormente, la dilución guía el desarrollo de

una corriente de gravedad, donde el transporte queda sujeto a procesos difusivos, es decir a la turbulencia del medio. Esta zona se entiende como campo lejano de dilución.

Acorde a Abessi y Roberts (2014), en el proceso de descarga, cuando sucede la fusión entre chorros, ocurre una reducción importante en la dilución. Según los autores, la explicación para este fenómeno radica en el espaciamiento de las portas y la ocurrencia del efecto Coanda.

En difusores multipuerto, el efecto Coanda alude a la deflexión de los chorros causada por la presencia de un límite cercano o la interacción con chorros adyacentes, ocasionando fuerzas de presión capaces de desplazar esta corriente hacia el límite o en la dirección de los otros chorros (Abessi et al., 2014). Las consecuencias más notables suelen darse cuando la corriente descendente intenta reincorporarse a la circulación ascendente, acentuando la curvatura del chorro, y reduciendo la distancia de impacto y la dilución. Este efecto puede revisarse en mayor detalle en el trabajo de Muñoz (2021).

La Figura 4 revela la influencia que tiene la corriente marina U_a en la conducta de cada chorro. Para $U_a = 0.35$ m/s y $U_a = 0.5$ m/s (Figura 4b y 4c, respectivamente) tantos los chorros contraflujo y coflujo adquieren la misma dirección y sentido de la velocidad ambiental, por lo que las alteraciones salinas quedan situadas en un solo lado del difusor. Al contrario, una velocidad de corriente nula (Figura 4a) genera dilución a ambos lados del difusor.

La capa densa estratificada y la zona de impacto son evidentes en condiciones inactivas de corriente ambiental, no así en los casos que $U_a \neq 0$, en donde la distancia horizontal de impacto ocurre muy próxima al límite del dominio, lamentablemente, impidiendo analizar la distribución salina. En todo caso, en la medida que aumenta la magnitud de velocidad ambiental, incrementa el alcance horizontal de la pluma salina y su dilución en el ambiente.

4.2 Comparaciones con modelos comerciales

Los diseñadores de sistemas difusores, como el multipuerto, utilizan con frecuencia los modelos de momentum integral como una herramienta predictora de dilución en el campo cercano. En relación a las limitaciones de estos enfoques, no se modela la interacción con los límites del dominio, por lo que los resultados quedan acotados a un escenario previo al impacto de los chorros con el suelo. No se modela, tampoco, el campo lejano, el efecto Coanda, y la recirculación de salinidad producto del impacto. Además, el software VISJET no modela la fusión entre las plumas salinas.

Estos enfoques de momentum integral no modelan la interacción con los límites, por lo que sus resultados quedan acotados a la zona previa de impacto de los chorros con el lecho marino. Además, los softwares CORMIX y VISJET poseen nula sensibilidad a la profundidad de la columna de agua, no disponen de gráficos para la evolución de las variables, y en particular, el modelo VISJET no detecta la fusión entre chorros (Palomar et al., 2011).

Para comparar resultados bajo los mismos supuestos, inicialmente se decide trabajar con el modelo numérico en un estado previo al impacto del chorro con el suelo. Los resultados muestran que en general, las diluciones requeridas se logran en distribuciones espaciales iguales. Para más información ver el trabajo de Muñoz (2021).

4.2.1 Modelo numérico en estado permanente

Para el primer caso, donde ocurre un 10% de exceso salino, los resultados, tanto del modelo OpenFOAM como de los modelos de momentum integral, muestran que los niveles de dilución se logran en distribuciones espaciales horizontales y verticales similares. Del mismo modo, para un 5% de exceso salino, el modelo en VISJET subestima la altura del chorro respecto al modelo OpenFOAM. También, para el caso con U_a nula (Figura 5a), los valores de concentración en cuestión alcanzan el fondo marino. Los contornos originados fuera del rango de comparación, observables en la Figura 5a, aluden a niveles de concentración de chorros de dirección opuesta. Si bien, para el caso, los chorros no interfieren entre ellos, se prevé la ocurrencia de este fenómeno para niveles de concentraciones inferiores.

En definitiva, para un estado permanente del modelo OpenFOAM, las principales discrepancias se acentúan para niveles de concentración de exceso menores a un 5%, especialmente cuando la velocidad de corriente ambiental U_a es cercana a 0.

Los modelos CORMIX y VISJET, según lo mencionado en párrafos anteriores, no tienen la capacidad de interpretar el comportamiento posterior al impacto del chorro y su interacción con el lecho marino. El carácter transitorio del modelo OpenFOAM muestra las características que va adoptando el chorro en el tiempo, asociadas a efectos propios del impacto y la geometría del sistema. Este análisis puede ser visto con mayor detalle en Muñoz (2021).

4.3 Formación de corrientes de densidad

Una vez ocurrido el impacto del chorro con el lecho marino, la salmuera se convierte en una corriente de densidad. Factores como la pendiente geométrica acentúan este proceso, transportando las anomalías salinas a zonas lejanas respecto a la ubicación del difusor y acrecentando el área de influencia.

Del estado permanente de la Figura 7 se observa que la capa estratificada, limitada por 1 psu de exceso (normativa más restrictiva), se extiende 20 m aguas abajo desde la última porta, con un espesor máximo de aproximadamente 2.7 m. Para un corte perpendicular (x-z), en la ubicación de la última porta (Figura 4a), la extensión en el eje x consigue aproximadamente 9 m (posterior a la zona de impacto), por lo que el espesor decrece en una distancia más acotada. En la zona aguas arriba del emisario también se produce una capa densa estratificada, pero con concentraciones inferiores. La Figura 7, que representa un estado permanente del flujo, refleja que las irregularidades salinas abarcan todo el dominio del modelo, extendiéndose 60 metros aguas abajo de la porta más lejana a la costa.

Por lo tanto, para el caso analizado, el transporte de salmuera ocurre en todas las direcciones, sin embargo la pendiente de fondo indica la dirección dominante. Esta última, en comparación a otras direcciones, muestra valores más prominentes en la extensión y grosor de la capa densa estratificada.

El modelo de turbulencia implementado en este estudio no incluye el término asociado a la boyancia. En Muñoz (2021) se considera el número de Richardson de gradiente para analizar la influencia de no incorporar al término boyante, concluyendo con ello que se podría subestimar los niveles de dilución de la capa estratificada.

4.4 Distribución salina en el fondo marino

En la Figura 7, la zona de impacto de cada chorro queda caracterizada por niveles de salinidad levemente mayores respecto al área circundante. El radio de influencia de los chorros eyectados por las primeras portas es inferior en contraste a los demás, es decir, la dilución es más efectiva en las primeras portas. Coincidentemente estos corresponden a los chorros que mayor desplazamiento alcanzan. Este fenómeno estaría asociado a la mayor área de dilución disponible que tienen los primeros chorros de cada lado del emisario.

Para obtener una mayor confiabilidad en las condiciones salinas de fondo se recomienda representar de mejor manera las condiciones de borde con topografías más realistas y ejecutar un modelo de turbulencia que modele en detalle las interacciones con paredes ficticias.

5. CONCLUSIONES

En el estudio fueron aplicadas simulaciones numéricas del tipo CFD para caracterizar los fenómenos físicos en cuestión. Puntualmente, este trabajo caracteriza la trayectoria de chorros salinos descargados mediante un sistema difusor multipuerto alternado, perteneciente a la Planta desalinizadora Minera Candelaria, situada en la ciudad de Caldera. La variabilidad de los casos implementados reside en la magnitud de la velocidad ambiental uniforme U_a , contemplándose tres casos: (1) $U_a = 0 \text{ m/s}$, (2) $U_a = 0.35 \text{ m/s}$ y (3) $U_a = 0.5 \text{ m/s}$.

El fenómeno simulado considera los efectos del campo cercano pero también se extiende a regiones del campo lejano, en donde se puede ver el efecto de las corrientes del medio receptor.

La examinación de resultados mostró el efecto de U_a en el transporte de la pluma salina (Figura 4). En particular, para los casos (2) y (3), los chorros adoptan la dirección y sentido de la corriente ambiental, impactando en áreas cercanas al límite del dominio.

El estudio de Palomar (2011) expone las limitantes de modelos comerciales como CORMIX y VISJET. Entre las más importantes, no modelan el impacto de los chorros con el fondo marino, el modelo no se ajusta a las condiciones geométricas (como la pendiente de fondo) y además, VISJET no modela la interacción entre chorros. En contraposición, los modelos

CFD asumen menos hipótesis simplificadoras y consiguen describir la dilución desde el campo cercano al lejano, pero en un dominio acotado. Según los escenarios examinados, las principales diferencias surgen con el modelo CFD en condiciones permanentes y para concentraciones de exceso salino menores o iguales al 5%. (Figura 5). Aquí, dichas concentraciones tocan el fondo marino y se distribuyen en él, correspondiente a un fenómeno más realista del comportamiento del chorro.

El modelo implementado para $U_a = 0$ contempla un análisis de campo lejano, del cual fue posible examinar las concentraciones en el lecho marino y el transporte de la corriente salina. Los modelos comerciales, como fue mencionado anteriormente, no resuelven este tipo de fenómenos, los cuales contribuyen a nuevas perspectivas para la estimación de la influencia salina y su impacto en la vida marina circundante.

El análisis en cuestión muestra que, una vez producido el impacto, el traslado de salmuera ocurre en todas las direcciones, predominando la trayectoria asociada a la pendiente de fondo (Figuras 3.3 y 3.4). Su constante eyección al ambiente forma una capa densa estratificada, que, para el caso, se presume una subestimación en los niveles de concentración que la componen, puesto que el modelo de turbulencia no incluye el término boyante. Por su parte, el análisis de concentraciones salinas en el fondo permite estimar el área en la que se excede una concentración en particular y la extensión que abarca en el lecho marino.

En Chile no existe regulación ambiental asociada a la dispersión de descargas salinas en el océano. Esto cobra especial relevancia si la biota marina que reside en las costas es endémica de la zona, puesto que la sensibilidad de estas especies ante anomalías salinas son desconocidas.

El modelo numérico generado presenta un panorama general de la dilución en el sistema. Para futuros trabajos podría considerarse: 1) aplicar un enfoque cuasi-permanente para la resolución de ecuaciones, a modo de reducir el costo computacional; 2) implementación de un modelo de turbulencia que describa las interacciones con el lecho marino; 3) una representación más realista de la batimetría; 4) corrientes marinas no uniformes en la vertical; 5) estratificación de densidad propia de la zona; 6) análisis de campo lejano para $U_a \neq 0$; 7) distribución no uniforme de caudal de salmuera en las portas del difusor; 8) efecto de las olas en la dilución de salmuera; 9) efectos de la marea en la variación de densidad ambiental; 10) efectos en la conducta de los chorros producto de la porosidad del suelo marino; y 11) las potenciales infiltraciones salinas hacia capas de suelo más profundas. 12) Incorporación a un modelo de campo lejano, que incluya toda la bahía (Telemac3D, EFDC, Delft3D, Mike3, ROMS, etc.)

El análisis presentado entrega perspectivas adicionales en el modelado del sistema marino local, pero carece de una visión integrada de los procesos que ocurren en la bahía de Caldera. En este sentido, se sugiere un análisis posterior para incorporar tales aspectos, con tal de verificar si en el largo plazo la descarga es inocua ambientalmente.

AGRADECIMIENTOS

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercomputación del NLHPC (ECM-02). AM agradece a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) por: ANID-Subdirección de Capital Humano/ Doctorado Nacional /2021-21212042. DM, AM y YN agradecen a ANID por los fondos otorgados ANID Project AFB180004.

REFERENCIAS

- Abessi, O., Roberts, J. 2014a. Multiport diffusers for dense discharges. *Journal of Hydraulic Engineering* 140 (2): 04014032.
- Baum, M., Gibbes, B., 2020. Field-Scale Numerical Modeling of a Dense Multiport Diffuser Outfall in Crossflow. *Journal of Hydraulic Engineering* 146(1): 05019006.
- Kress, N. 2019. Marine impacts of seawater desalination: Science, Management, and Policy. Elsevier.
- Lattermann, S., Höpner, T. 2008. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination* 220(1–3), 1–15.
- Muñoz, D. M. (2021). *Modelación numérica de corrientes salinas inducidas por salmuera de desalinización en la zona costera de la Planta desalinizadora Minera Candelaria, región de Atacama*. Memoria para optar al Título de Ingeniera Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Palomar, P., Lara, J., Losada, I., Rodrigo, M., Álvarez, A. 2012. Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools. *Desalination* 290, 14-27.
- Palomar, P., Losada, I.J. 2011. Impacts of brine discharge on the marine environment. Modelling as a predictive tool. Environmental Hydraulic Institute “IH Cantabria”, Universidad de Cantabria.
- Panagopoulos, A., Haralambous, K., Loizidou, M., 2019. Science of the Total Environment Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. *Science of the Total Environment* 693.
- PRDW-AV. 2010. Proyecto Planta Desalinizadora Minera Candelaria: Evaluación de pluma de descarga de agua salada en el medio marino. Recuperado de: <https://www.sea.gob.cl/>
- SCCWRP. 2012. Management of brine discharges to coastal waters recommendations of a science advisory panel. Southern California Coastal Water Research Project, Technical Report 694.
- SCCWRP. 2012. Management of brine discharges to coastal waters recommendations of a science advisory panel. Southern California Coastal Water Research Project, Technical Report 694.
- Zhang, S., Law, A., Jiang, M. 2017. Large eddy simulations of 45° and 60° inclined dense jets with bottom impact. *Journal of Hydro-Environment Research* 15 (1), 54–66.

ACERCA DE LA AUTORA Y LOS AUTORES

Daniela Muñoz es Ingeniera Civil mención Hidráulica de la Universidad de Chile. Actualmente se desempeña como ingeniera en el área hidráulica del Advanced Mining Technology Center. Sus áreas de interés son la hidrodinámica ambiental, modelación numérica e hidráulica marítima.

Aldo Muñoz es Ingeniero Civil y Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile. Actualmente es ingeniero en investigación y desarrollo en AMTC y estudiante de doctorado en Fluidodinámica de la Universidad de Chile. Su área de trabajo se centra en la construcción e implementación de modelos numéricos de flujos y fenómenos de transporte en general.

Luis Zamorano es Ingeniero Civil mención Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Es el Jefe del Área de Investigación, Innovación y Desarrollo del Instituto Nacional de Hidráulica. Sus áreas de interés son mecánica de fluidos, métodos numéricos, hidráulica fluvial y de costas.

Yarko Niño es Ingeniero Civil mención Hidráulica de la Universidad de Chile, M.Sc. y Ph.D. in Civil Engineering de la Universidad Illinois en Urbana-Champaign, EEUU. Es académico y Profesor Titular de la Universidad de Chile. Profesor de Ingeniería Civil, Magíster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Doctorado en Fluidodinámica y Doctorado en Ingeniería Civil. Sus áreas de interés son hidráulica ambiental, flujos geofísicos, transporte de sedimentos, métodos numéricos y técnicas experimentales.

AVANCES EN LA APLICACIÓN DE MODELOS ALUVIONALES Y PRINCIPALES DESAFÍOS

ALEX GARCÉS¹, SANTIAGO MONTSERRAT²

¹Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile, Santiago, Chile.

alex.garces@amtc.cl

²Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile, Santiago, Chile.

santiago.montserrat@amtc.cl

RESUMEN

El constante crecimiento de las capacidades computacionales ha permitido el desarrollo de modelos de flujos aluvionales cada vez más complejos y de mayor nivel de detalle. Los flujos aluvionales son mezclas de agua y sedimento que pueden llegar a tener características de flujo muy distintas a la de un flujo de agua. En este trabajo se presentan los principales enfoques para representar la física detrás de estos flujos. Luego, se discuten algunas de las limitantes de estos modelos y cómo este grupo de investigación ha abordado tales deficiencias en los últimos años. Finalmente se concluye acerca de cuáles son las carencias de los modelos que necesitan mayor atención para lograr una mejor representación de la física asociada a los flujos aluvionales.

Palabras claves: Flujos de detritos, modelación numérica, evaluación de amenazas.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Crecidas líquidas que se transforman en flujos aluvionales son comunes en zonas de alto relieve. Las altas pendientes de los Andes central generan que las precipitaciones intensas sean el principal gatillante de los flujos aluvionales. En el norte de Chile, el rápido crecimiento de la población se ha traducido en una expansión de la ciudad hacia áreas más vulnerables como por ejemplo los abanicos aluviales (Izquierdo et al., 2021). A modo de ejemplo, aluviones ocurridos en Suiza durante el periodo 1972-2007 resultaron en 24 muertos y daños por 380 millones de dólares. Por el contrario, los 5 eventos más grandes ocurridos en Chile en el periodo 1980-2017 dejaron cerca de 1000 muertos/desaparecidos y los daños fueron evaluados sobre los 1600 millones de dólares (Zegers et al., 2020).

Los flujos de detritos son escurrimientos complejos donde actúan distintos esfuerzos debido a las interacciones fluido-fluido, fluido-partícula y partícula-partícula (Iverson, 1997). Para representar su comportamiento, se han desarrollado distintos modelos los cuales se han vuelto muy útiles para proyectos de evaluación de peligros. En este sentido, es deseable que el modelo utilizado sea capaz de representar principios científicos como la conservación del momento y la masa, y ser capaz de replicar datos experimentales y/o de terreno. Si bien los modelos que simplifican física del movimiento tienen un valor conceptual limitado, estos ofrecen una metodología útil de uso práctico (Jakob et al., 2005).

Actualmente, existe una variada oferta de modelos que representan flujos de detritos con ventajas y desventajas que deben ser sopesadas por el usuario para elegir correctamente el modelo que mejor se ajuste a sus necesidades. En este sentido, una revisión de los principales modelos es imprescindible para tomar la decisión correcta sobre qué se está modelando y cuál modelo se ajusta mejor a ese fenómeno.

El objetivo de este trabajo es presentar al lector las distintas metodologías para representar la física detrás del movimiento de flujos de detritos. Luego, este estudio se centra en los principales focos de investigación o necesidades más urgentes para mejorar los estudios de peligro aluvional. Finalmente, el estudio presenta la aplicación de dos modelos. El primero corresponde a un modelo comercial ampliamente utilizado en proyectos de evaluación de peligro, mientras que el segundo corresponde a un modelo de código abierto, recientemente desarrollado para mejorar los modelos existentes por medio de la incorporación de nuevas relaciones que intentan explicar, con una base física, los esfuerzos que dominan el movimiento y el transporte de sedimentos.

2. ENFOQUES PARA REPRESENTAR LA FÍSICA DE FLUJOS DE DETRITOS

2.1 Enfoque Euleriano vs Lagrangiano y Monofásico vs Bifásico.

El agua y los sedimentos que esta transporta son evidentemente dos medios distintos. Sin embargo, en algunos casos es posible simplificar la física detrás de estos flujos considerando la mezcla observada como un fluido equivalente con propiedades distintas a las del agua sin sedimentos. Esta consideración implica una decisión importante acerca de si utilizar un modelo monofásico o bifásico.

En el caso de un enfoque euleriano, en donde nos enfocamos en las propiedades integrales de la mezcla desde un volumen de control definido, tanto un modelo monofásico como bifásico son posibles. Por el contrario, el enfoque lagrangiano es intrínsecamente bifásico debido a que este identifica cada partícula y sigue sus trayectorias.

Para el enfoque Euleriano son necesarias 3 ecuaciones: (a) ecuación de continuidad para la conservación de masa, (b) balance de fuerzas operando dentro y fuera del fluido aparente y (c) ecuación constitutiva del continuo (Takahashi, 2014). Las ecuaciones asociadas a (a) y (b) corresponden a las ecuaciones de la mecánica de fluidos clásica, ecuación (1). Mientras que la tercera ecuación depende de si el modelo a elegir es monofásico o bifásico.

Cuando se elige el modelo euleriano monofásico, es necesario establecer un modelo constitutivo que represente implícitamente las interacciones dentro de la mezcla sólido líquido, lo que se conoce como modelo reológico. La reología de un fluido es aquella relación entre su tasa de deformación angular y el esfuerzo necesario para dicha deformación. En mecánica de fluidos, la ley de resistencia es la ley constitutiva que relaciona la reología con el comportamiento macroscópico del flujo de un fluido aparente, ecuaciones (2) a (5).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_i) \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho \vec{g}$$
(1)

En la ecuación (1), u_i corresponde a la componente de velocidad en $i \in \{x, y, z\}$, ρ corresponde a la densidad del fluido equivalente, t al tiempo, p a la presión y $\vec{g}$ representa la aceleración de gravedad. Además, τ_{ij} esta determinada por uno de los siguientes modelos reológicos (Takahashi, 2014):

Newtoniano: $\tau = \mu(du/dz)$ (2)

Fluido de Bingham: $\tau = \tau_y + \eta(du/dz)$ (3)

Fluido de Herschel-Bulkley: $\tau = \tau_y + K_1(du/dz)^n$; con $n > 1$ (4)

Fluido dilatante: $\tau = \tau_y + K_2(du/dz)^n$; con $n < 1$ (5)

En estos modelos reológicos, μ corresponde a la viscosidad dinámica, η se denomina viscosidad de Bingham. Para los fluidos de Herschel-Bulkley y dilatante, las constantes K_1 , K_2 y n son parámetros de ajuste.

En el caso de un modelo euleriano bifásico, este corresponde más bien a un modelo acoplado Euler-Euler. Es decir, se tienen dos ecuaciones de conservación de momentum para las fases sólida y líquida (Takahashi, 2014). En consecuencia, el set de ecuaciones a resolver es:

$$\frac{\partial \epsilon_s u_i^s}{\partial x_i} + \frac{\partial \epsilon_f u_i^f}{\partial x_i} = 0$$

$$\rho_s \left(\frac{\partial(\epsilon_s u_i^s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_s u_i^s u_i^s) \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^s}{\partial x_i} + \vec{F}_{fs} + \epsilon_s \rho_s \vec{g}$$

$$\rho_f \left(\frac{\partial(\epsilon_f u_i^f)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_f u_i^f u_i^f) \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^f}{\partial x_i} + \vec{F}_{fs} + \epsilon_f \rho_f \vec{g}$$
(6)

Donde los superíndices s y f , definen las fases sólida y líquida, respectivamente.

El modelo lagrangiano (bifásico), sigue la segunda ley de Newton $\vec{F} = m\vec{a}$ donde $\vec{F}$ son las fuerzas aplicadas a una determinada partícula, m su masa y $\vec{a}$ su aceleración. En general, las principales fuerzas que actúan sobre una partícula para este modelo son (Sun y Xiao, 2016):

$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = f^{col} + f^{lub} + f^{fp} + m\vec{g}$$

$$I \frac{d\Psi}{dt} = T^{col} + T^{lub} + T^{fp}$$
(7)

donde $\vec{g}$ representa la aceleración de gravedad, f^{col} representa las fuerzas debido a colisiones partícula-partícula o partícula-pared, f^{lub} los esfuerzos de lubricación debido al fluido comprimido entre partículas y f^{fp} los esfuerzos fluido-partícula (arrastre, sustentación, masa agregada y boyancia). Por otra parte, I y Ψ corresponden al momento angular de inercia y

velocidad angular, respectivamente. T^{col} , T^{lub} y T^{fp} corresponden a los torques generados producto de las fuerzas de contacto, lubricación e interacciones fluido-partícula (Sun y Xiao, 2016).

Por otra parte, el medio fluido sigue las ecuaciones de continuidad y conservación de momentum clásicas, pero estas deben ser modificadas para considerar la presencia de partículas. En consecuencia, la Ec. (6) difiere de la Ec. (8) en que el enfoque lagrangiano calcula las trayectorias de los granos asociados a la fase sólida.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon_s u_i^s}{\partial x_i} + \frac{\partial \epsilon_f u_i^f}{\partial x_i} &= 0 \\ \rho_f \left(\frac{\partial (\epsilon_f u_i^f)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\epsilon_f u_i^f u_i^f) \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \epsilon_f \rho_f \vec{g} + \epsilon_f \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \vec{F}_{fp} \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 Modelos numéricos

Con el desarrollo de los computadores y supercomputadores, la resolución de los modelos matemáticos previamente mencionados se realiza a través de modelos numéricos cada vez más sofisticados. Por ejemplo, el enfoque lagrangiano resulta en representaciones muy acabadas de la física del movimiento de mezclas sólido-líquidas. Sun y Xiao (2016) realiza simulaciones utilizando de 4 a 512 procesadores. La cantidad de partículas por su parte varía entre 0.3 y 40 millones mientras que el número de celdas es de aproximadamente 1.3 millones. Sin embargo, las geometrías testeadas por estos autores no superan los $20 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, dejando en evidencia que su principal desventaja radica en el alto costo computacional que demandan (512 procesadores versus 4 a 8 procesadores en un computador de escritorio). En consecuencia, el enfoque lagrangiano no es escalable a flujos geofísicos si se mantiene el tamaño de las partículas en la realidad y en el modelo.

Actualmente, los modelos numéricos bidimensionales de enfoque euleriano son los más utilizados en proyectos de evaluación de peligros debido a su buen balance entre costo computacional y nivel de representación.

2.2.1 Modelos comerciales bidimensionales más usados

Estos modelos bidimensionales se basan en la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} &= 0 \\ S_{f_x} &= S_{0_x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \\ S_{f_y} &= S_{0_y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \end{aligned} \quad (9)$$

donde V_x y V_y son las velocidades integradas en la dirección vertical del escurrimiento, h es la profundidad de escurrimiento, S_{0_x} y S_{0_y} la pendiente del terreno en las direcciones x e y ,

respectivamente. Por último, S_f es la pendiente de la línea de energía o pendiente de fricción, la cual representa la resistencia al flujo. Existen múltiples expresiones para S_f , de las cuales ocho expresiones son estudiadas en detalle por Naef et al. (2006) para un modelo unidimensional. A continuación, se describen los modelos bidimensionales más usados.

FLO-2D utiliza la denominada relación cuadrática (O'Brien et al., 1993; O'Brien y García, 2009).

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (10)$$

donde τ_y es el esfuerzo de fluencia, γ_m el peso específico de la mezcla sólido líquido, h y V la profundidad y velocidad de escurrimiento en la celda específica, respectivamente, K corresponde a un parámetro de resistencia laminar, η a la viscosidad dinámica de la fase fluida y n_{td} a un pseudo-número de Manning el cual es corregido por la concentración de sedimento. Adicionalmente, O'Brien y García (2009) proponen relaciones empíricas para los parámetros τ_y , η y n_{td} que dependen de ciertos coeficientes de calibración y la concentración volumétrica de sólidos.

RAMMS emplea un modelo de fricción denominado Voellmy (Salm et al., 1990; Salm, 1993; Christen et al., 2010).

$$S_f = \mu N + \frac{\rho g V^2}{\xi} \quad (11)$$

donde el primer término del lado derecho corresponde a la fricción seca de Coulomb y el segundo término a la fricción viscosa-turbulenta. $N = \rho g h \cos(\phi)$ corresponde al esfuerzo normal sobre la superficie, mientras que μ y ξ son parámetros de calibración.

HECRAS-2D ha lanzado recientemente su módulo de flujos de detritos con reologías no-Newtonianas (USACE, 2020). Este modelo incorpora varias leyes de resistencia, las cuales pueden ser elegidas dentro del programa. Los modelos incluidos corresponden a Bingham (Ec. 12), ecuación generalizada de Herschel-Bulkley (Ec. 13), modelo cuadrático (Ec. 14) y modelo flujo de granos/clastos que incorpora el modelo de fricción de Coulomb (Ec. 15).

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{\eta}{\gamma_m h} \left(\frac{3V}{h} \right) \quad (12)$$

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{\eta}{\gamma_m h} \left(\frac{3V}{h} \right) + \frac{l_m^2}{gh} \left(\frac{3V}{h} \right)^2 + \frac{0.01\rho_s}{\gamma_m h} \left(\left(\frac{0.615}{C_v} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^{-2} d_s^2 \left(\frac{3V}{h} \right)^2 \quad (13)$$

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K}{\gamma_m h} \left(\frac{3V}{h} \right)^n \quad (14)$$

$$S_f = \frac{\tau_c}{\gamma_m h} + \frac{\sigma \tan \phi}{\gamma_m h} \quad (15)$$

El término $(3V/h)$ corresponde a la tasa de deformación angular que HEC-RAS supone en cada celda. Notar que el modelo de Bingham, Ec. (12), es equivalente a los dos primeros términos del modelo cuadrático, Ec. (13), es decir, su diferencia radica en que esta relación

no considera los esfuerzos turbulentos-dispersivos del modelo de O'Brien et al. (1993). En consecuencia, el modelo de Bingham debe ser usado con cuidado, ya que sólo es válido para flujos dominados por los esfuerzos viscosos. Para el modelo de Herschel Bulkley, Ec. (14), ocurre lo mismo y sólo es válido cuando dominan los esfuerzos viscosos. Otra particularidad del modelo HECRAS es que la fricción de Coulomb puede ser activada para los modelos de las Ec. (12), (13) y (14) con el fin de estimar el esfuerzo de fluencia τ_y . Por el contrario, el modelo de Coulomb sólo actúa como un esfuerzo umbral en el caso que se seleccione el modelo reológico definido por la Ec. (15).

2.2.2 Desarrollo de nuevos modelos numéricos

Rauter et al. (2018) crearon el modelo faSavageHutterFOAM a partir de un esquema de áreas finitas para flujos granulares tridimensionales propuesto por Rauter & Tukovic (2018). El método de áreas finitas discretiza toda variable dependiente ϕ por medio de la aproximación de valor medio (*mean value approximation*). Es decir, los valores y parámetros relacionados son almacenados en el centroide de cada elemento y en el centro de las aristas que forman el perímetro de la grilla. Esta discretización geométrica induce un error de segundo orden en el cálculo de flujos advectivos. La formulación de este modelo resuelve ecuaciones diferenciales parciales de superficie, las cuales son populares en la comunidad que estudia películas delgadas de fluido. Lo interesante de este modelo es que las ecuaciones gobernantes son resueltas en una superficie tridimensional y, en consecuencia, la velocidad es un campo vectorial tridimensional que preserva efectos en la dirección del flujo como la fuerza centrífuga. Esta dualidad se logra calculando las contribuciones a las ecuaciones de conservación en el sistema de coordenadas global y luego proyectándolas sobre las componentes tangencial y normal a la superficie. Si bien el uso de mallas no estructuradas permite este tipo de aplicaciones, se debe tener en cuenta que luego la información requiere un re-muestreo o una transferencia alternativa a sistemas de información geográfica (SIG). El sistema de ecuaciones que resuelve este modelo consta de 3 ecuaciones: (a) Ecuación de continuidad promediada en la vertical, (b) conservación de momentum tangente a la superficie y (c) conservación de momentum normal a la superficie. En (c) se calcula la presión basal, la cual es suficiente para describir los principales efectos de la curvatura de la superficie. Debido a que este modelo fue generado para el estudio de avalanchas, la tasa de incorporación (*entrainment*) es calculada para una cobertura de nieve de profundidad específica.

Si bien el modelo recién descrito fue desarrollado para avalanchas de nieve, González (2021) modificó faSavageHutterFOAM para generar una herramienta dedicada a la simulación numérica de aluviones. OpenFOAM permite crear librerías que contienen clases y, a su vez, subclases que heredan funciones de sus clases principales. La gran ventaja de usar dicha herencia es que los modelos son intercambiables con gran facilidad. González (2021) aprovechó esta versatilidad de OpenFOAM para modificar la ley de resistencia y las funciones de erosión/depositación para enfocarlas en flujos aluvionales. Por esta razón llamó al modelo desarrollado por él debrisfaSavageHutterFOAM. Las mejoras implementadas radican en: (a) condición de borde de entrada al modelo en función de un hidrograma de

entrada, (b) leyes de resistencia (c) incorporación de procesos de erosión/depositación y consecuente modificación del terreno, (d) densidad variable del fluido modelado.

Las condiciones de borde del modelo fueron mejoradas respecto a su predecesor incorporando la funcionalidad de declarar un hidrograma de entrada. Las leyes de resistencia disponibles en este modelo corresponden a Manning-Strickler, modelo cuadrático cuadrático (ecuación (9); O'Brien y García, 2009), Voellmy cuadrático (ecuación (10); Salm, 1993), y VoellmyManning.

Otro modelo numérico interesante es debrisInterMixingFOAM, desarrollado por von Boetticher et al. (2016). Este mdelo está basado en interFOAM, el cual es un modelo para la representación del flujo de dos fases inmiscibles e incompresibles en volúmenes finitos. debrisInterMixingFOAM corresponde a un modelo tridimensional trifásico y de enfoque euleriano. DebrisInterMixingFOAM reproduce 3 fases correspondientes al aire, el barro (agua y sedimento fino) y la grava. El barro es representado por un modelo Herschel-Bulkley, mientras que la grava con un modelo viscoplastico de Coulomb. Para mantener los tiempos de cálculo razonables, se utilizada la aproximación VoF (*volume of fluid*) la cual combina las distintas fases en una ecuación de Navier-Stokes única por medio de un promedio ponderado en cada celda. La aproximación VoF impone las condiciones expuestas en Ec. (11).

$$\begin{aligned}
 \rho_{cell} &= \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \rho_3 \alpha_3 \\
 \mu_{cell} &= \mu_1 \alpha_1 + \mu_2 \alpha_2 + \mu_3 \alpha_3 \\
 \mu_2 &= (\dot{\gamma}_{cell}) \\
 \mu_3 &= (p_{cell}, \dot{\gamma}_{cell}) \\
 \bar{u}_1 &= \bar{u}_2 = \bar{u}_3 = \bar{u}_{cell} \\
 p_1 &= p_2 = p_3 = p_{cell}
 \end{aligned} \tag{11}$$

donde los subíndices 1, 2 y 3 corresponden al aire, barro y grava, respectivamente. ρ_i y μ_i corresponden a la densidad y viscosidad equivalente de la fase i . Las variables u_i y p_i corresponden a la velocidad y presión de la fase i .

Estas características logran que este sea un modelo con gran nivel de detalle en la estructura interna del flujo, lo cual no es posible en modelos de áreas finitas. Sin embargo, el nivel de complejidad de este modelo afecta directamente en el costo computacional, y por ende, en los tiempos de simulación. Más aún, dependiendo de la capacidad computacional disponible, la modelación en topografías complejas puede volverse impracticable debido al refinamiento de la malla necesario, por ejemplo, para estimar correctamente las funciones de pared. Para la modelación de geometrías prismáticas, en cambio, debrisInterMixingFOAM resulta útil para estudiar fenómenos asociados a la estructura del flujo como, por ejemplo, la formación de estelas o capas de mezcla.

Cabe mencionar que el cálculo de la viscosidad equivalente de la celda como una ponderación de las viscosidades de las fases puede resultar un enfoque aceptable cuando se trata del flujo de una mezcla única. Sin embargo, para entender los procesos de mezcla en la confluencia de un flujo de detritos hiperconcentrado (quebrada) y un flujo de agua (río), el

enfoque de González (2021) parece ser mejor que debrisInterMixingFOAM. El enfoque de debrisfaSavageHutterFOAM corresponde al seguimiento de la concentración volumétrica de sedimentos C_V en cada celda y el cálculo de una reología en función de este parámetro, logrando que la reología de ambos flujos confluentes dependa del mismo parámetro C_V .

3. FOCOS DE INVESTIGACIÓN Y APLICACIONES

3.1 Avances en la representación de la erosión

La incorporación de agua y sedimentos del suelo subyacente a un flujo aluvional puede aumentar su volumen y/o cambiar la reología interna o basal del flujo y, en consecuencia, su movilidad (McDougall y Hungr, 2005; Iverson, 2012). Por lo tanto, describir correctamente los procesos de erosión y depositación en un flujo de detritos es clave para mejorar estudios de zonificación de amenaza. Los modelos de erosión presentan dos enfoques principales, modelos empíricos y modelos basados en procesos físicos. Los modelos empíricos destacan por su practicidad y ocupan generalmente una tasa de erosión. Por ejemplo, Takahashi et al. (1992) propusieron un método que incorpora sedimentos al flujo hasta alcanzar una concentración de equilibrio C^∞ . Varios autores han representado la incorporación de sedimentos con un parámetro empírico de erosión, E (Egashira et al., 2001; Cao et al. 2004; McDougall y Hungr, 2005; Frank et al. 2015). Además de su practicidad, otra ventaja del parámetro E radica en que este puede ser fácilmente reemplazado por una expresión basada en procesos físicos.

Por otra parte, los modelos de erosión/sedimentación basados en procesos físicos todavía representan un gran desafío y no existe consenso en cuáles son los procesos que dominan la incorporación de sedimentos al flujo. Iverson (2012) propone una relación para la tasa E , la cual sólo es válida si la presión de poros en el suelo crece lo suficiente como para licuar el sustrato. Los sustratos de bajo grado de compactación y/o saturados son especialmente susceptibles a este tipo de crecimiento en la presión de poros y consecuente licuefacción. La desventaja de esta expresión es que E es inversamente proporcional a la velocidad, lo que resulta en tasas de erosión despreciables para velocidades altas y tasas de erosión muy altas para velocidades bajas, lo cual resulta contra-intuitivo (Pudasaini y Fischer, 2020).

En estricto rigor, para representar la erosión/depositación como un proceso físico, un modelo bifásico se hace necesario para considerar explícitamente las interacciones entre las fases sólida y líquida (Pudasaini, 2012). Pudasaini y Fischer (2020) desarrollaron un nuevo modelo basado en el modelo bifásico de Pudasaini (2012), el cual considera procesos físicos para la erosión y depositación. Estos autores encontraron que la erosión ocurriendo en la interfaz flujo-sustrato depende de la boyancia, densidades, coeficientes de fricción y, especialmente, de las concentraciones volumétricas que varían dinámicamente.

3.2 Incertidumbre asociada a los parámetros reológicos de modelos numéricos.

En la sección 2 se detalló cómo distintos modelos intentan representar, en mayor o menor medida, la física detrás del escurrimiento de flujos de detritos. Sin embargo, la aparición de

ciertos parámetros de calibración en los modelos reológicos es inevitable (Ec. 10 a 15). En este sentido, identificar los parámetros más sensibles del modelo reológico y las variables que mejor restringen la búsqueda de estos parámetros permiten una mejor calibración del modelo reológico. La calibración de estos modelos es especialmente difícil cuando se tiene muchos parámetros de calibración ya que se corre el riesgo de que el modelo presente equifinalidad. La equifinalidad se caracteriza por lograr un resultado similar bajo distintas combinaciones de los parámetros de calibración.

Zegers et al. (2020) realizaron un análisis de sensibilidad para el modelo numérico FLO-2D y establecieron los parámetros más sensibles en dicho modelo. En su estudio, concluyeron que la equifinalidad estaba presente en el modelo, principalmente relacionada con los parámetros reológicos. Esto sugiere que el modelo reológico de FLO-2D todavía carece de una base física suficiente y, por lo tanto, su uso requiere conocimiento experto. Si bien estos autores encontraron que las características morfológicas de la cuenca influyen en el grado de sensibilidad de los parámetros del modelo, en los dos abanicos aluviales estudiados se encontró que los parámetros con mayores sensibilidades corresponden a un parámetro relacionado con la viscosidad dinámica (β_1) y un parámetro asociado con la detención del flujo (SD).

Zegers et al. (2020) lograron demostrar que la calibración por área de inundación afectada y volumen depositado también restringe la velocidad del flujo y la altura del flujo. Esto resulta clave para reproducir eventos aluvionales sin control fluviométrico donde no se tienen datos de velocidad ni altura de flujo.

3.3 Sistema de soporte para la decisión de parámetros reológicos (SS)

Basado en los aprendizajes reportados por Zegers et al. (2020) y su algoritmo, Garcés et al. (2021) desarrollaron un sistema de soporte (SS) para la decisión de parámetros reológicos. SS es capaz de generar una distribución normal de N dimensiones para N parámetros con el fin de barrer todas las posibles combinaciones de parámetros reológicos dentro de un rango factible.

Los parámetros de calibración que considera SS se definen a continuación. $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ corresponden a los parámetros reológicos del modelo cuadrático (O'Brien y García, 2009), C_V^{mean} la concentración volumétrica media de sedimentos de la mezcla sólido-líquida, Vol_{sed} el volumen de sedimentos total movilizado por el aluvión, SD parámetro de detención del flujo, K un parámetro de resistencia laminar y n número de Manning convencional. En total, SS tiene la capacidad de calibrar 9 parámetros. Sin embargo, no se recomienda incluir los 9 parámetros debido a la equifinalidad identificada por Zegers et al., (2020). Garcés et al. (2021) emplearon el SS con sólo 4 parámetros de calibración ($\beta_1, \beta_2, C_V^{mean}, Vol_{sed}$). A excepción de SD , estos 4 parámetros corresponden a los parámetros más sensibles del modelo. El parámetro SD , en cambio, fue estimado en base a observaciones de terreno respecto de la profundidad del depósito.

Para determinar los modelos que mejor se ajustan a lo observado en terreno, el SS asigna los píxeles dentro del depósito observado en terreno como “observados positivos” (OP) y los

píxeles fuera del área de depósito como “observados negativos” (ON). Los píxeles inundados por la simulación numérica se asignaron como “pronosticados positivos” (PP), mientras que los píxeles no inundados como “pronosticados negativos” (PN). Finalmente, las áreas correctamente reproducidas se asignan como “verdaderos positivos” ($TP = OP \cap PP$) y las áreas incorrectamente reproducidas como “falsos positivos” ($FP = ON \cap PP$). En la Figura 1.a y 1.b se presentan las áreas OP y ON determinadas por Garcés et al. (2021) en base a las caracterizaciones de terreno de Cabre et al. (2020) para delimitar las áreas afectadas por dos oleadas de detritos (facies F1 y F2). En la Figura 1.c y 1.d se presenta la distribución de áreas correctamente reproducidas vs incorrectamente reproducidas para las dos oleadas. El SS detecta los casos que maximizan el área correctamente reproducida ($Area^{TP}$) y minimizan el área incorrectamente reproducida ($Area^{FP}$).

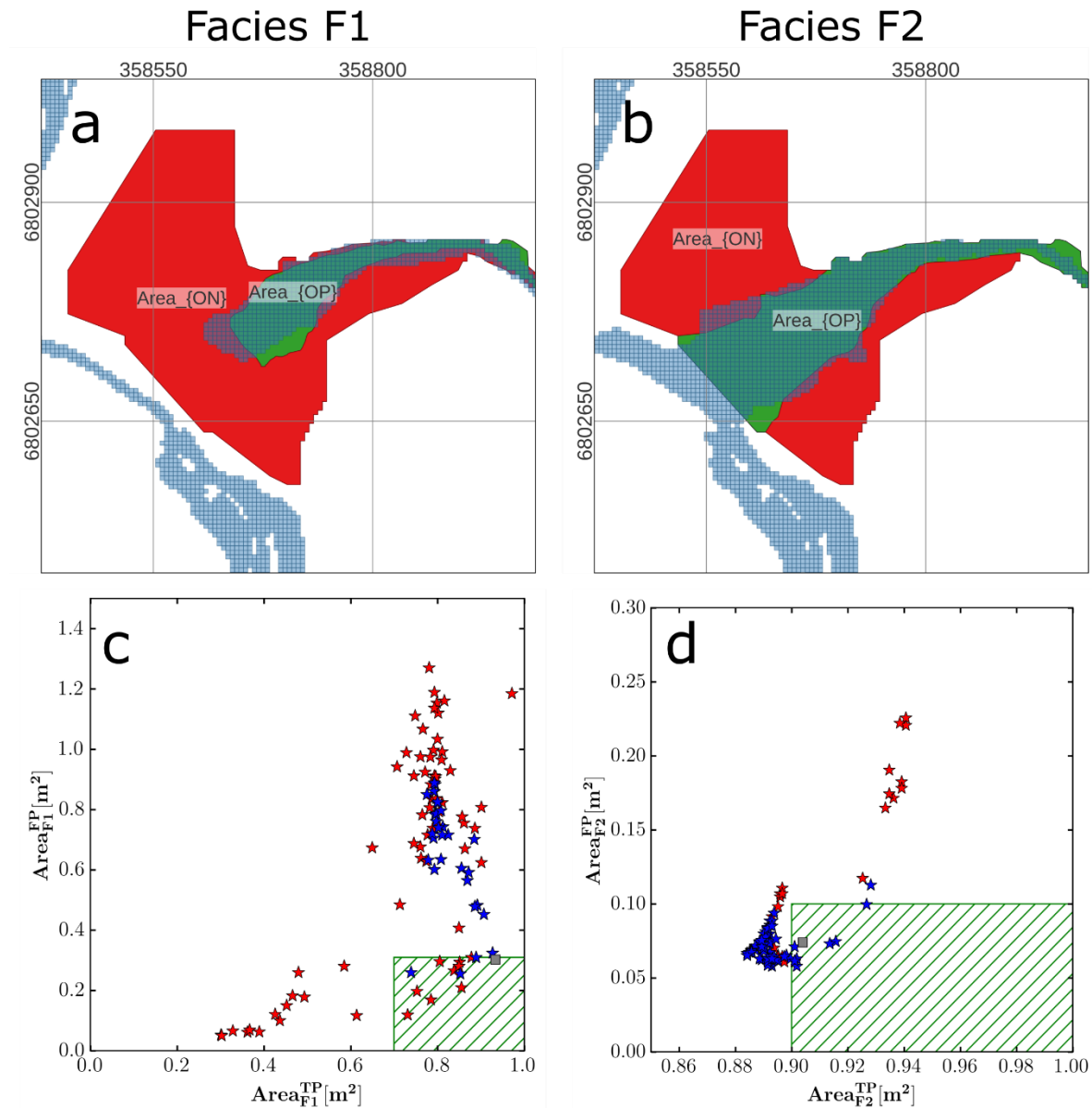


Figura 1. Distribución de áreas correctamente vs incorrectamente reproducidas

Los resultados del SS indican que la distribución de las áreas reproducidas no solo depende de las características morfológicas del abanico aluvional, sino también de las características reológicas del flujo y de la morfología del depósito. En el caso de que no existan observaciones de terreno respecto a la composición de los flujos de detritos, este sistema de soporte significa una gran ayuda para la decisión de los parámetros reológicos ya que reduce considerablemente la búsqueda. Sin embargo, la caracterización en terreno del depósito sigue siendo muy importante, especialmente para discriminar entre los mejores casos encontrados por el SS (casos en el área verde tachada de la Figura 1). En ambos casos (con/sin datos de terreno) el ojo experto sigue siendo relevante para discernir entre los mejores casos encontrados.

3.4 Aplicación de FLO-2D – Crucecita Alta

La mayoría de las pérdidas y destrucción debido a flujos aluvionales ocurre en la zona de depositación, la cual se conoce como abanico aluvial (Jackob et al., 2005). Los abanicos aluviales son comúnmente utilizados para situar viviendas debido a sus pendientes suaves, buen drenaje y tierras fértiles. Lamentablemente la combinación de estas dos características genera una condición muy desfavorable para la seguridad de los habitantes de estos abanicos aluviales.

La interacción de abanicos aluviales y un río troncal ha sido estudiado en terreno (Mather et al., 2017; Cabré et al., 2020) y en el laboratorio (Savi et al., 2020; Stancanelli y Musumeci, 2018), dando origen a distintos modelos conceptuales que intentan explicar el rol de estas estructuras geológicas en la cascada de sedimentos. Por otra parte, la modelación numérica está limitada a los modelos actuales que, para simplificar la física detrás de los flujos de detritos, posee modelos específicos para distintos regímenes de escurrimiento. Lo anterior implica que el usuario de dichos modelos debe, necesariamente, conocer la tipología del flujo de detritos previo a su simulación. Si bien existen modelos, como por ejemplo r.avaflow (Pudasaini, 2012; Mergili et al., 2017), que han integrado varios fenómenos físicos en un modelo generalizado de flujos de detritos, la falta de información de terreno precisa ha limitado la validación de estos modelos.

Desde una perspectiva ingenieril, Garcés et al. (2021) demostraron que es posible modelar numéricamente el comportamiento de un abanico aluvional y su interacción con el río usando un software comercial. Los autores proponen una metodología basada en datos de terreno que permiten reproducir el comportamiento del abanico bajo distintos escenarios para determinar la eficiencia de obras de control aluvional y mitigación.

Garcés et al. (2021) concluye que tanto el comportamiento natural de los flujos de detritos como su comportamiento en presencia de obras de mitigación debe ser estudiado bajo distintos escenarios de comportamiento reológico. Debido a que la composición de agua y sedimentos puede variar para una misma quebrada incluso dentro de un mismo evento para distintas oleadas, existe la posibilidad de que obras que funcionan bien en un escenario, no cumplan con el objetivo deseado en otros casos.

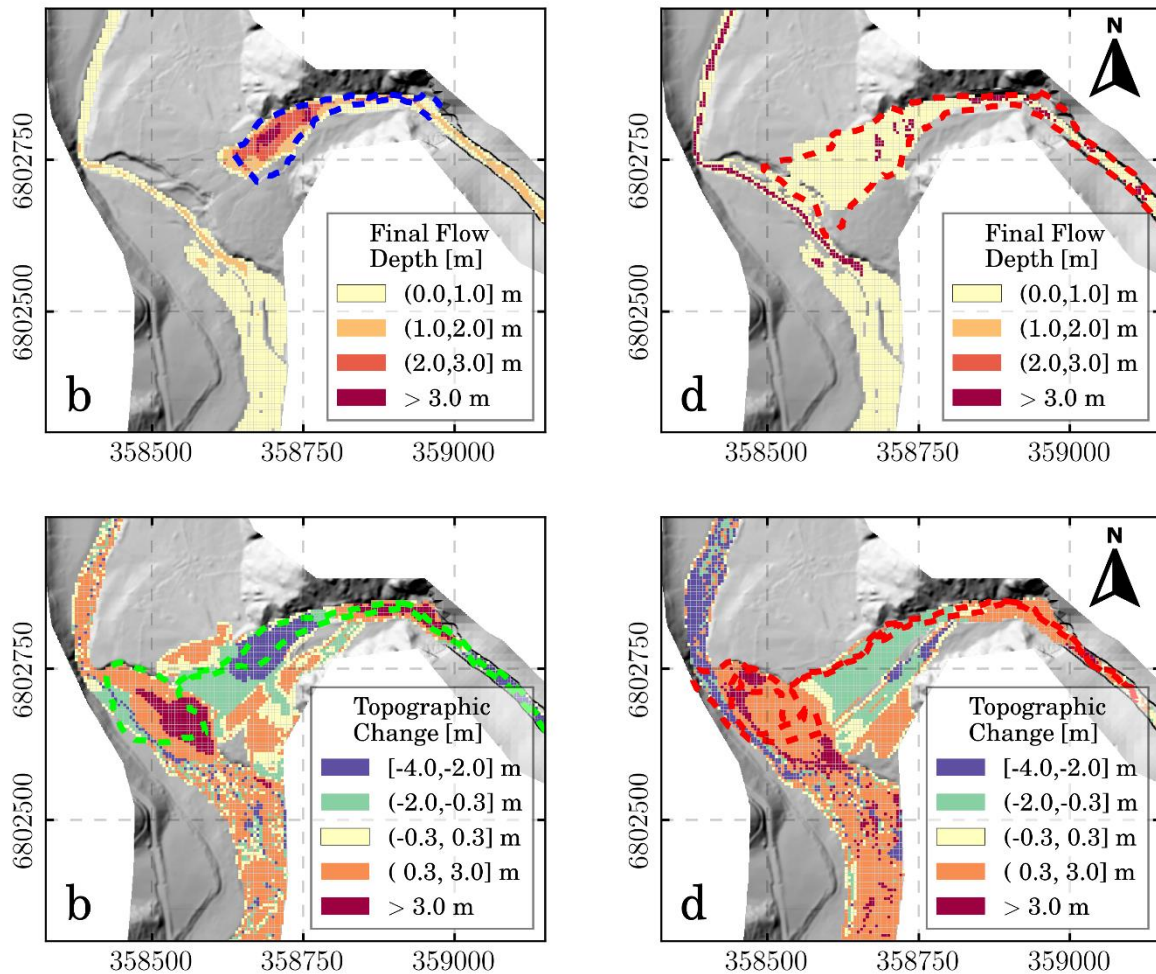


Figura 2. Flujos aluvionales ocurridos el 25 de marzo de 2015 y reproducidos numéricamente por Garcés et al. (2021)

3.5 Aplicación de debrisFlowSavageHutterFOAM

González (2021) aplicó el modelo debrisFlowSavageHutterFOAM en la misma quebrada, Crucecita Alta. Para reducir los requerimientos computacionales de este caso, sólo se simuló caudales constantes, por lo que los resultados no son directamente comparables con los resultados obtenidos por Garcés et al. (2021). González (2021) escogió el modelo planteado por Frank et al. (2015) para representar los procesos de erosión y depositación, el cual corresponde a la relación utilizada por RAMMS. La ley de resistencia utiliza un valor umbral $C_v = 0.2$, para discernir entre la ecuación de Manning si la concentración volumétrica de sólidos es menor a 0.2 y la ecuación cuadrática si $C_v > 0.2$.

En la Figura 3 se presenta la concentración volumétrica de sólidos para el flujo de detritos proveniente de la quebrada Crucecita Alta y el flujo del río El Carmen. En esta figura se puede apreciar cómo el modelo es capaz de representar la mezcla de estos dos escurrimientos llegando a una concentración volumétrica de sólidos intermedia.

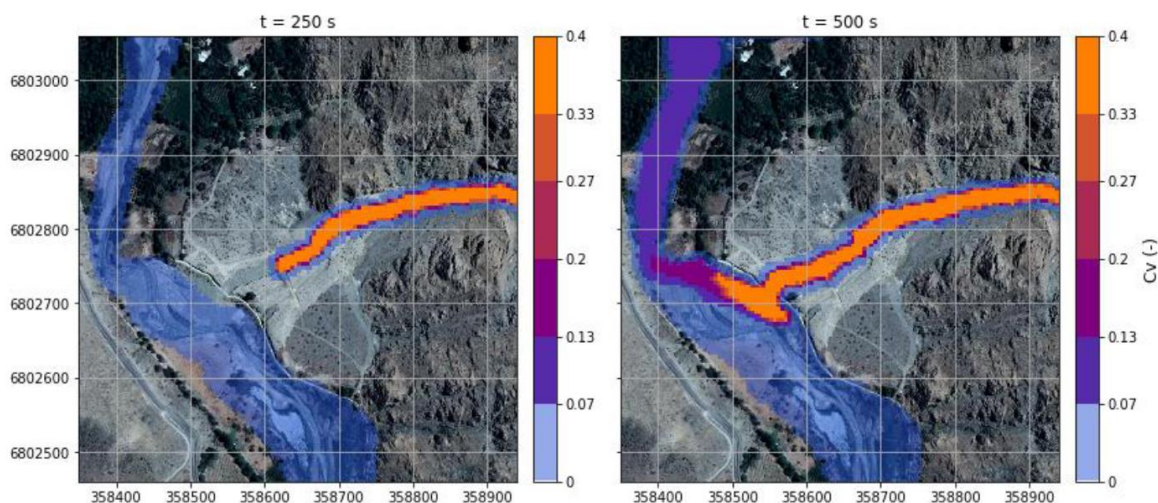


Figura 3. Flujos aluvionales modelados por González et al. (2021)

González (2021) destaca que existen 2 procesos distintos que se entienden como depositación. El primero es la pérdida de sedimentos transportado por el flujo y entregado al sustrato, lo que es modelado como una tasa de erosión negativa. El segundo proceso corresponde a la detención del flujo y que por lo tanto está dominado por la ley de resistencia. Para poder incluir los procesos de erosión y depositación, el autor desarrolló un algoritmo de modificación de terreno, el cual es capaz de modificar la superficie descrita por el método de áreas finitas. Su incorporación en el modelo aumenta considerablemente los tiempos de cómputo, pero demostró funcionar correctamente en los casos estudiados logrando resultados equivalentes a los de RAMMS y FLO-2D. La ventaja de debrisSavageHutterFOAM sobre los modelos RAMMS y FLO-2D radica en la capacidad de intercambiar las ecuaciones de erosión, depositación y fricción. Más aún, si el usuario lo desea puede incorporar el modelo que este requiera.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se revisaron los principales métodos para representar la física de los flujos de detritos. Desde una perspectiva ingenieril enfocada en los estudios de amenaza, se concluye que los modelos bidimensionales de enfoque euleriano siguen siendo protagonistas en la caracterización del comportamiento de flujos de detritos debido a su buen balance entre costo computacional y grado de detalle. A pesar de sus limitantes, estos modelos han demostrado ser muy útiles. Por ejemplo, los modelos de erosión y depositación más utilizados son los que incorporan una tasa de incorporación E la cual es un parámetro fijo que debe ser calibrado. Por otro lado, los modelos de base física, que intentan dar una relación más elaborada para el parámetro E , siguen necesitando una calibración y no muestran mayores mejoras.

Respecto a los modelos bidimensionales más utilizados, se identificaron ventajas y desventajas que determinan qué modelo se ajusta mejor a las necesidades particulares de cada

caso. FLO-2D tiene la ventaja de incorporar el modelo de flujos de barro a través de la reología de modelo cuadrático, pero también el transporte de sedimentos para flujos de agua o de cargas de sedimento que no superen el 20% en volumen. FLO 2D sólo es capaz de generar grillas cuadradas y celdas de tamaño único. Para pendientes típicas de conos aluvionales no se recomienda usar grillas con celdas menores a $5 \times 5 \text{ m}^2/\text{pixel}$. Lo anterior representa una limitante cuando se requiere representar cambios en la topografía con dimensiones menores a los 5 metros. El caso presentado por Garcés et al. (2021) deja en evidencia la fortaleza de FLO-2D al intercambiar entre los módulos de flujo de barro y transporte de sedimentos para la reconstrucción de un evento aluvional. RAMMS, en cambio, tiene la ventaja de poseer sólo 2 parámetros para el modelo reológico lo que facilita la calibración de los flujos de barro. HEC-RAS 2D destaca por su malla, la cual se puede refinar en sectores específicos y además considera una curva de descarga para cada celda con lo que es capaz de identificar la topografía a nivel sub-grilla.

Los modelos más sofisticados todavía presentan varias limitantes para ser implementadas de manera estandarizada en estudios/proyectos de evaluación de amenaza aluvional. Sin embargo, el desarrollo de estas metodologías es muy necesaria para entender la mecánica detrás de estos complejos flujos de mezclas sólido-líquidas. En particular, los modelos de fricción para mezclas equivalentes han demostrado representar correctamente la realidad. Por el contrario, los procesos de erosión y depositación y su influencia sobre la reología de la mezcla todavía requieren mayor investigación y desarrollo. Por lo tanto, los esfuerzos deberían estar enfocados en mejorar tales procesos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al centro investigación para la minería, AMTC y al proyecto ANID-PIA AFB180004. El primer autor agradece además la beca de Doctorado en Chile CONICYT-PCHA/DoctoradoNacional/2019 - 21191593.

REFERENCIAS

- Cabré, A., Aguilar, G., Mather, A. E., Fredes, V., y Riquelme, R. (2020) *Tributary-*junction alluvial fan response to an ENSO rainfall event in the El Huasco watershed, northern Chile**. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44, 679–699.
- Cao, Z., Pender, G., Wallis, S., y Carling, P. (2004) *Computational dam-break hydraulics over erodible sediment bed*. *Journal of hydraulic engineering*, 130(7), 689-703.-
- Christen, M., Kowalski, J., y Bartelt, P. (2010) *RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain*. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1-2), 1-14.
- Egashira, S., Honda, N., y Itoh, T. (2001) *Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow*. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 26(9), 645-650.

- Frank, F., McArdell, B. W., Huggel, C., y Vieli, A. (2015) *The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: examples from the Swiss Alps*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 15(11), 2569-2583.
- Garcés, A., Zegers, G., Cabré, A., Aguilar, G., Tamburrino, A., y Montserrat, S. (2021) *A modeling methodology to study the tributary-join alluvial fan connectivity during a debris flow event*. Natural Hazards Earth System Sciences Discussion [preprint], in review.
- González, A. (2021). *Modelación numérica de los procesos de erosión/depositación en flujos detríticos: aplicación en quebradas afluentes a Río El Carmen, Huasco*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Iverson, R. M. (1997) *The physics of debris flows*. Reviews of geophysics, 35, 245–296.
- Iverson, R. M. (2012) *Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117(F3).
- Izquierdo, T., Abad, M., Gómez, Y., Gallardo, D., y Rodríguez-Vidal, J. (2021). *The March 2015 catastrophic flood event and its impacts in the city of Copiapó (southern Atacama Desert). An integrated analysis to mitigate future mudflow derived damages*. Journal of South American Earth Sciences, 105, 102975.
- Jakob, M., Hungr, O., y Jakob, D. M. (2005) *Debris-flow hazards and related phenomena* (Vol. 739). Springer. Berlin, Germany.
- Mather, A., Stokes, M., y Whitfield, E. (2017) *River terraces and alluvial fans: The case for an integrated Quaternary fluvial archive*. Quaternary Science Reviews, 166, 74–90.
- McDougall, S., y Hungr, O. (2005) *Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides*. Canadian Geotechnical Journal, 42(5), 1437-1448.
- Mergili, M., Fischer, J. T., Krenn, J., y Pudasaini, S. P. (2017). *r. avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows*. Geoscientific Model Development, 10(2), 553-569.
- Naef, D., Rickenmann, D., Rutschmann, P., y McArdell, B.W. (2006) Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 155–165.
- O'Brien, J. S. y García, R. (2009) *FLO-2D Reference Manual*. Descargado de: www.flo-2d.com. (accedido 01-12-2021).
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y., y Fullerton, W. T. (1993) *Two-dimensional water flood and mudflow simulation*. Journal of hydraulic engineering, 119(2), 244-261.
- Pudasaini, S. P. (2012) *A general two-phase debris flow model*. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117.
- Pudasaini, S. P., y Fischer, J. T. (2020). *A mechanical erosion model for two-phase mass flows*. International Journal of Multiphase Flow, 132, 103416.
- Rauter, M., Kofler, A., Huber, A., y Fellin, W. (2018) *FaSavageHutterFOAM 1.0: Depth-integrated simulation of dense snow avalanches on natural terrain with OpenFOAM*. Geoscientific Model Development, 11(7), 2923–2939.
- Rauter, M. y Tukovic (2018). *A finite area scheme for shallow granular flows on three-dimensional surfaces*. Computers and Fluids, 166, 184–199.

- Salm, B., Burkard, A., y Gubler, H. U. (1990) *Berechnung von Fliesslawinen: eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen*. Eidgenössisches Institut für Schnee-und Lawinenforschung, Weissfluhjoch/Davos.
- Salm, B. (1993). *Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches*. Annals of Glaciology, 18, 221-226.
- Savi, S., Tofelde, S., Wickert, A. D., Bufe, A., Schildgen, T. F., y Strecker, M. R. (2020) *Interactions between main channels and tributary alluvial fans: channel adjustments and sediment-signal propagation*. Earth Surface Dynamics, 8, 303–322.
- Stancanelli, L. M. y Musumeci, R. E. (2018) Geometrical characterization of sediment deposits at the confluence of mountain streams, Water(MDPI), 10, 401.
- Sun, R. y Xiao, H. (2016) *SediFoam: A general-purpose, open-source CFD-DEM solver for particle-laden flow with emphasis on sediment transport*. Computers and Geosciences, 89, 207–219.
- Takahashi, T. (2007) *Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures*. CRC Press/Balkema - Taylor & Francis Group, 2nd edition.
- Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T., y Yamashiki, Y. (1992) *Routing debris flows with particle segregation*. Journal of Hydraulic Engineering, 118, 1490–1507.
- US Army Corps of Engineers (USACE) (2020). *Non-Newtonian User's Manual*. Descargado de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasmuddebris>. HEC-RAS Mud and Debris Flow (accedido el 09-12-2021).
- Zegers, G., Mendoza, P. A., Garcés, A., y Montserrat, S. (2020) *Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 20, 1919–1930.

ACERCA DE LOS AUTORES

Alex Garcés es Ingeniero Civil y Magíster en Ciencias mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile, estudiante del Programa de Doctorado en Fluidodinámica de la Universidad de Chile, e Investigador Asociado del Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile.

Santiago Montserrat es Ingeniero Civil, Magíster en Ciencias mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico y Doctor en Fluidodinámica de la Universidad de Chile. Actualmente se desempeña como Investigador Asociado del Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile.

EL DESASTRE DEL GLACIAR DE GIÉTRO DE 1818: RECONSTRUCCIÓN HIDRÁULICA DE LA CRECIDA*

CHRISTOPHE ANCEY¹, ÉRIC BARDOU² Y TOMÁS TREWHELA^{1,3}

¹Laboratorio de Hidráulica Medioambiental, École Polytechnique Fédérale de Lausanne,
Lausanne, Suiza

christophe.ancey@epfl.ch

²DSM Consulting, Nax, Suiza

info@dsm-consulting.ch

³Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez, Viña del Mar, Chile

tomas.trewhela@uai.cl

RESUMEN

En este trabajo reconstruimos la crecida ocurrida en el Cantón del Valais (Suiza) el año 1818 debido a la ruptura de la represa natural generada por el glaciar Giétro. A partir de los antecedentes históricos disponibles y usando simulaciones numéricas, fue posible reconstituir la crecida usando tres escenarios plausibles. Los resultados fueron comparados con los testimonios y muestran que bajo hipótesis simples, se pueden modelar este tipo de crecidas con herramientas numéricas modernas a bajo costo computacional. Pese a ser un evento ocurrido en Suiza, el contexto de cambio climático actual y la similitud geográfica de la zona con las regiones andinas alertan de la severidad y los riesgos asociados a estas catástrofes en Chile y otras partes del mundo, todo desde una perspectiva histórica.

Palabras claves: Rompimiento de presa; Lago glaciar; Crecida; Simulación numérica.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Entre los grandes mitos comunes de la humanidad, aquella relacionada al diluvio ha indeleblemente marcado el imaginario cultural. Probablemente esto deba su origen a la observación de inundaciones de gran magnitud por parte de nuestros antepasados, marcadas por la súbita llegada de un gran volumen de agua y la inundación de grandes superficies de tierra. Si uno examina durante un largo período de tiempo (del orden de milenios) la crónica de inundaciones devastadoras, se puede notar que entre los quince eventos más extremos conocidos a la fecha, diez han sido debidos a rupturas de represas glaciares (ver Tabla 1), y que estos han generado caudales bien superiores a aquellos observados luego de precipitaciones.

* Este trabajo ha sido reescrito a partir del francés original presentado para los Anales Valaisanos en conmemoración de los 200 años del desastre.

Tabla 1. Causas probables de las principales crecidas conocidas con caudales de salida Q_p superiores a 100 000 m³/s. Con un valor de Q_p discutido entre 8000 y 20 000 m³/s, la catástrofe de Giétro está lejos de los valores aquí presentados, pero es una de las principales crecidas de la historia reciente. Información tomada de O'Connor y Costa (2004).

NOMBRE	REGIÓN	FECHA	Q_p (10 ⁶ m ³ /s)	CAUSA PROBABLE
Kuray	Altái, Rusia	Fin pleistoceno	18	Represa glaciar
Missoula	Noreste EEUU	Fin pleistoceno	17	Represa glaciar
Lagos Darkhat	Altái, Rusia	Fin pleistoceno	4	Represa glaciar
Lagos Jassater	Altái, Rusia	Fin pleistoceno	2	Represa glaciar
Lagos Yaloman	Altái, Rusia	Fin pleistoceno	2	Represa glaciar
Lagos Ulymon	Altái, Rusia	Fin pleistoceno	1.9	Represa glaciar
Lago Agassiz	Alberta, Canadá	Principio holoceno	1.2	Derrame en lago proglaciar
Aniakchak	Alaska, EEUU	Fin holoceno	1	Grieta en una caldera
Lago Bonneville	Noreste EEUU	Fin pleistoceno	1	Rebalse de lago
Lago Regina	Canadá/EEUU	Fub pleistoceno	0.8	Represa glaciar
Jökulsá en Fjöllum	Islandia	Principio holoceno	0.7	Erupción volcánica en zona glaciar
Río Indo	Pakistán	1841	0.54	Represa de tierra
Río Amazonas	Óbidos, Brasil	1953	0.37	Lluvia
Katla	Islandia	1918	0.3	Erupción volcánica en zona glaciar
Río Wabash	Indiana, EEUU	Fin holoceno	0.27	Represa glaciar

Los lagos glaciares se forman generalmente a partir del retroceso glaciar (algo con lo que se debe lidiar en lagos de morrenas), ya sea cuando un glaciar o el colapso de una parte de este bloquea la salida de un cauce, o cuando una erupción volcánica pasa a llevar una parte de la

cobertura glaciar (llamado *jökulhlaup* en islandés). Como estas represas naturales son generalmente formadas por material grueso, permeable y de densidad variable (debido a la mezcla entre hielo y roca), su estabilidad es relativamente mediocre. No todos los lagos glaciares sufren rupturas necesariamente; en muchos casos se ha observado su vaciamiento parcial (con ciclos periódicos de evacuación de caudales) sin la destrucción del muro natural (Costa, 1988; Huss et al., 2013).

Aun cuando representan una fracción pequeña de los lagos glaciares, las represas glaciares están asociadas a un riesgo de ruptura más alto. Así, de los eventos de crecidas asociados a lagos glaciares, el 70% están asociados a represas glaciares y sólo 9% a lagos de morrena (Carrivick y Tweed, 2016).

Al ser un país de montaña con una gran parte de su superficie cubierta por glaciares, Suiza ha estado y es un país que está particularmente expuesto a rupturas de represas glaciares. La Tabla 2 recuenta algunas de las recientes catástrofes que más han marcado en los tres últimos siglos. Esto cobra particular importancia a la luz del reciente cambio climático. La frecuencia de estos accidentes ha aumentado, siendo las regiones de Alaska, Europa e Islandia las más afectadas, aún cuando todas las regiones con cobertura glaciar están sujetas a estos eventos. Ante semejante contingencia y la alta actividad glaciar debido a su derretimiento y movimiento, este tipo de desastres glaciares son un problema actual.

Tabla 2. Algunos colapsos de lagos glaciares suizos en el curso de los últimos tres siglos. Los volúmenes evacuados V están expresados en millones de m^3 (Mm^3) y los caudales de máxima de crecida V están en m^3/s . Datos tomados de Bohórquez y Darby (2008), Haeberli (1983), Huss et al. (2013), Raymond et al. (2003), Walder y Costa (1996) y Worni et al. (2014).

AÑO	LUGAR	V (Mm^3)	Q_p (m^3/s)
1818	Glaciar de Giétro, Cantón del Valais	20	8000-20000
1878	Lago de Märjelen, Glaciar Aletsch, Cantón del Valais	10.7	300
1913	Lago de Märjelen, Glaciar Aletsch, Cantón del Valais	4.5	195
1943	Glaciar de Ferpècle, Cantón del Valais	1.6	400
1944	Lago de Gorner, Glaciar Gorner, Cantón del Valais	6	200
1951	Lago de Grindelwald, Cantón Berna	0.135	74.6
1952	Glaciar de Ferpècle, Cantón del Valais	0.25	230
1968	Lago de Gorner, Glaciar Gorner, Cantón del Valais	2.9	29
2008	Lago de Grindelwald, Cantón Berna	0.57	111
2018	Lago de Faverges, Glaciar Plaine Morte (BE,VS)	2	80

Con respecto a los otros riesgos glaciares que afectan ciertas partes centrales de los valles, las rupturas de represas glaciares pueden inundar vastas regiones dado que estas implican el desplazamiento de grandes volúmenes de agua lejos del punto de origen. El riesgo sobre las personas, los bienes y las infraestructuras es entonces considerable. Con una densidad media de 7 hab/ km^2 durante el s. XVI y 12 hab/ km^2 a principios del s. XIX (Mathieu, 2000), el Cantón del Valais era en ese entonces un cantón poco poblado, por lo tanto las rupturas

glaciares de 1595 y 1818 causaron una cantidad de muertes limitada; otras catástrofes vecinas como la de Romanche (Isère) en 1219 habían causado un número de muertes mayor en la región próxima a Grenoble en los Alpes franceses (Berlioz, 1998). En la actualidad, en los valles alpinos, la densidad poblacional se ha acrecentado y las infraestructuras sensibles a este tipo de eventos demanda a las autoridades locales a realizar estudios para evaluar el impacto de estos. De una manera más general, la cuestión del impacto de una ruptura de presa en la población y las obras públicas es de una importancia vital para la estrategia de desarrollo del territorio. Recientemente han habido polémicas respecto a la ruptura, o la posible ruptura, de presas alrededor del mundo con casos en Francia, Canadá, Brasil y Chile. Para esclarecer estas polémicas, es esencial contar con herramientas de cálculo pertinentes, y saber hasta qué punto los modelos pueden entregar predicciones fiables, donde los casos históricos entregan un excelente punto de comparación. Debido a la vasta presencia glaciar en Chile y las similitudes geográficas, con este artículo entonces se busca interesar a un público más allá del suizo o de aquellos interesados particularmente por la ruptura de Giétro en el Cantón del Valais.

Se debe mencionar también que es raro contar con casos de rompimientos de presas glaciares bien documentados. El caso de Giétro es interesante debido a que disponemos de una documentación histórica relativamente rica y de un conocimiento fino de la topografía (o al menos de la topografía actual) y se trata de un evento mayor dentro del contexto europeo.

2. MÉTODOS

El concepto “reconstrucción hidráulica” implica que buscamos reconstituir un evento histórico a través de una descripción y comprensión de este desde el punto de vista hidráulico, y poniendo acento en dicho enfoque. Dicho de otra manera, buscamos describir el flujo del volumen de agua a lo largo del río Dranse entre la represa Mauvoisin (que se encuentra operativa en la actualidad) y la planicie del Ródano a la altura de la ciudad de Martigny en el Cantón del Valais, Suiza.

No buscamos eso si describir todos los procesos asociados al escurrimiento. Por ejemplo, estos flujos están generalmente asociados a un fuerte transporte sólido, lo que en este caso implica un amplio rango de sedimentos, escombros, vegetación y hielo. Dentro del marco del estudio presentado acá, vamos a despreciar el transporte de sólidos producto del flujo para focalizarnos sobre el líquido. Esta hipótesis de trabajo restrictiva es considerada pertinente: por un lado, estudiamos la catástrofe a una escala cartográfica pequeña y a esta escala, el escurrimiento líquido es la clave para la dinámica de movimiento a gran distancia; por otro lado, cuando se realizan modelaciones numéricas, es de interés ver si un modelo simple es capaz de simular el flujo obteniendo resultados ajustados a la realidad. Despreciar un cierto nivel de detalle tiene además varias ventajas. Como veremos, nuestro conocimiento acerca de las condiciones iniciales del flujo (o de la ruptura de la represa glaciar en si) está lleno de suposiciones. Al considerar otros procesos asociados al flujo de agua acrecienta notablemente el nivel de incertidumbre, y al final el riesgo es de añadir más ruido que una solución clara al análisis de resultados y la comparación de estos con los datos disponibles.

El avance computacional ha permitido lograr una representación gráfica realista de los flujos en masa para avalanchas y aluviones, pero la física detrás de las simulaciones sigue siendo aproximativa con pocos avances teóricos, e incluso la validación experimental o de terreno es aún insuficiente. Para materiales más complejos como el hielo, la nieve o los sedimentos, los modelos hidráulicos son más cualitativos (entregan más que nada tendencias) que cuantitativos (la capacidad de predicción es limitada y el ajuste de parámetros es imprescindible). Estos modelos requieren además una calidad y cantidad de datos muchas veces difícil de obtener (parámetros reológicos, curvas granulométricas, topografías y estratigrafías), sobre todo *a posteriori* como sería para esta catástrofe ocurrida hace ya dos siglos. Finalmente, en lo que es un detalle práctico y evidente pero no sin importancia: los cálculos requieren también una capacidad de computo elevada como para hacer un análisis de sensibilidad de los parámetros que determinan estos modelos.

Para modelar el escurrimiento de agua luego de un rompimiento de presa, glaciario o no, debemos distinguir dos fases: la fase de ruptura de la presa, que conduce a la liberación de un volumen de agua V durante un cierto tiempo; y la fase de escurrimiento, durante la cual este volumen V se dispersa y extiende a lo largo del centro del valle. Describimos los métodos de cálculo para cada una de las fases en las dos siguientes sub-secciones y damos algunas indicaciones sobre los datos históricos usados para comparar con las simulaciones numéricas en la tercera sub-sección.

2.1 Rompimiento de la represa glaciares

Las represas de tierra no ceden instantáneamente sino gradualmente. El tiempo característico de ruptura varía de manera considerable (del orden de minutos a varias horas) dependiendo del material y el modo de ruptura. Tres aproximaciones son comunmente utilizadas para estudiar este proceso:

- Los métodos empíricos buscan estimar el volumen evacuado durante la ruptura sin entrar en detalles acerca los procesos físicos (Chinnarashi et al., 2004; Froehlich, 2008; Froehlich, 2016; Pierce et al., 2010; Thornton et al., 2011). Esto se ocupa frecuentemente para el cálculo de un hidrograma, relacionando el caudal máximo de la crecida con parámetros simples de manera que el volumen de agua acumulado se encuentra a partir de correlaciones con eventos bien documentados. Estos métodos son simples a utilizar pero sus márgenes de error se encuentran a veces por encima del orden de magnitud del caudal máximo de la crecida.
- Los modelos numéricos examinan la erosión del muro bajo el efecto del agua (Begam et al., 2018; Castro-Orgaz y Hager, 2013; Faeh, 2007; Larocque et al., 2013). En principio estos modelos son más precisos pero al mismo tiempo más demandantes de los datos de la represa y el estado inicial de esta. Como puede inferirse, la precisión está limitada por los conocimientos aun imparciales en término de los procesos erosivos.
- Los modelos conceptuales predicen la formación progresiva de una brecha con la ayuda de una serie de ecuaciones diferenciales que relacionan la erosión de un lecho sujeto al escurrimiento supercrítico por sobre este (Capart, 2013; Ng y Björnsson, 2003; Peter et al.,

2018; Walder y Costa, 1996; Walder y O'Connor, 1997). En términos de complejidad, se encuentran entremedio de las otras dos aproximaciones ya presentadas.

Los mecanismos de ruptura de las represas glaciares son más complejas que en el caso de las represas de tierra (Walder y Costa, 1996), y de hecho, a nuestro conocimiento, no hay a la fecha un modelo numérico capaz de simular la mecánica de la ruptura de una presa de hielo. Los modelos empíricos han buscado correlacionar el caudal máximo de crecida Q_p con los datos característicos del problema, con un volumen de agua evacuado V (inferior o igual al volumen acumulado). Así, a partir del estudio de diez rompimientos de presas, Clague y Mathews encontraron que el caudal máximo de crecida Q_p estaba correlacionado con el volumen vaciado V : $Q_p \propto V^b$ con (Clague y Mathews, 1973; Costa, 1988). Sobre la base de un estudio que tomó en cuenta 72 eventos de este tipo, Walder y Costa encontraron que el vaciado por túnel era el escenario más observado (en 90% de los casos) y que el caudal máximo de crecida seguía bien la ley Clague-Mathews (Walder y Costa, 1996):

$$Q_p = 0.005V^{0.66}, \quad (1)$$

con V expresado en 10^6 m^3 y Q_p en m^3/s . El caudal máximo de crecida es mucho más bajo que en los casos de represas en tierra o enrocados (ver Figura 1). Para un rompimiento de una presa de hielo sin formación de túnel, Walder y Costa encontraron una relación que se aproxima a aquella observada para las represas de tierra (Walder y Costa, 1996):

$$Q_p = 2.51V^{0.44}, \quad (2)$$

2.2 Propagación del volumen de crecida

Las crecidas hidráulicas pueden ser descritas con bastante precisión por las ecuaciones llamadas de Saint-Venant (Barré de Saint Venant, 1871). Estas permiten calcular en todo punto espacial la altura y la velocidad de una columna de agua. Para resolver el set de ecuaciones, hemos utilizado el software numérico *Iber* desarrollado por universidades españolas (Cea y Bladé, 2015). Este software está programado sobre la base de algoritmos numéricos avanzados y soluciones específicas para ecuaciones hiperbólicas como es el caso de las ecuaciones de Saint-Venant.

Además de la topografía, la resolución de las ecuaciones necesita el conocimiento de la fricción ejercida por el suelo sobre la columna de agua. Esta fricción depende principalmente de la rugosidad y de la estructura torrencial del lecho. Para simplificar, empleamos la más común de las leyes friccionales empíricas, la ley de Manning-Strickler para evaluar la fricción del lecho. Para este estudio tomamos un coeficiente de Strickler $K = 25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ (lo que da un coeficiente de Manning $n = 1/K = 0.04 \text{ s m}^{-1/3}$) para el cauce principal del valle. En principio, habría que emplear una distribución espacial para K que toma en cuenta la variación de rugosidad del suelo entre el lecho torrencial, las zonas cubiertas por vegetación y las zonas urbanas. Sin embargo, para una crecida de gran magnitud caracterizada por

grandes alturas de escurrimiento y un fuerte arrastre torrencial, las condiciones de rugosidad cambian fuertemente. Como primera aproximación, la hipótesis de un coeficiente de rugosidad constante es pertinente.

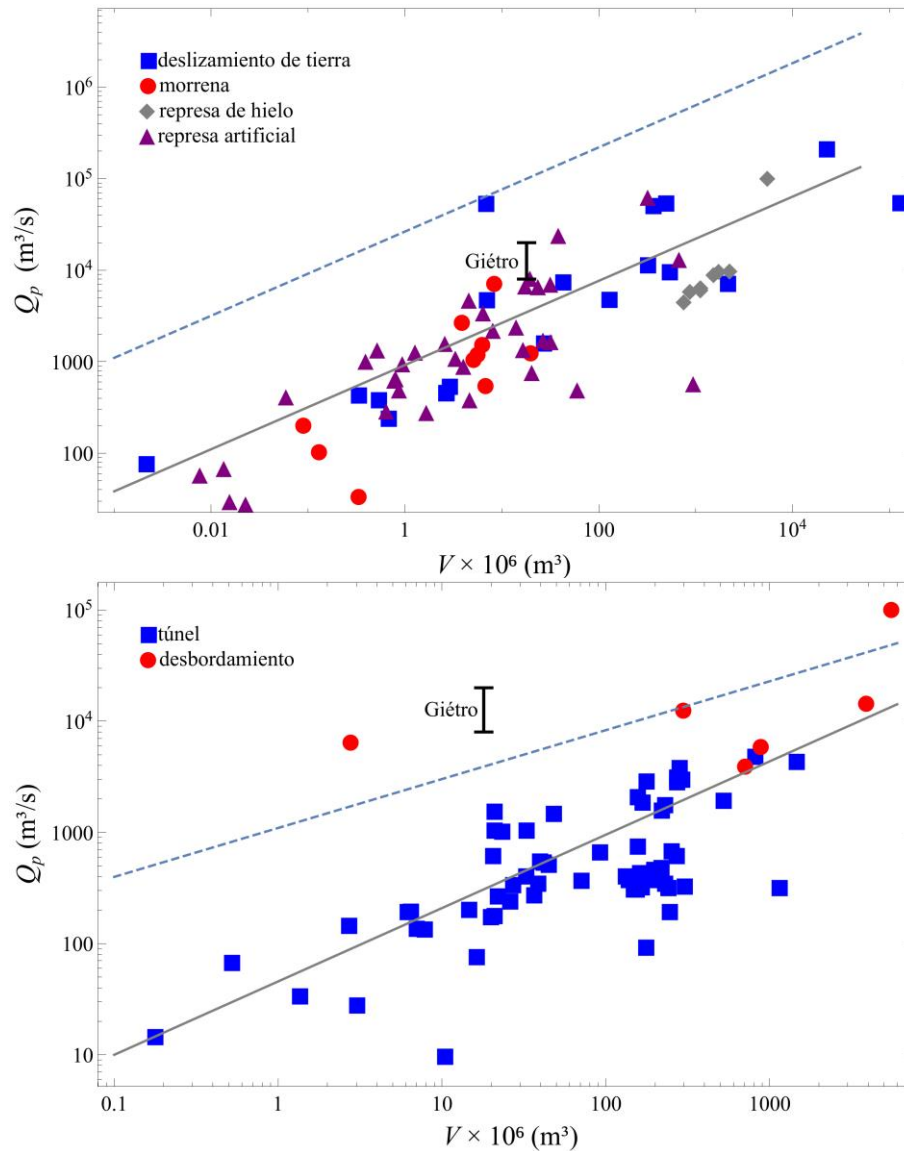


Figura 1. (a) Relación entre volumen evacuado y caudal máximo de crecida Q_p ; la curva de regresión $Q_p = 1.6V^{0.46}$ (línea continua) muestra la tendencia media, entre tanto la envolvente $Q_p = 46V^{0.46}$ (línea punteada) muestra la cota superior. (b) Relación entre volumen evacuado y caudal máximo de crecida. La línea continua representa la ecuación (1) y la línea punteada representa la ecuación (2). El intervalo negro representa la gama de valores estimados para el desastre de 1818.

Para la topografía, disponíamos de un modelo de elevación digital de la Oficina Federal de la Topografía (swisstopo). Dado que código *Iber* necesita que la topografía sea ingresada en una grilla regular rectangular, en primer lugar utilizamos un fondo topográfico a pequeña escala (equivalente al 1:50000 cartográfico) cubriendo todo el sector de la cabaña de Chanrion en Vernayaz, luego utilizamos un segundo fondo a gran escala (equivalente al 1:1000 cartográfico) para el fondo del valle de Mauvoisin hasta la confluencia con el río Ródano. Un grillado no estructurado y triangular fue generado, con una grilla entre 10 y 50 m lejos del fondo del valle, y entre 1 y 5 m sobre el fondo del valle. La topografía utilizada corresponde entonces al terreno actual, y no al que poseía el valle del Dranse en 1818. Nosotros disponemos de una información parcial a través de catastros: los mapas Dufour y Siegfried levantados durante la segunda parte del siglo XIX. Estos datos habrían sido sin embargo insuficientes para entregar resultados numéricos razonablemente precisos, excepto para las zonas sin relieve marcado como el cono aluvial del río Dranse en Martigny. Si bien es cierto que algunos sectores (como Fionnay o la confluencia con el río Merdenson) han sufrido importantes modificaciones a su topografía, estas siguen circunscritas y no afectan localmente la dinámica del escurrimiento. Para el cono de deyección o abanico aluvial de Martigny, utilizamos un fondo topográfico extraído del mapa Siegfried (ver Anexos).

2.3 Datos históricos

La catástrofe de Giétro se encuentra bien documentada (Museo de Bagnes, 1988; Payot y Meilland, 2018). Disponemos de tres fuentes diferentes:

- Daños a estructuras: el trabajo de historiadores de la oficina Clio, ha permitido censar y cartografiar los daños sufridos por las construcciones (Payot y Meilland, 2018). Un trabajo de un estudiante de la Universidad de Lausanne estableció un inventario de marcas dejadas por la catástrofe (Corboz, 2015).
- Indicios geomorfológicos: el intenso transporte sólido, la erosión de ciertas laderas y los depósitos masivos son todavía muestras que son aun visibles en el paisaje local. Sin embargo, es difícil datar las modificaciones del terreno y más difícil ligarlas con certeza al evento de 1818.
- Testimonios: desde el mes de abril 1818, un seguimiento de la evolución del lago glaciar fue conducido por el ingeniero cantonal Ignace Venetz (Museo de Bagnes, 1988; Payot y Meilland, 2018). Hans Conrad Escher de la Linth realizó un recuento del desastre (Escher de la Linth, 1818) y el decano Bridel entregó sus impresiones luego de sus visitas al valle de Bagnes en 1818. Contamos entonces con estimaciones de los volúmenes, de las alturas iniciales, y los tiempos de evacuación y de propagación de la crecida. Entre los testimonios más útiles, Escher de la Linth nos ofrece una descripción cuantificada del desastre: “A partir de los testimonios unánimes de los habitantes, este escurrimiento duró cerca de una media hora por todos los lados donde pasó; así, en el espacio de treinta minutos, la masa entera de agua del lago, se llevó escombros, y formó un volumen de más de 530 millones de pies cúbicos, pasando por todas las secciones del valle. La catástrofe entonces

generaba, en cada segundo de tiempo, 300 000 pies cúbicos de agua” (Escher de la Linth, 1818; p. 11). Con un pie estando entre los 26 y 36 cm en Suiza (Collectif, 2011), esto quiere decir que el volumen drenado ha sido estimado por Escher de la Linth en 17 ± 7 millones de m^3 , y el caudal medio en $9500 \pm 4100 m^3/s$. La Tabla 3 resume estos datos relativos al avance del frente del flujo. Aún en la actualidad, es difícil medir alturas o volúmenes sin las herramientas o medidores adecuados; las estimaciones están llenas de incertidumbre (lo que es aun más difícil de cuantificar). La cronología se debe también tomar con precaución ya que muy pocas personas contaban con relojes en aquella época y en tal situación de riesgo, aun hoy, la primera reacción no es medir el tiempo o mirar nuestros relojes.

Tabla 3. Cronología del avance del frente de la crecida. Notemos que para Martigny es poco preciso de qué punto comunal hablan las fuentes, por ende la incertidumbre es grande. Fuentes: Museo de Bagnes (1988), Escher de la Linth (1818), y Payot y Meilland (2018).

HORA	LUGAR
16:30	Rompimiento de la presa
17:00	Champsec
17:05 a 17:10	Le Châble
1943	Martigny
18:00	Martigny (confluencia con el río Ródano)
19:06	San Mauricio
23:00	Noville (lago Lemán o Ginebra)

Al final, disponemos de un limitado número de elementos históricos sobre las alturas de escurrimiento y las velocidades del frente de la crecida, que pueden ser utilizados para evaluar la pertinencia de las simulaciones numéricas. La Figura 2 muestra el perfil longitudinal, con la ubicación de las principales zonas habitadas que fueron alcanzadas por el flujo.

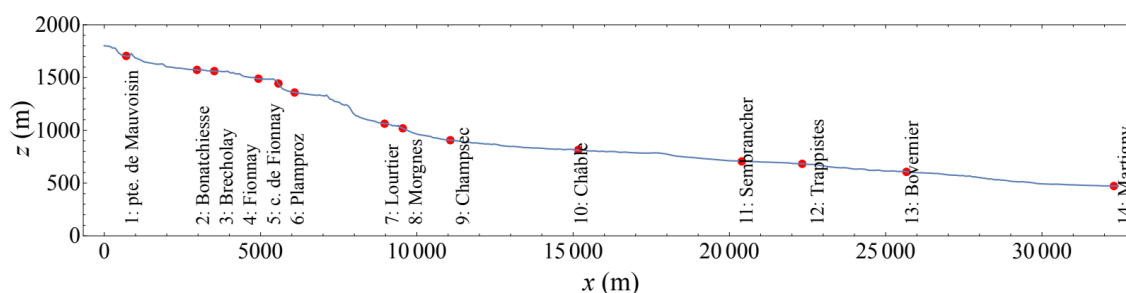


Figura 2. Perfil de elevaciones a lo largo de las zonas afectadas por la crecida. Se indican aldeas, ciudades y puntos de relevancia local. El punto de origen $x = 0$ corresponde a la actual represa de Mauvoisin en el Cantón del Valais.

3. RESULTADOS

3.1 Rompimiento de la represa

A partir de Escher de la Linth (1818), el volumen de agua acumulado era de alrededor de 30 millones de m^3 . El muro de hielo tenía aproximadamente 60 m de altura. Si seguimos literalmente lo señalado por él, determinamos que el vaciado duró alrededor de 30 minutos y movilizó unos 18 millones de m^3 . Sobre esta base, Mauro Werder y sus colegas (ETHZ) realizaron una modelización de la evacuación y obtuvieron un caudal máximo de 20 000 m^3/s (Werder et al., 2018; Escher de la Linth, 1818). Una estimación precedente fue realizada por Wilfried Haerberli (1983), quien obtuvo $Q_p = 8000 \text{ m}^3/\text{s}$, pudiendo acercarse al valor de Escher de la Linth aunque este último daba un valor medio y no máximo, del orden de 10 000 m^3/s . Al aplicar la ecuación (2) encontramos un valor $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Teniendo en cuenta toda esta información elaboramos tres escenarios para el cálculo:

- Escenario 1: utiliza el valor más bajo, con un caudal de crecida $Q_p = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$ y una duración de la crecida de 2.5 h.
- Escenario 2: utiliza el valor más alto, con un caudal de crecida $Q_p = 20\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ y una duración de la crecida de 0.5 h, tal como fue considerado por Werder et al. (2018).
- Escenario 3: utiliza el valor intermedio “histórico” de $Q_p = 8000 \text{ m}^3/\text{s}$ según Escher de la Linth (1818) con una duración de 1.25 h.

Las duraciones fueron calculadas a partir del volumen $V = 18 \text{ Mm}^3$. En las simulaciones numéricas, escogimos no calcular el rompimiento de la represa de hielo con *Iber*, pero consideramos en su lugar un hidrograma con valores distintivos el caudal máximo Q_p y la duración de la crecida (Figura 3).

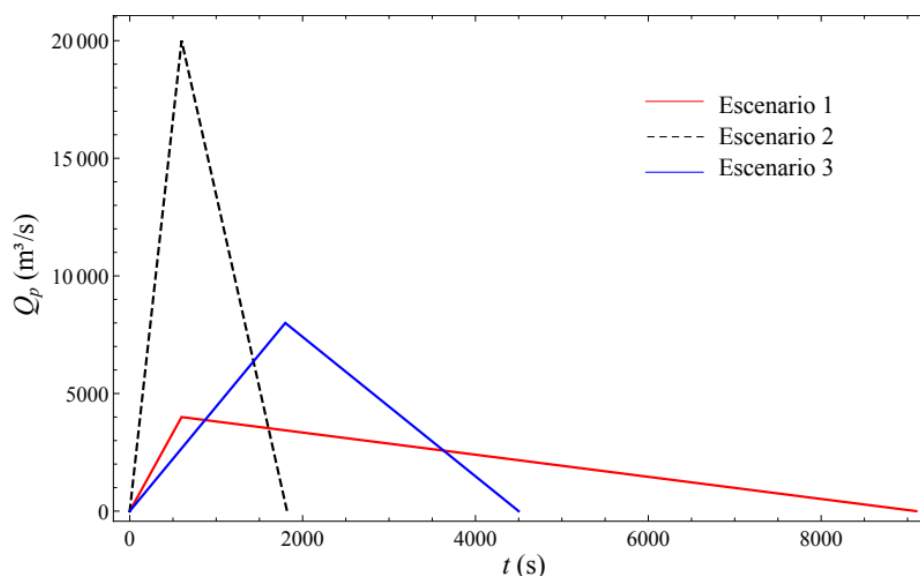


Figura 3. Hidrogramas de crecida según cada escenario considerado en este trabajo.

3.2 Propagación del frente

Entre las informaciones históricas disponibles, la propagación del frente de la crecida es presumiblemente aquella con la menor cantidad de incertidumbre mientras que proporciona información valiosa sobre la dinámica del flujo. La Figura 4 muestra que el Escenario 2 – asociado al tiempo de aumento de caudal más corto y por ende el caudal Q_p más alto– conduce a velocidades del frente de 9 m/s o 33 km/h. Estas son casi dos veces superiores a las de los testimonios históricos. En cambio, para los dos otros escenarios las velocidades de propagación del frente calculadas con *Iber* son coherentes con los testimonios históricos, es decir, conducen a velocidades del orden de 5 m/s o 19 km/h.

3.3 Hidrogramas de crecida

El hidrograma de crecida permite esclarecer dos procesos físicos importantes: la advección, o el transporte del volumen de agua que no necesariamente es igual a la velocidad del frente, y la difusión, o la extensión del volumen de agua que se traduce en la manera que el hidrograma se aplana.

En este aspecto, las simulaciones entregan resultados muy distintos. El Escenario 1 predice una difusión débil: el hidrograma sufre solo una deformación limitada al trayecto del desplazamiento del volumen de crecida. El peak de la crecida se desplaza casi a la misma velocidad que el frente (5 m/s). Escher de la Linth da un caudal medio del orden de 10 000 m³/s y una duración de la crecida casi constante a lo largo del trayecto de esta y entorno a los 30 minutos. Notemos que si bien el Escenario 1 no es capaz de reproducir estos dos primeros datos, este es en cambio coherente con la noción de una duración de crecida homogénea durante su recorrido. Es importante abrir un paréntesis acerca de la incertidumbre asociada a la duración de la crecida. Entre los elementos históricos conocidos, esta duración es sin duda el elemento más subjetivo dado que no es preciso como esta definida. En hidráulica, tenemos el hábito de decir que es la duración necesaria para que el caudal del cauce regrese a valores pre-crecida. Los testigos notan la variación del nivel de agua a lo largo el tiempo, por lo que en principio son capaces de retener a qué duración corresponde. En este contexto, la duración de la crecida corresponde al paso de la gran parte del volumen de agua. El aumento brusco del nivel de agua es un elemento visualmente tangible, y podemos creerles a los testigos. En cambio el descenso del nivel se produce en condiciones de menos atención y post-pánico luego de la catástrofe, y los elementos a distinguir (como construcciones o elementos del paisaje) son menos claros o han sido alterados por la crecida misma. A esto se añade un fenómeno físico: la histéresis entre la relación altura y caudal. Luego de una crecida de tal magnitud, la inmensa erosión puede suavizar el lecho y disminuir la fricción entre este y el flujo. Esto se traduce a que una cierta altura de flujo ya no se traduce de la misma manera a un caudal como se hacía hasta antes de la crecida. Tomando en cuenta la reducción friccional,

la velocidad del agua aumenta notablemente y la altura del flujo puede llegar a ser la mitad (al mismo caudal equivalente antes y después de la crecida).

En oposición, el Escenario 2 muestra una fuerte difusión dado que el caudal máximo de crecida pasa inicialmente de 20 000 m³/s a 8500 m³/s en Champsec (punto 9, Figura 2), un poco pasado la marca de los 10 km. La extensión del volumen de crecida se evidencia en dos características. Primero, notamos que si es inicialmente simétrico, el hidrograma se vuelve cada vez más asimétrico a medida que se propaga, con un punto máximo de crecida que se desplaza progresivamente hacia la izquierda. En segundo lugar, la velocidad del peak de crecida es inferior al del frente: medimos entre Mauvoisin y Martigny una velocidad de 7 m/s (26 km/h) para el peak de crecida contra 9 m/s (33 km/h) para el frente.

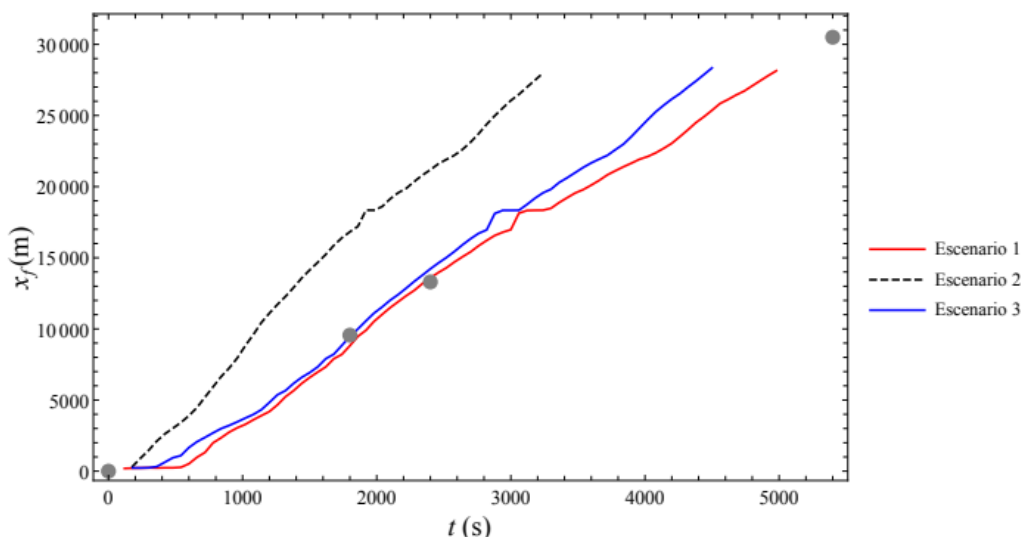


Figura 4. Posición del frente x_f en función del tiempo t para cada escenario considerado. Los puntos muestran la posición del frente según los testimonios históricos.

Como antecedente, observamos que el Escenario 3 entrega resultados parecidos a los del Escenario 1 a pesar de obtener un caudal máximo de crecida del doble y un hidrograma mucho más esbelto. Esto muestra que la extensión del volumen de crecida sigue siendo un fenómeno físico que no es completamente gobernado por las condiciones iniciales. El Escenario 1 corresponde a un caso de advección del volumen de agua. La dinámica del escurrimiento refleja entonces un equilibrio entre la fuerza motriz (debido al peso) y la fricción ejercida por el terreno, lo que se traduce acá en un desplazamiento del volumen de agua a velocidad casi constante. Por el contrario, el Escenario 3 al principio está ligado a variaciones importantes de alturas de agua y resulta en que el gradiente de presión asociado a estas diferencias de alturas es un elemento generador del flujo: una parte del escurrimiento no solo es desplazada por el peso sino que también por la inercia del volumen de agua detrás.

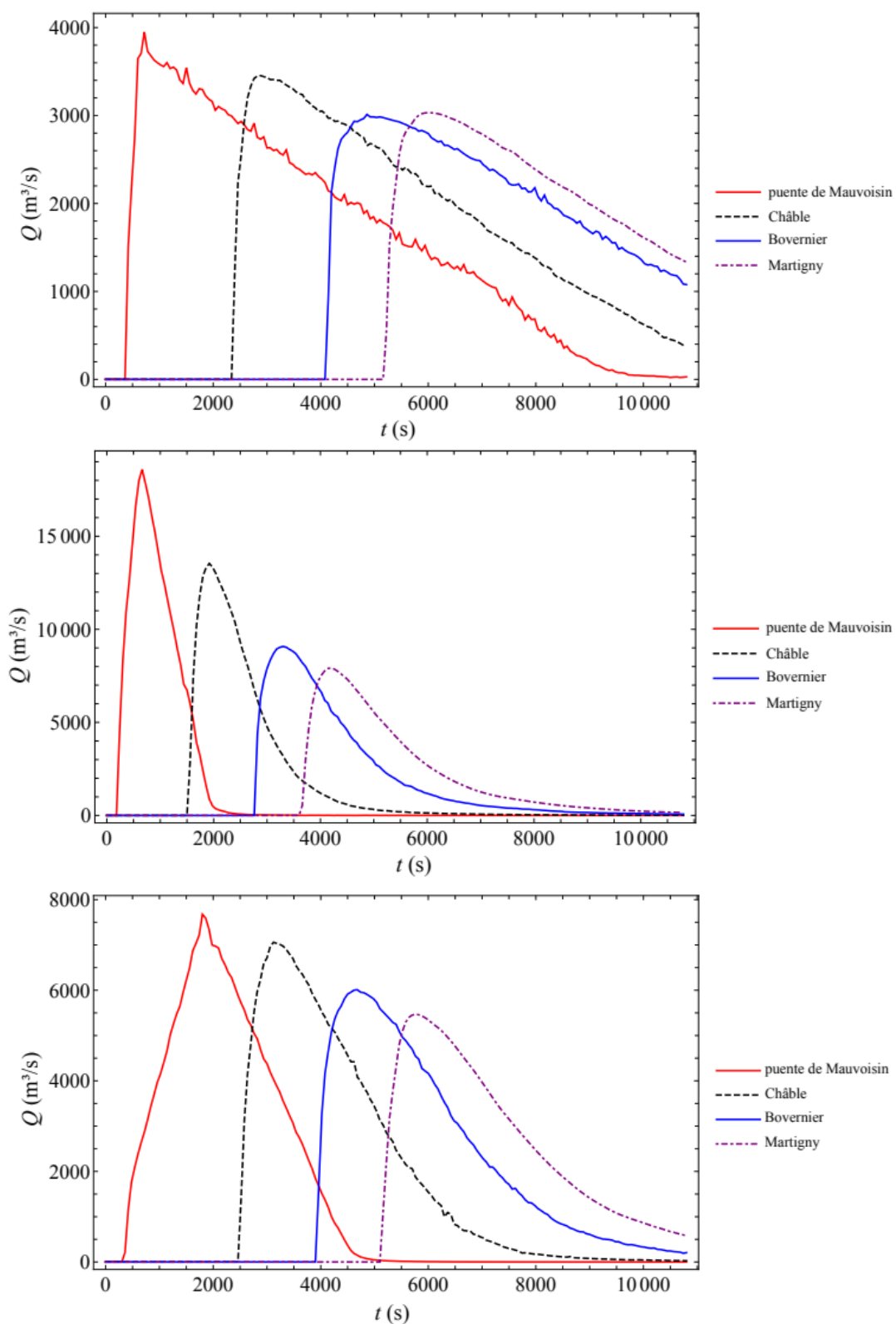


Figura 5. Hidrogramas de crecida en el puente de Mauvoisin, en Champsec, en Châble y Martigny. Para cada uno de los escenarios, el hidrograma inicial está graficado en la Figura 3.

3.4 Perfiles de altura

Disponemos de las cotas de agua durante el evento de 1818. Haciendo la diferencia con la cota del río Dranse actualmente, podemos obtener entonces alturas aproximadas de agua que pueden ser comparadas con las simulaciones numéricas. La Figura 6 muestra los perfiles longitudinales de alturas máximas para cada escenario considerado. Presentamos acá una síntesis en la forma de un perfil longitudinal que es más sencillo y cuantitativo para obtener y mostrar que un plano cartográfico. Hay que entender también que la topografía del valle de Bagnes es localmente muy variable y la información puntual sobre las alturas está lejos de ser representativa de la variabilidad espacial de estas.

El Escenario 1 subestima las alturas de agua en un factor de 2 o más en la primera mitad del recorrido, aproximadamente entre las gargantas de Fionnay y al aval de Sembrancher. En cambio, este escenario entrega alturas coherentes para los tres primeros kilómetros así como para el tramo que va de Sembrancher hasta Martigny.

El Escenario 2 da una correcta representación de las alturas de escurrimiento para todo el tramo entre Mauvoisin y Martigny. La única diferencia notable se observa entre las gargantas de Fionnay, pero como Fionnay es el sector que tiene el depósito aluvional de Martigny y que tiene la mayor cantidad de cambios en el terreno debido a la construcción de obras hidráulicas, es probable que los resultados numéricos sean menos capaces de reconstituir lo ocurrido en 1818.

El Escenario 3 proporciona alturas de escurrimiento que son coherentes con los valores históricos observados en el sector de Fionnay. Notamos que hay pocas diferencias entre los Escenarios 2 y 3 a pesar de la diferencia en el hidrograma inicial.

Hemos trazado igualmente los perfiles transversales de alturas máximas para cuatro sectores entre Mauvoisin y Martigny (ver Figura 7). Una característica notable es que estos perfiles no son planos, lo que sería esperable si estuviéramos lidiando con un escurrimiento permanente de agua. Esta variabilidad refleja la influencia de la topografía local sobre el escurrimiento que permanece transitorio (caso que ocurre por ejemplos con los perfiles simulados en Champsec y Martigny, o el flujo es relativamente largo y sufre grandes variaciones de altura reflejando la variación del terreno) o la influencia de las fuerzas inerciales. Así que cuando el eje del flujo sufre un cambio de dirección, las velocidades son más elevadas al exterior del codo que al interior; los efectos inerciales (centrífugos) explican el incremento de altura al exterior del codo igualmente. Este efecto es particularmente visible en la quebrada rocosa bajo la represa de Mauvoisin, que conduce a una sobreelevación a consecuencia del nivel de agua de casi 20 m.

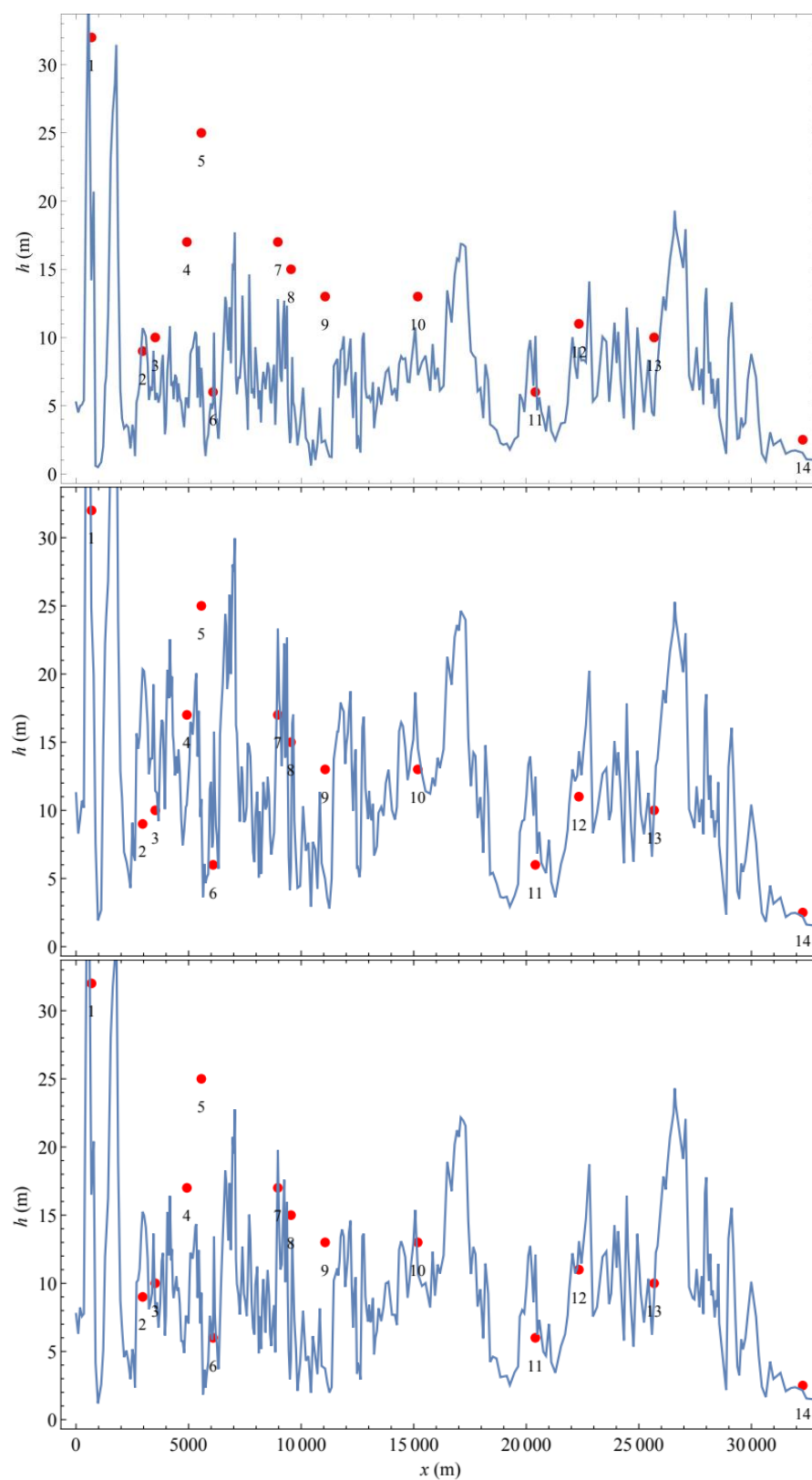


Figura 6. Perfiles longitudinales de las alturas máximas calculadas a partir de los escenarios 1 (a), 2 (b) y 3 (c). Los puntos rojos entregan una estimación de las alturas de flujo durante la crecida de 1818 (Corboz, 2015).

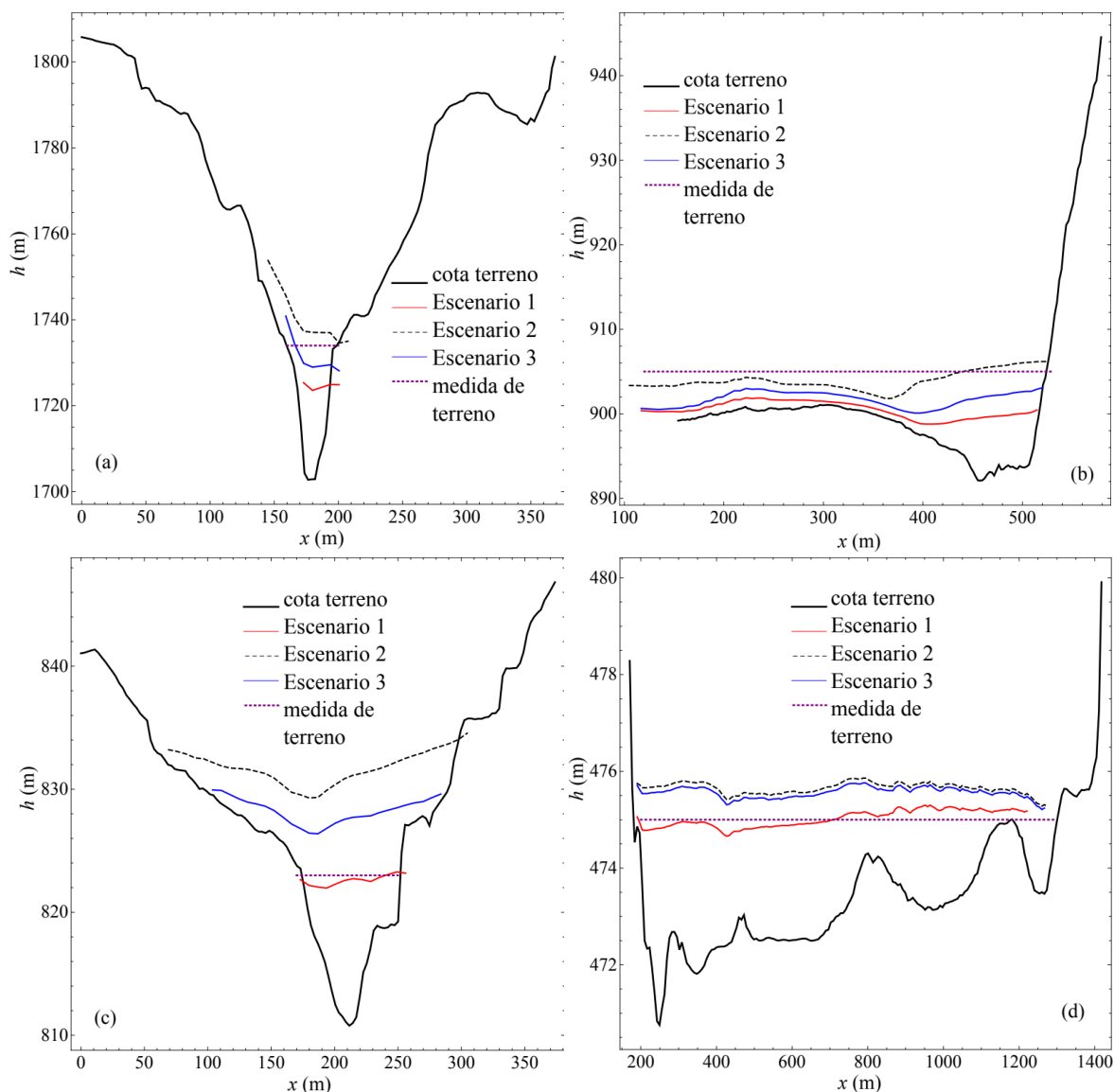


Figura 7. Perfiles transversales de alturas máximas de flujo en el puente de Mauvoisin (a), en Champsec (b), en Châble (c), y en Martigny (d). Reportamos el perfil topográfico natural en su estado actual, los perfiles fueron simulados según los escenarios descritos y la altura máxima observada. Los perfiles están orientados desde la orilla izquierda siguiendo la dirección del flujo.

Las Figuras 8 a 10 en los Anexos muestran la influencia de las zonas inundadas. Hemos utilizado la grilla topográfica del plano cartográfico suizo Siegfried (probablemente de la edición de 1922), que es más preciso que la primera tentativa de cartografía suiza (Dufour) y da una primera idea del paisaje natural y construido tal como debía existir en el valle de Bagnes durante el s. XIX. Reportamos que las alturas máximas de flujo calculadas a través de *Iber* a partir del Escenario 2. Las huellas extraídas de las observaciones de terreno y los testimonios muestran la envolvente más probable para las zonas inundadas durante la catástrofe; probablemente, otros sectores fueron tocados, pero la incertidumbre es mucho más grande en cuanto a su delimitación. Excepto en la zona de Martigny, donde las

simulaciones indican una larga extensión de la crecida, el flujo siguió el curso del río Dranse, y casi sin sorpresa, no hay casi ninguna diferencia entre las observaciones y las simulaciones.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos buscado reconstituir la catástrofe del Giétro de 1818 desde un punto de vista hidráulico. Nuestra herramienta esencial ha sido el software de cálculo *Iber*, que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant utilizadas para modelar flujos hidráulicos debido a crecidas. Teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a las condiciones iniciales durante la ruptura de la represa glaciar, nosotros exploramos tres escenarios:

- Un escenario débil (denominado 1), con un caudal máximo de crecida de 4000 m³/s correspondiente al orden de magnitud promedio de las catástrofes glaciares menores y con una duración de 2.5 h;
- Un escenario fuerte (denominado 2), con un caudal máximo de crecida de 20 000 m³/s y una duración de 0.5 h, el cual corresponde a los valores deducidos a partir del testimonio de Conrad Escher de la Linth (1818);
- Un escenario intermedio (denominado 3), con un caudal máximo de crecida de 8000 m³/s y una duración de 1.25 h, retomando los valores del estudio de Wilfried Haeberli (1983).

Para estos tres escenarios el volumen de agua drenado es idéntico e igual a 18 Mm³. A pesar de sus diferencias, los Escenarios 1 y 3 logran resultados bastante similares: la velocidad de propagación del frente corresponde a aquella determinada por la cronología histórica conocida (ver Figura 4) mientras que el Escenario 2 sobreestima en casi un factor de 2 la velocidad del frente de la crecida. El Escenario 3 entrega alturas de flujo que son coherentes con los valores deducidos del estudio histórico y de terreno (ver Figura 6). El Escenario 1 no predice correctamente las alturas de agua excepto para el tramo Sembrancher-Martigny, y subestima (incluso a veces en un factor superior a 2) en el tramo Fionnay-Sembrancher. Es el Escenario 2 el más cercano al perfil longitudinal observado.

Finalmente, es el escenario intermedio (Escenario 3) el que parece ser el más realista tanto para la velocidad y las alturas de flujo.

AGRADECIMIENTOS

Originalmente, este estudio recibió el aporte financiero de la EPFL-Valais, a través de M. Berclaz, a quién agradecemos. También, damos las gracias a M. Funk y M. Werder (ETHZ/VAW) por los intercambios y las discusiones a propósito del coloquio *Giétro 1818*. Gracias a los estudiantes de la EPFL que trabajaron en las fases preliminares de este proyecto: F. Besson, B. Catteau, V. Mayoraz, D. Pace y M. Praz.

REFERENCIAS

- Begam, S., Sen, D., y Dey, S. (2018). "Moraine dam breach and glacial lake outburst flood generation by physical and numerical models. J. Hydrol., Vol. 563, pp. 694-710.
- Berlioz, J. (1998). *Catastrophes naturelles et calamités au Moyen Âge*. Sismel Edizioni del Galluzzo, Florence, Italia.
- Bohórquez, P. y Darby, S. (2008). "The use of one- and two-dimensional hydraulic modelling to reconstruct a glacial outburst in a steep Alpine Valley. J. Hydrol., Vol. 361, pp. 240-261.
- Capart, H. (2013). "Analytical solutions for gradual dam breaching and downstream river flooding. Water Resour. Res., Vol. 49, 1968-1987.
- Carrivick, J. L. y Tweed, F. S. (2016). "A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. Glob. Planet. Change, Vol. 144, pp. 1-16.
- Castro-Ogaz, O. y Hager, W. H. (2013). "Unsteady Boussinesq-type flow equations for gradually-eroded beds: application to dike breaches. J. Hydraul. Res., Vol. 51, pp. 203-208.
- Cea, L. y Bladé, E. (2015). "A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. Water Resour. Res., Vol. 51, pp. 5464-5486.
- Chinnarasri, C., Jirakitlerd, y Somchai, W. (2004). "Embankment dam breach and its outflow characteristics". Civil Engineering and Environmental Systems, Vol. 21, pp. 247-264.
- Clague J. J. y Mathews, W. (1973). "The magnitude of jökulhaups". J. Glaciol., Vol. 12, pp. 501-504.
- Collectif (2014). *Dictionnaire Historique de la Suisse*. En ligne.
- Corboz, P. (2015). *Reconstitution géo-historique de la débâcle du glacier du Giétro le 16 juin 1818*. Mémoire de master en géographie, Université de Lausanne.
- Costa, J. (1988). "Floods from dam failure". In *Flood Geomorphology*, editado por Baker, V., Kochel, R. y Patton, P., pp. 439-461. Wiley, New York.
- Escher de la Linth, H. C. (1818). *Notice sur le val de Bagnes en Bas-Valais et la catastrophe qui en a dévasté le fond en juin 1818*. Paschoud, J. J., Impresor-Librería, Genève, Suisse. El texto es presentado en Musée de Bagnes (1988).
- Faeh, R. (2007). "Numerical modeling of breach erosion of river embankments". J. Hydraul. Eng., Vol. 133, pp. 1000-1009.
- Froehlich, D. C. (2008). "Embankment dam breach and their uncertainties". J. Hydraul. Eng., Vol. 134, pp. 1708-1720.
- Froehlich, D. C. (2016). "Predicting peak discharge from gradually breached embankment dam". J. Hydrol. Eng., Vol. 21, No. 04016041.
- Funk, M., Werder, M. y Huss, M. (2019). "Modélisation de la vidange amorcée suivie de la débâcle du lac glaciaire de Mauvoisin". Annales Valaisannes.
- Haeberli, W. (1983). "Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps". Ann. Glaciol., Vol. 4, pp. 85-90.

- Harrison, S., Kargel, J. S., Huggel, C., Reynolds, J. M., Shugar, D. H., Betts, R. A., ... y Vilímek, V. (2018). "Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods". *The Cryosphere*, Vol. 12, No. 4, pp. 1195-1209.
- Huss, M., Voinesco, A. y Hoelzle, M. (2013). "Implications of climate change on Glacier de la Plaine Morte, Switzerland". *Geogr. Helv.*, Vol. 68, pp. 227-237.
- Larocque, L., Imran, J. y Chaudhry, M. (2013). "3D numerical simulation of partial breach dam-break flow using the LES and $k-\epsilon$ turbulence models". *J. Hydraul. Res.*, Vol. 51, pp. 145-157.
- Mathieu, J. (2000). *Storia delle Alpi 1500-1900: Ambiente, sviluppo e società*. Edizioni Casagrande, Bellinzona, Svizzera.
- Musée de Bagnes (1988). *16 juin 1818 – Débauche du Giétro*. Le Châble, Suisse.
- Ng., F. y Björnsson., H. (2003). "On the Cleague-Mathews relation for jökulhlaups". *J. Glaciol.*, Vol. 49, pp. 161-172.
- O'Connor, J. E. y Costa, J. E. (2004). "The world's largest floods, past and present: their causes and magnitudes". Technical Report 0607973781, USGS, Reston, Virginia, US.
- Payot, C. y Meilland, A. (coord.) (2018). *Giétro 1818. La véritable histoire*. Faim de Siècle, Fribourg, Suisse.
- Peter, S., Siviglia, A., Nagel, J. B., Marelli, S., Boes, R., Vetsch, D. F. y Sudret, B. (2018). "Development of probabilistic dam breach model using Bayesian inference. *Water Resour. Res.*, Vol. 54, pp. 4376-4400.
- Pierce, M., Thornton, C. I. y Abt, S. R. (2010). "Predicting peak outflow from breached embankment dams". *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 15, pp. 338-349.
- Raymond, M., Wegmann, M. y Funk, M. (2003). "Inventar gefährlicher Gletscher in der Schweiz". Mitteilung 182, ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau.
- de Saint Venant, A. Barré (1871). "Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit". *C. R. Acad. Sci. Paris sér. I*, 173, 147-154 y 238-240.
- Thornton, C. I., Pierce, M., W. y Abt, S. R. (2011). "Enhanced predictions for peak outflow from breached embankment dams". *J. Hydrol. Eng.*, Vol. 16, pp. 81-88.
- Walder, J. S. y Costa, J. E. (1996). "Outburst floods from glacier-dammed lakes: The effect of mode of lake drainage on flood magnitude". *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol. 21, pp. 701-723.
- Walder, J. S. y O'Connor, J. E. (1997). "Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams". *Water Resour. Res.*, Vol. 33, pp. 2337-2348.
- Werder, M., Huss, M. y Funk, M. (2018). "Modélisation de la vidange amorcée suivie de la débâcle du lac glaciaire de Mauvoisin. En coloquio organizado por la Société d'histoire du Valais romand, la Comuna de Bagnes y la Université de Lausanne: *Giétro 1818 sous la loupe des sciences*, Bagnes, Suisse.
- Worni, R., Huggel, C., Clague, J. J., Schaub, Y. y Stoffel, M. (2014). "Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective". *Geomorphology*, Vol. 224, pp. 161-176.

ACERCA DE LOS AUTORES

Christophe Ancey es Profesor Asociado de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) donde dirige el Laboratoire d'Hydraulique Environnementale. Su investigación está relacionada con la dinámica de los flujos geofísicos, como el transporte de sedimentos, las avalanchas y los aluviones, y así contribuir al estado del arte de la ingeniería de riesgo.

Éric Bardou se ha especializado en la gestión de riesgos naturales en montaña, tópico en el que ha trabajado desde 1995. Después de un PhD en la reología de aluviones, ha trabajado en varias empresas consultoras de ingeniería elaborando mapas de riesgo, diseñando obras de protección e instalando sistemas de alarma locales contra aluviones. Desde 2006, trabaja intensivamente en el estudio de crecidas repentinas y comparte sus conocimientos a través de la formación en Suiza y el extranjero (Asia y África).

Tomás Trehwela es Ingeniero Civil mención Hidráulica de la Universidad de Chile, Magíster en Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Ph.D. de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) y Profesor Asistente de la Universidad Adolfo Ibañez. En su investigación, se focaliza en el estudio de flujos granulares, ya sean aluviones, aludes, flujos piroclásticos o el transporte de sedimentos.

ANEXOS

Mapa de las zonas inundadas entre Mauvoisin y Fionnay.

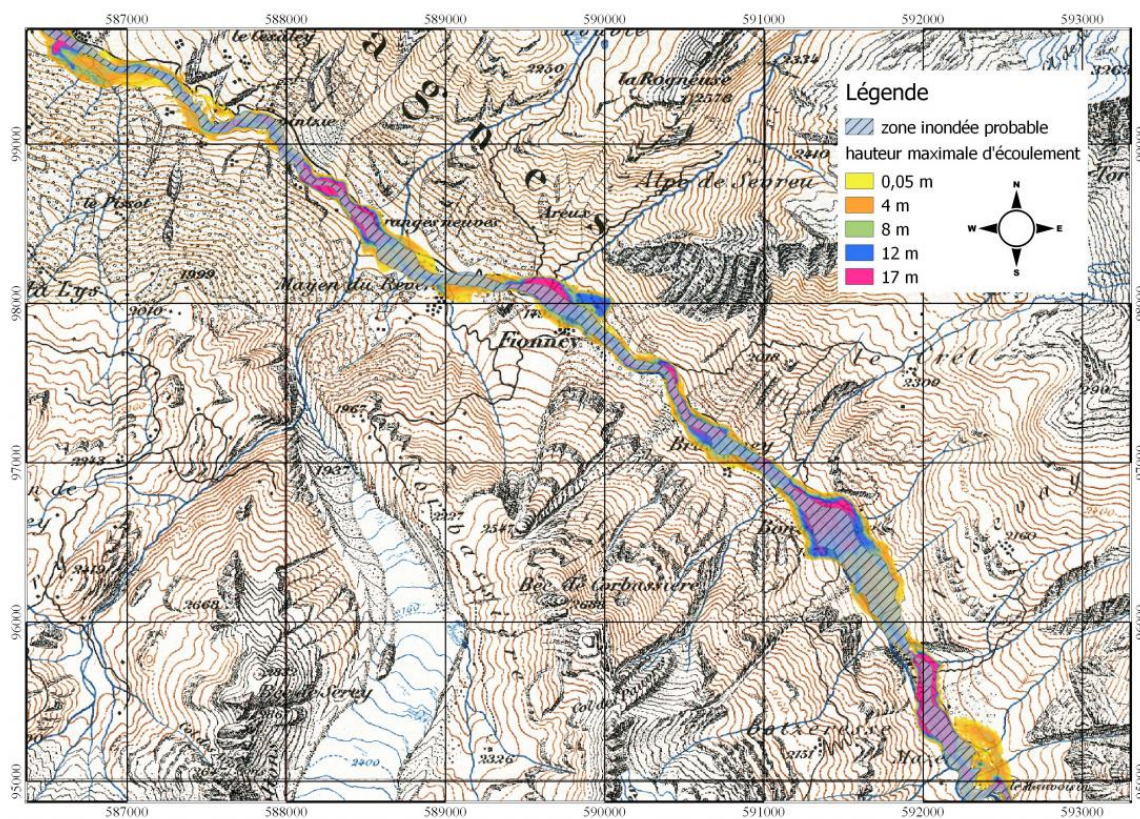


Figura 8. Cartografía de las zonas inundadas entre Mauvoisin y Fionnay. La zona achurada corresponde a la envolvente mínima obtenida a partir de las observaciones del terreno y los testimonios históricos. Las zonas coloreadas muestran la distribución de alturas máximas de flujo calculadas con *Iber* usando el Escenario 2. El mapa proyectado corresponde a la carta Siegfried en una escala de 1 : 25 000 en el sistema de coordenadas CH1903 LV03 (swisstopo).

Mapa de las zonas inundadas entre Lourtier y Châble.

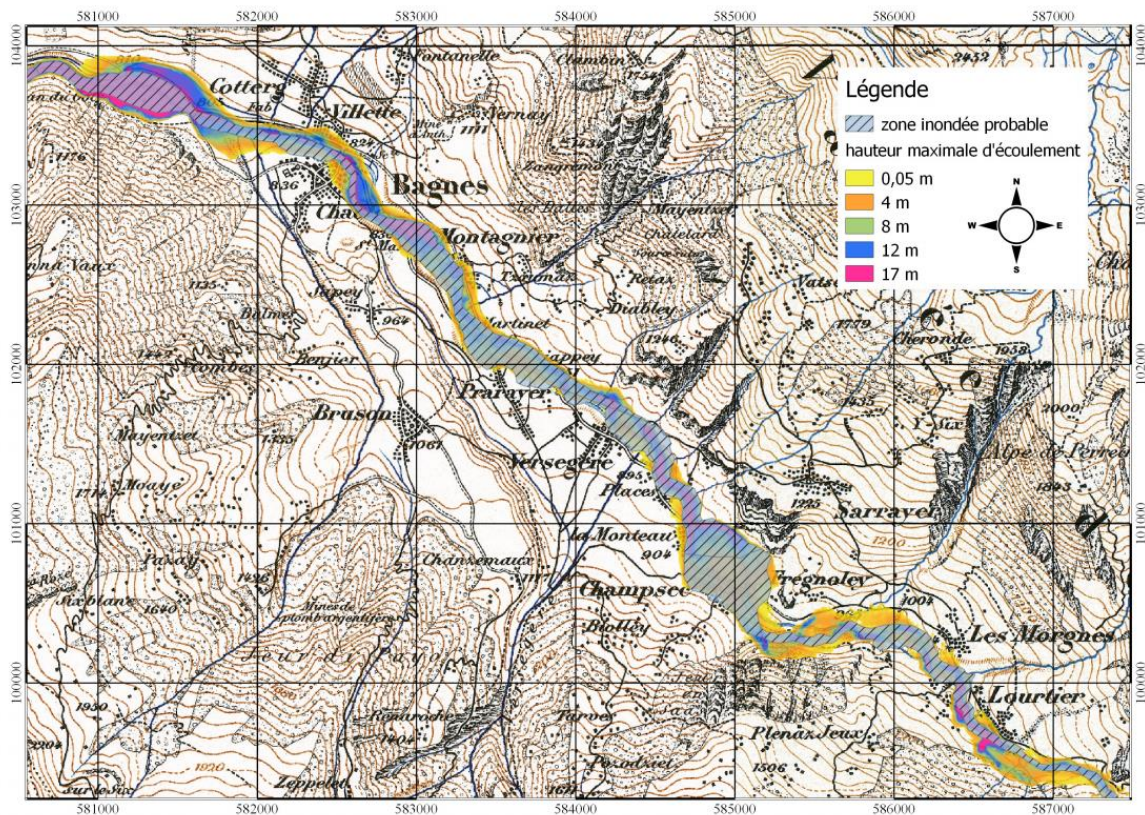


Figura 9. Cartografía de las zonas inundadas entre Lourtier y Châble. La zona achurada corresponde a la envolvente mínima obtenida a partir de las observaciones del terreno y los testimonios históricos. Las zonas coloreadas muestran la distribución de alturas máximas de flujo calculadas con Iber usando el Escenario 2. El mapa proyectado corresponde a la carta Siegfried en una escala de 1 : 25 000 en el sistema de coordenadas CH1903 LV03 (swisstopo).

Mapa de las zonas inundadas en el abánico aluvial de Martigny.

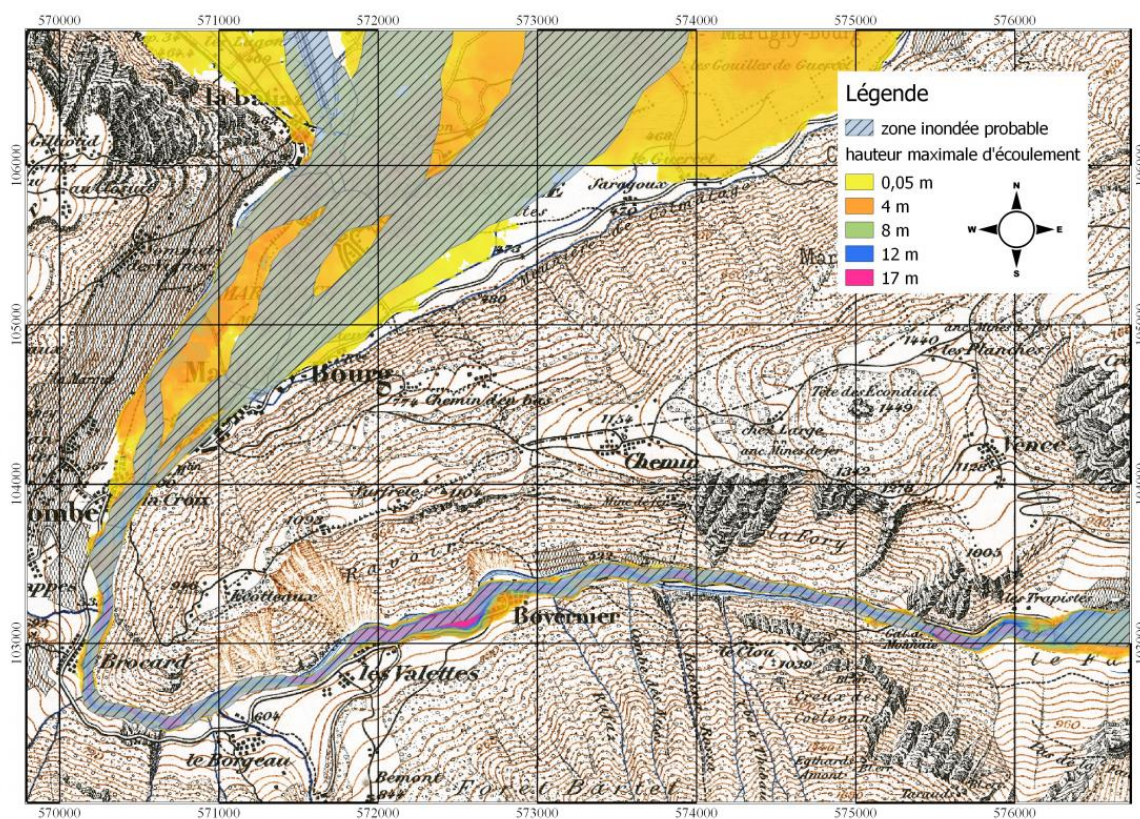
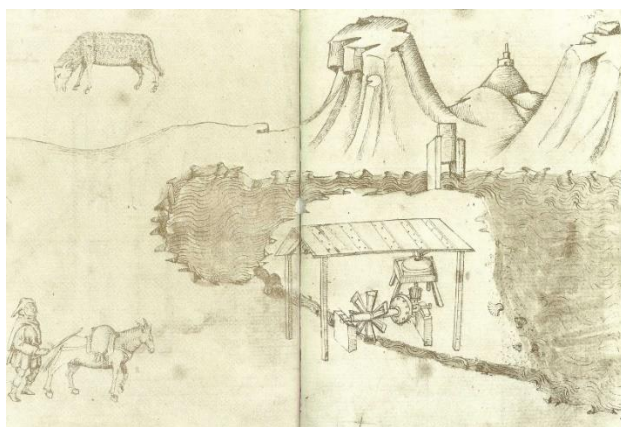


Figura 10. Cartografía de las zonas inundadas en el abánico aluvial de Martigny. La zona achurada corresponde a la envolvente mínima obtenida a partir de las observaciones del terreno y los testimonios históricos. Las zonas coloreadas muestran la distribución de alturas máximas de flujo calculadas con *Iber* usando el Escenario 2. El mapa proyectado corresponde a la carta Siegfried en una escala de 1 : 25 000 en el sistema de coordenadas CH1903 LV03 (swisstopo).

HIDRO-GRAFÍA

ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS



La imagen de la figura corresponde a:

- a) Un mecanismo que utiliza el flujo de agua para accionar un molino
- b) Un sistema mecánico que aprovecha el flujo de las mareas para su funcionamiento
- c) Un mecanismo para determinar el caudal que fluye por el canal mediante el registro de revoluciones del eje que sostiene las aspas

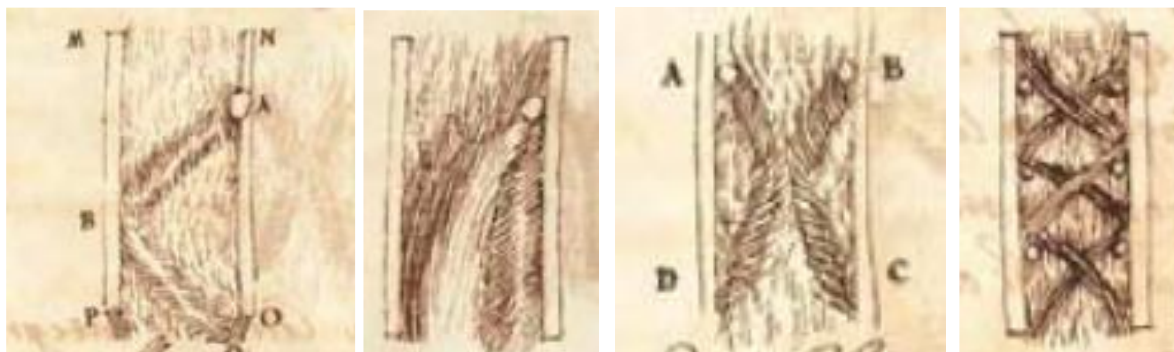
NÚMERO ANTERIOR



La HIDRO-GRAFÍA del número anterior corresponde al primer diseño de una bomba centrífuga, realizado por Leonardo da Vinci en 1508, registrado en el Código Leicester y posteriormente reproducido



en el manuscrito Códice Corazza entre 1637 y 1640. La bomba fue ideada por Leonardo para el drenaje de pantanos y consiste en un recipiente con forma de tronco de cono, en el que existen dos álabes que al ser girados (manualmente) imprime al agua una fuerza centrífuga que hace que ella suba, saliendo por el borde superior. Un modelo escala 1:2 accionado por un motor se construyó en 2019 en el Laboratorio de Hidráulica F.J. Domínguez de la Universidad de Chile. El Código Leicester, aunque no tan conocido como otros manuscritos de Leonardo contiene varios estudios y diseños relacionados con flujo de agua y obras hidráulicas. Las imágenes que se muestran a continuación (tomadas de su reproducción en el Código Corazza) corresponde a su estudio de ondas superficiales.



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.

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

