

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 38, Número 1, 2023

DIRECTORIO SOCHID

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

DIRECTORES HONORARIOS

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

EDITOR DE LA REVISTA

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

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

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

PATRICIO WINCKLER GREZ

Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso, Chile

patricio.winckler@uv.cl

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

RESUMEN

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

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

1. PRELUDIO

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

2. EL USO DE MODELOS EN INGENIERÍA

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



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

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

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

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

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

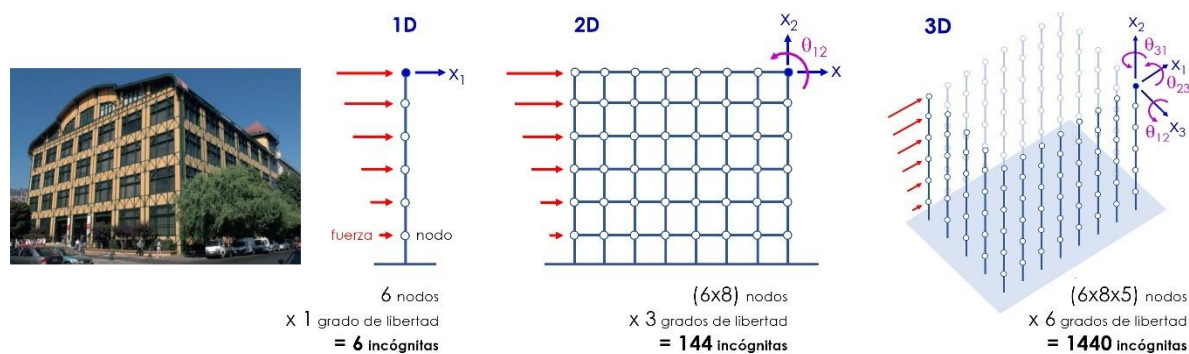


Figura 2. Modelos estructurales con niveles de complejidad crecientes del Edificio Huckle, Facultad de Ingeniería de la UV. Esta figura está inspirada en una presentación de Rafael Aránguiz, profesor de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

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

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

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

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

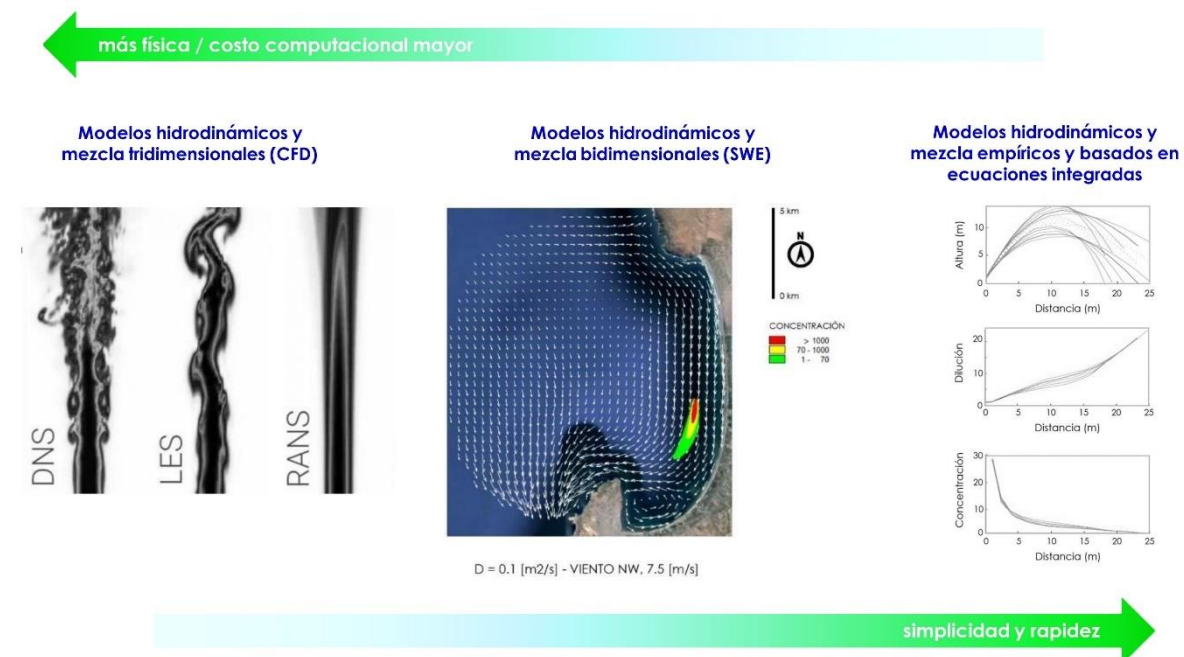


Figura 3. Diferentes tipos de modelos de mezcla de dos fluidos, desde los de mayor complejidad (izquierda) a los de mayor simplicidad y rapidez de cómputo (Adaptado de Winckler, 2021a).

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

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

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

3. LOS JUEGOS Y LAS ANÉCDOTAS

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



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

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

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

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

4. LA ANALOGÍA DE LA DIFUSIÓN

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

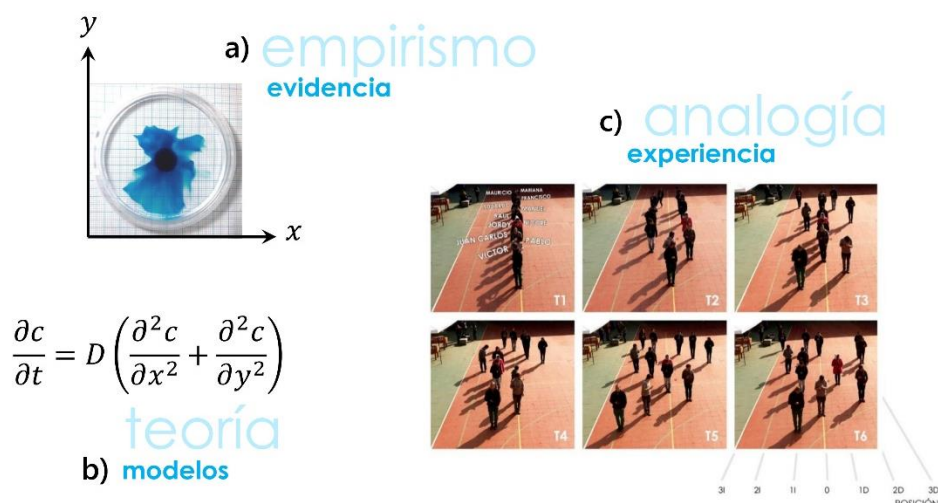


Figura 5. Diferentes aproximaciones para explicar la difusión. a) Experimento casero para mostrar la difusión de un colorante en agua en un disco Petri (el agua está caliente y por eso la mancha es irregular). b) Ecuación de difusión 2D en coordenadas cartesianas para un coeficiente de difusión constante.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

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

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

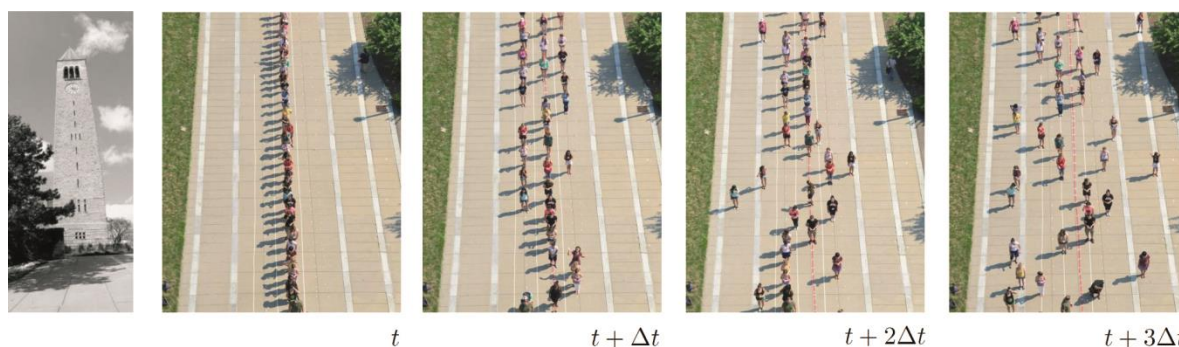


Figura 6. Experimento de difusión de la masa desarrollado un equipo de estudiantes de postgrado con niñas de *high school* durante una Escuela de Verano en Cornell University, Estados Unidos. Las fotografías fueron tomadas por estudiantes desde un campanario bajo la tutoría del autor.

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

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

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

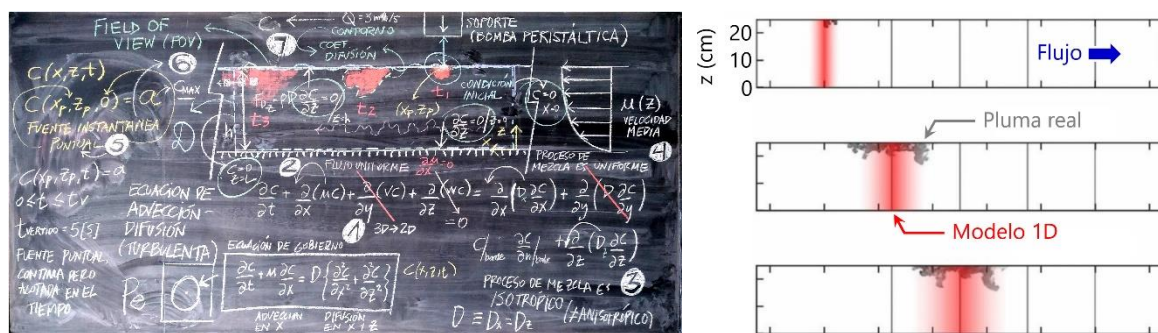


Figura 7. Derivación en pizarra de una ecuación de advección difusión, integrada en la columna de agua y el modelo numérico correspondiente.

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

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

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

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

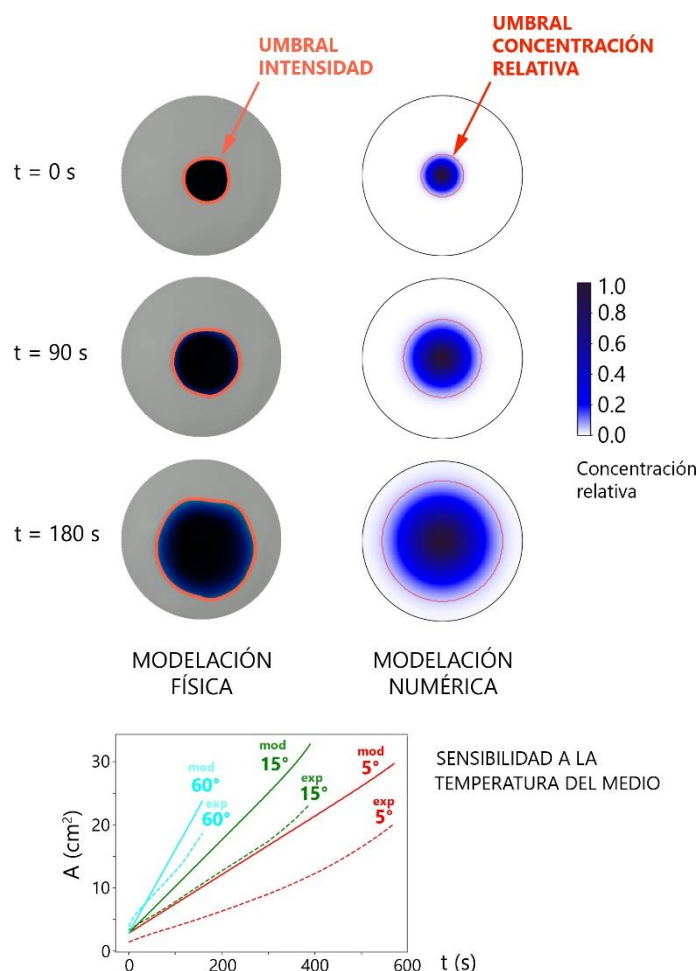


Figura 8. Ejemplo de modelación física y modelación numérica del proceso difusivo de un colorante en un disco petri con agua. Adaptado de ensayos realizados por Juan Andrés Fuenzalida, alumno de ingeniería civil de la UTFSM y Faro Schäfer, alumno de intercambio en la UTFSM.

5. UNA ANALOGÍA Y NUESTRA PERCEPCIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

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

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

⁷ <https://patowinckler.cl/cronicas/>

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



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

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

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

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

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

Como bien dice el profesor y premio nacional Juan Carlos Castilla, incluso gases de efecto invernadero como el CO_2 son transparentes e inodoros, pero pienso que un tobillo roto tiene forma, textura, color y hasta olor luego de un accidente pichanguero. ¿Cómo entonces enseñarle a una niña algo que no se ve, huele, toca, escucha o saborea?. ¿Qué analogía usamos en este caso? ¡Tarea para la casa, señoras y señores!.

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

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

6. EL DESAFÍO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

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

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

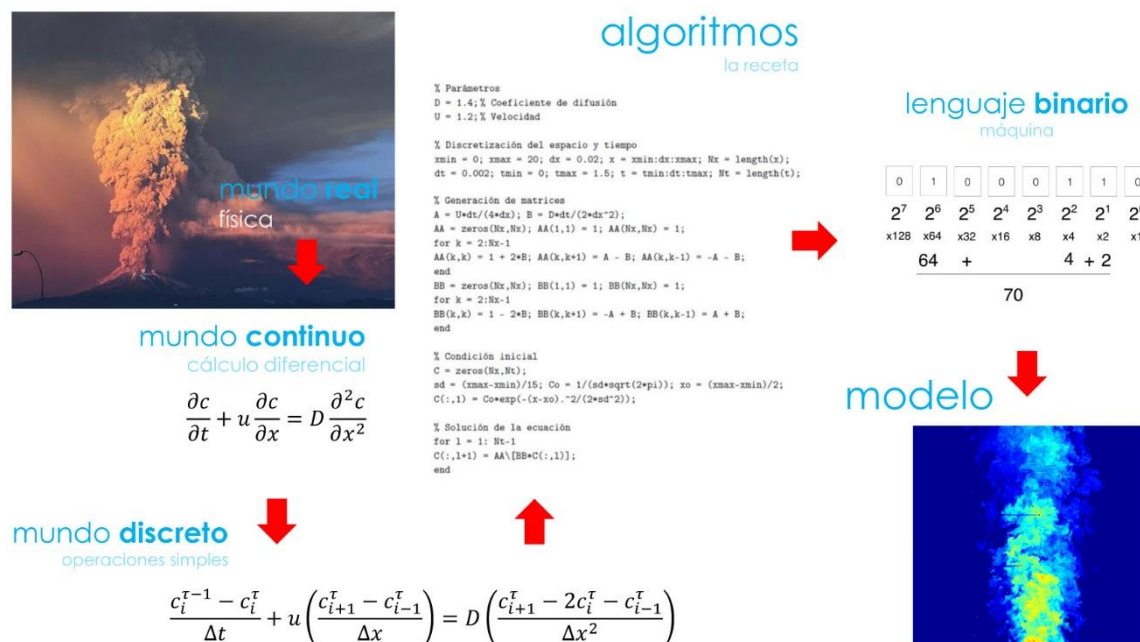


Figura 10. El proceso tradicional de generación de un modelo que permita interpretar un proceso como la advección difusión. En este caso, la ecuación de gobierno, bastante simplificada, está expresada en coordenadas cartesianas y en una dimensión.

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

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

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

⁸ <https://openai.com/blog/chatgpt>

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

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

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

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

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

AGRADECIMIENTOS

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

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

REFERENCIAS

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

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

ACERCA DEL AUTOR

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



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